

بررسی افزودن نانوذرات مختلف به سوخت بر روی احتراق، اتمیزاسیون اسپری سوخت و آلاینده‌گی موتورهای دیزلی پاشش مستقیم

عباس زارع‌نژاد اشکذری^۱

دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰، انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.1.2.4>

چکیده

یکی از استراتژی‌های نوین به منظور بهبود عملکرد و آلاینده‌گی موتورهای دیزلی، استفاده از سوخت‌های جایگزین و نیز افزودنی‌های مناسب نظیر نانوذرات به سوخت دیزل می‌باشد. نانوسوخت‌ها نقش بسزایی در بهینه‌کردن فرآیندهای احتراق و در نتیجه مصرف سوخت و آلاینده‌های خروجی دارند. در این مقاله تاثیر افزودن نانوذرات مختلف (نانوذرات اکسیدهای سریم، آلومینیوم و مس) در غلظت ۱۰۰ پی‌پی‌ام، به سوخت دیزل، بر روی فرآیند احتراق و آلاینده‌گی موتورهای دیزلی با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی فایر، بررسی شده است. برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تغییرات فشار داخل سیلندر، مقدار بیشینه فشار تجربی و زاویه رخداد آن با مقدار حاصل از حل عددی مقایسه شده است. در کنار این پارامتر، مقادیر تجربی آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن، دوده، توان و همچنین مصرف سوخت ویژه ترمزی با مقادیر عددی ارزیابی گردید. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات، میزان حرارت منتقل شده به سوخت را افزایش داده و با تسریع احتراق، سبب کاهش زمان تاخیر در اشتعال می‌گردند. همچنین اختلاط بهتر مخلوط سوخت و هوا، در نانوذرات اکسید سریم نسبت به سایر نانوذرات، مکانسیم اشتعال سوخت را بهبود بخشیده که منجر به احتراق کامل‌تر و افزایش ۱۴/۵ درصدی توان و نیز کاهش ۶ درصدی مصرف سوخت و ۳۴ درصدی آلاینده دوده در مقایسه با سوخت دیزل خالص گردید. تنها نکته منفی آن، افزایش ۳۱ درصدی آلاینده اکسید نیتروژن می‌باشد که می‌توان آن را با مبدل‌های کاتالیزوری کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات، موتور دیزلی، آلاینده‌گی، اسپری سوخت، دینامیک سیالات محاسباتی

Investigation of How Adding Different Nanoparticles to Fuel, Affects Combustion, Fuel Spray Atomization and Emissions of the DI Diesel Engines

Zarenejad Ashkezari, A.¹

Mechanical Engineering Department Imam Khomeini Marine Sciences University

(Received: 2022/02/22, Revised: 2022/06/22, Accepted: 2023/08/01, Published: 2022/08/23)

ABSTRACT

One of the novel strategies to improve the performance and emissions of diesel engines is the use of alternative fuels as well as suitable fuel supplements such as nanoparticles. Nanofuels play an important role in the optimization of combustion processes, fuel consumption, and emissions. In this paper, the effect of adding different nanoparticles (cerium, aluminum, and copper oxide nanoparticles) at a concentration of 100 particles per million (ppm) to the diesel fuel on the combustion process and emissions of diesel engines has been investigated by using the FIRE computational fluid dynamics code. For validation, the simulation results of the in-cylinder pressure variations, the experimental peak pressure, and the angle of occurrence have been compared with their counterpart numerical solution results. In addition, the experimental data of NO_x, soot, power as well as brake specific fuel consumption have been evaluated with numerical values. The results show that nanoparticles increase the amount of heat transfer to the fuel and decrease the ignition delay. Also, better mixing of fuel and air in the cerium oxide nanoparticles compared to other nanoparticles improves the fuel ignition mechanism, which leads to more complete combustion and a 14.5% increase in power and also a 6% and 34% reduction in the fuel consumption and soot respectively, compared to the diesel fuel. The only downside is the 31% increase in NO_x, which can be reduced by catalytic converters.

Keywords: Nanoparticles, Diesel Engine, Emissions, Fuel Spray, CFD

۱- مقدمه

تسریع عملیات انجام شده در این صنعت و افزایش تولید نفت و گاز و محصولات پالایشگاه و پتروشیمی، مؤثر واقع شود. نانو افزودنی‌های سوخت دیزل به‌طور اساسی بر صرفه‌جویی سوخت و بازده موتور تأثیر دارند. همچنین این نانو افزودنی‌ها سبب افزایش عمر موتور، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش سروصدای موتور و نیز کاهش آلاینده‌های خروجی می‌گردند [۵ و ۶]. در سال‌های اخیر استفاده از نانو سوخت‌ها در سیستم‌های احتراقی همواره مورد توجه محققان زیادی بوده است. همان‌طور که می‌دانیم یکی از خواص فیزیکی مهم نانوذرات که منجر به افزایش حرکت براونی نانوذرات داخل سیال و بهبود اختلاط و انتقال حرارت به سوخت می‌گردد، خواص حرارتی آن‌هاست. از طرفی نانوذرات در گروه‌های مختلفی از فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها و غیره دسته‌بندی می‌گردند. به‌طور کلی نانوذرات فلزی نسبت به سایر نانوذرات غیرفلزی و مواد مرکب، از خواص حرارتی بالاتری برخوردار می‌باشند که در مراجع و منابع مختلف نیز اشاره شده است. همچنین با افزودن نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی (اکسید آلومینیوم و غیره) به سوخت دیزل در مقایسه با سایر نانوذرات دیگر (غیرفلزی و مواد مرکب)، بهبود عملکرد و آلاینده‌گی بهتری به دست آمده است [۷ و ۸].

اولین بار اصطلاح نانوسیال در سال ۱۹۹۵ توسط چویی [۹]، به‌عنوان محیط جدید انتقال حرارت مطرح گردید؛ مطابق تحقیقات انجام شده، نانوسیال از طریق اضافه کردن نانوذرات (میانگین اندازه ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر) با درصد‌های حجمی متفاوت تهیه می‌شوند.

میامی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۱ تأثیر افزودن اکسید فلزات به امولسیون آب و دیزل را به‌طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها، بیانگر افزایش سرعت واکنش‌های احتراقی بوده، به‌گونه‌ای که اکسید فلز نقش کاتالیزور را در فعال کردن پیوندهای مولکولی مخلوط آب-دیزل و همچنین انجام واکنش شیمیایی ایفا می‌کند.

گورو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش آزمایشگاهی، تأثیر افزودن منیزیم، منگنز، کلسیم و مس به سوخت دیزل را بر روی بازده و کیفیت اشتعالی سوخت، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها عدد ستان سوخت را در دو

موتورهای دیزلی همواره به دلیل مصرف سوخت کمتر، دوام و کاربری روزافزون آن‌ها نسبت به انواع موتورهای دیگر، به‌عنوان منبع تولید قدرت، مورد توجه سازندگان بوده‌اند. امروزه با سخت‌تر شدن استانداردهای آلاینده‌گی و همچنین بحران انرژی موجود در جهان و بالطبع افزایش قیمت سوخت‌های مصرفی، ضروری است تا گامی اساسی در بهینه کردن فرایندهای احتراق، به‌منظور کاهش مصرف سوخت، آلاینده‌گی و بهبود عملکرد موتور برداشت. یکی از فناوری‌های نوین در جهت نیل به این اهداف، استفاده از سوخت‌های جایگزین و نیز افزودنی‌های مناسب نظیر نانوذرات جامد به سوخت دیزل می‌باشد. نانوذرات از ده‌ها یا صدها اتم یا مولکول و با اندازه و مورفولوژی‌های مختلف (آمورف، کریستالی، کروی، سوزنی و غیره) ساخته شده‌اند. اغلب نانوذرات که به‌طور تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، به شکل پودر خشک می‌باشند. البته نانوذرات ترکیب شده در یک محلول که به شکل سوسپانسیون یا خمیری است نیز مورد توجه می‌باشد. این ذرات که در اشکال و مورفولوژی‌های گوناگونی یافت می‌شوند، ساختارهایی از کروی گرفته تا فلسی، ورقه‌ای، شاخه‌ای، لوله‌ای و میله‌ای دارند. فناوری نانو توانایی فراوانی در صنایع مختلف، از جمله صنایع نفت، گاز، پالایشگاه و پتروشیمی و صنعت حمل‌ونقل دارد. یکی از مهم‌ترین موارد استفاده از نانوتکنولوژی که در صنعت حمل‌ونقل و خودروها استفاده زیادی می‌شود، روان‌کارها هستند. قطعات متحرک زیادی وجود دارد که در اثر اصطکاک و سایش بین اجزای آن‌ها، سالیانه هزینه زیادی را برای تعمیرات و نگهداری به خود اختصاص می‌دهند. برای افزایش کارایی و بهره‌وری روان‌کارها که موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود، افزودنی‌هایی را به آن اضافه می‌کنند که یکی از آن‌ها، نانو افزودنی‌های روان‌کار است. نانو روان‌کارها، مزیت‌های زیادی از جمله افزایش مقاومت در برابر خوردگی و اصطکاک و کاهش دمای عملیاتی ایجاد کرده و باعث می‌شوند جایگزین بسیار خوب و مقرون‌به‌صرفه‌ای نسبت به روان‌کارهای معمولی باشند [۱-۴]. همچنین نانو تکنولوژی، نقش مهمی در ساخت ابزارآلات و مواد مورد نیاز در صنایع بالادستی، میان دستی و پایین‌دستی نفت و گاز دارد و می‌تواند در بهبود و

دانشور و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۱، تأثیر افزودن نانوذرات آهن به سوخت را در یک موتور دیزلی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در آزمایشات خود، تأثیر دور موتور و میزان غلظت‌های مختلف نانوذرات را بر روی مشخصه‌های عملکردی موتور بررسی نمودند. مطابق نتایج آن‌ها، تغییرات محسوسی در راندمان حرارتی (افزایش ۱۲ درصدی) و نیز کاهش ۱۱ درصدی مصرف سوخت، با افزودن نانوذرات به دست آمد.

سولرو [۱۷] در سال ۲۰۱۲ با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم به سوخت دیزل، مشخصه‌های اسپری احتراق دیزلی و رفتار شعله را بررسی نمود. وی در تحقیقات خود نتیجه گرفت که نانوذرات اکسید آلومینیوم سبب بهبود تبادل حرارتی بین جت سوخت و گاز اطراف درون سیلندر گردیده که باعث به وجود آمدن احتراق پایدار و افزایش راندمان می‌شود. همچنین کاهش ۷ درصدی آلاینده CO نیز به دست آمد.

باناپورمات و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۴، با استفاده از روش آزمایشگاهی، راندمان احتراق و عملکرد یک موتور دیزلی را با افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره به بیودیزل بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزودن این نانوذرات سبب بهبود مشخصه‌های احتراقی سوخت پایه و کاهش آلاینده‌ها می‌شود.

ژا [۱۹] در سال ۲۰۱۵، تحقیقاتی با موضوع بررسی اثر اندازه ذرات بر روی واکنش و مشخصات احتراق نانوذرات آلومینیوم انجام داد. مطابق نتایج وی، واکنش نانوذرات زمانی که اندازه این ذرات از ۹۰ nm به ۶۰ nm کاهش می‌یابد، افزایش یافت.

اشوک و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۷، تأثیر نانوذرات با قطرهای ۲۰ و ۴۰ نانومتر را روی ویژگی‌های آلاینده‌گی دیزل دو سیلندر چهارزمانه بررسی کردند.

اثر قطر ذرات بین ۱۰ تا ۳۰ نانومتر برای نانوذرات اکسید مس اضافه شده به سوخت بیودیزل توسط قره‌قانی و همکاران [۲۱]، در سال ۲۰۱۷، بر روی آلاینده‌ها و عملکرد موتورهای دیزلی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان

حالت دیزل خالص و دیزل با افزودنی‌های مذکور بررسی کردند. مطابق نتایج آن‌ها افزودن منگنز به سوخت دیزل باعث افزایش ۴/۳ درصدی عدد ستان سوخت گردید.

کائو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۸، تأثیر افزودن نانو پودر آلومینیوم پوشیده شده با آب به سوخت را در یک موتور دیزلی تک‌سیلندر مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات بیانگر کاهش آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده و همچنین مصرف سوخت در سرعت‌های کمتر از ۱۸۰۰ دور در دقیقه بود. در سرعت‌های بالاتر از ۱۸۰۰ دور در دقیقه، به دلیل در دسترس نبودن زمان لازم برای انجام واکنش آلومینیوم با آب و آزادسازی هیدروژن، اثری بر بهبود عملکرد موتور نداشت و به دلیل وجود رطوبت زیاد در سوخت حاوی نانوذرات پوشیده شده با آب، سوخت خالص کارایی بهتری داشت.

تایگی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۸، با افزودن نانوذرات آلومینیوم به سوخت دیزل، انتقال حرارت به سوخت و احتمال اشتعال پذیری آن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این بررسی ذرات در ابعاد ۱۰ و ۵۰ نانومتر را به سوخت دیزل اضافه کردند. آزمایشات انجام شده، نشان داد که انتقال حرارت به سوخت و احتمال اشتعال آن با افزودن نانوذرات، افزایش می‌یابد.

آرول و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۹، آزمایشات متعددی را با افزودن نانوذرات اکسید سریم در ابعاد ۳۲ نانومتر به دیزل خالص و مخلوط دیزل-بیودیزل-اتانول بر روی عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزل انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشینه فشار داخل سیلندر با افزودن اکسید سریم و اتانول به سوخت دیزل، افزایش می‌یابد. همچنین افزودن اکسید سریم به مخلوط دیزل-بیودیزل-اتانول باعث کاهش منوکسید کربن، دوده، و هیدروکربن نسوخته در مقایسه با دیزل خالص می‌گردد.

ساجیش و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۰، در تحقیقات آزمایشگاهی خود، اثر افزودن نانوذرات اکسید سریم به سوخت بیودیزل را بررسی کردند. نتایج آزمایشات نشان داد که با افزودن نانو ذرات اکسید سریم به بیودیزل، کارایی موتور بهبود یافته و آلاینده‌های خروجی کاهش می‌یابد.

عملکرد و انتشار آلاینده‌ها با افزایش غلظت نانوذرات بهبود یافت، ولی غلظت بیش از حد نانوذرات می‌تواند باعث رسوب در نوک سوزن انژکتور و احتمال مسدود شدن انژکتور سوخت گردد.

قنبری و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۲۱، با استفاده روش پاسخ سطح، عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزلی را با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم در غلظت‌های مختلف به مخلوط دیزل-بیودیزل، بهینه‌سازی کردند. نانوذرات آلومینیوم در غلظت‌های ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ پی‌پی‌ام، به ترکیب سوخت تهیه‌شده، اضافه گردید. مطابق نتایج آن‌ها، بیشترین مقادیر گشتاور، توان ترمزی و آلاینده اکسید نیتروژن و نیز کمترین مقادیر مصرف سوخت و آلاینده مونوکسید کربن برای نانوذرات با غلظت ۱۶۰ پی‌پی‌ام، به دست آمد. همچنین نانوذرات اکسید آلومینیوم، افزودنی مناسبی برای مخلوط‌های دیزل-بیودیزل به‌منظور بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌گی موتورهای دیزلی است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در اکثر پژوهش‌های صورت گرفته، تأثیر افزودن نانوذرات به سوخت بر روی عملکرد و آلاینده‌گی موتورهای احتراقی موردبررسی قرار گرفته است. ولی مطالعات مختصری در خصوص افزودن نانوذرات به سوخت بر روی مشخصه‌های اسپری سوخت و اتمیزاسیون آن وجود دارد؛ لذا در کار حاضر، تأثیر افزودن نانوذرات مختلف با غلظت یکسان (نانوذرات اکسید سرب، آلومینیوم و مس) به سوخت دیزل، بر روی فرآیند احتراق و میزان انرژی آزادشده، مشخصه‌های اتمیزاسیون اسپری سوخت، عملکرد و آلاینده‌گی موتورهای دیزلی پاشش مستقیم با استفاده از کد دینامیک سیالاتی فایر انجام شده است. لازم به ذکر است که در تمامی حالات موردبررسی به غیر از تغییر در سوخت ورودی، سایر پارامترهای فیزیکی و عددی، ثابت و برابر مقادیر آن در حالت شبیه‌سازی دیزل پایه در نظر گرفته شده است.

۲- مدل‌سازی

موتور استفاده‌شده در این تحقیق، موتور دیزلی پاشش مستقیم پرکینز AE762337B چهار سیلندر چهارزمانه است. مشخصات فنی و شرایط عملکردی موتور در جدول ۱، آورده شده است.

داد که اندازه نانوذرات تأثیر زیادی در بهبود راندمان حرارتی ترمزی موتور دارد.

حسینی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۷، آزمایشات مختلفی را به‌منظور بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی در ابعاد مختلف به مخلوط سوخت دیزل-بیودیزل بر روی عملکرد و آلاینده‌گی موتورهای دیزلی انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش میزان غلظت نانوذرات در سوخت، آلاینده‌های دوده و مونوکسید کربن، به ترتیب ۱۸/۴۰٪ و ۴/۳۸٪ کاهش می‌یابد. درحالی‌که مقدار آلاینده NO_x ۱۸/۷۴٪ افزایش یافت.

غلظت نانوذرات پارامتر دیگری است که توسط محققان موردبررسی قرار گرفته است تا تأثیر آن در کاهش آلاینده‌گی و بهبود راندمان حرارتی مشخص شود. سیوا کومار و همکاران [۲۳]، در سال ۲۰۱۸ اثر غلظت ۵۰ تا ۱۰۰ ppm از نانوذرات آلومینا را در کاهش آلاینده‌گی موتور دیزل که با سوخت بیودیزل کار می‌کرد، را مورد مطالعه قرار دادند.

همچنین در پژوهشی دیگر، حسینی و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۸، غلظت ۳۰ تا ۹۰ ppm از نانوذرات اکسید گرافن را روی عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل، بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودنی‌های اکسید گرافن تأثیر معنی‌داری در کاهش انتشار UHC (کاهش ۴۵/۵۶٪) و نیز کاهش ۱۸/۳۸٪ CO دارد. همچنین مقدار مصرف سوخت نیز ۱۰/۱۳٪ کاهش می‌یابد. باین‌حال، مقادیر توان و آلاینده NO_x ، به ترتیب ۸/۶۶٪ و ۷/۲۲٪ افزایش یافت.

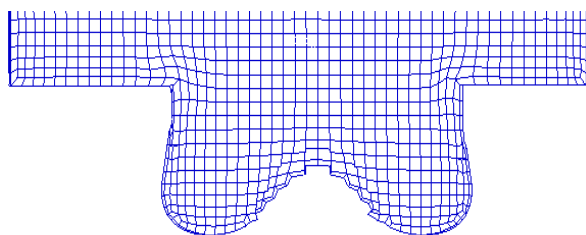
الهی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۸، مطالعه جامعی در خصوص تأثیر افزودن نانوذرات به ترکیب‌های سوخت دیزل-بیودیزل بر عملکرد موتورهای دیزلی انجام دادند. نتایج آن‌ها بیانگر بهبود انتقال حرارت و پایداری ترکیب‌های سوختی بوده که منجر به احتراق کامل‌تر در موتور گردید؛ همچنین عملکرد موتور بسته به میزان غلظت نانوذرات، تغییر یافت.

خان و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۲۰، مطالعه گسترده‌ای به‌منظور بررسی چالش‌های موجود با افزودن نانوذرات به سوخت دیزل و بیودیزل بر روی عملکرد و آلاینده‌گی موتورها انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که غلظت و اندازه نانوذرات سوخت تأثیر قابل‌توجهی بر روی عملکرد موتور و آلاینده‌های خروجی دارد. هرچند که

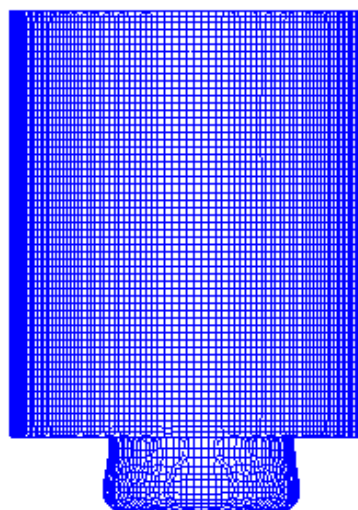
جدول (۱). مشخصات موتور [۲۸]

پركينز AE762337B ۴ زمانه پاشش مستقيم	مدل و نوع موتور
۴	تعداد سيلندر
۱۲۷ × ۱۰۰	قطر × كورس (mm)
۲۱۹	طول شاتون (mm)
۲۰۰۰	دور موتور (rpm)
۰۶	شروع پاشش سوخت (bTDC)
۰۱۷	مدت پاشش سوخت (CA)
۰۳۴	زمان بسته شدن سوپاپ ورودی (aBDC)
۰۹۵	زمان باز شدن سوپاپ خروجی (aTDC)

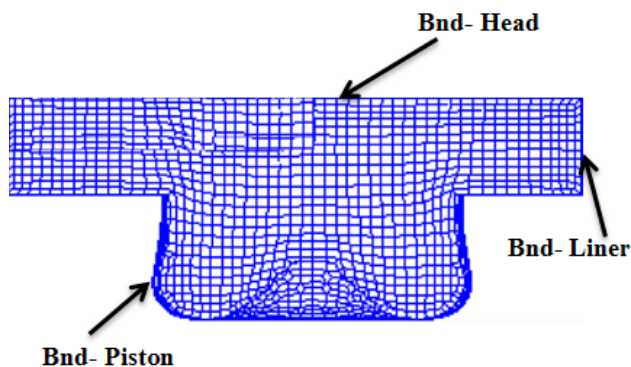
به‌منظور مدل‌سازی سه‌بعدی، در ابتدا یک سيلندر موتور در نرم‌افزار سالیدورکز مدل گردید. سپس با توجه به استراتژی‌ای که برای ایجاد شبکه، در کد فایر در نظر گرفته شده، نیاز به ایجاد یک شبکه سطحی از مدل می‌باشد. در فاصله مجاز بین پیستون و سرسیلندر از شبکه با سازمان و در حفره کاسه پیستون از شبکه بی‌سازمان استفاده شده است. با توجه به اینکه تحلیل به‌صورت سوپاپ بسته؛ یعنی از لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی (۳۴ درجه بعد از نقطه مرگ پایین) تا لحظه باز شدن سوپاپ خروجی (۹۵ درجه بعد از نقطه مرگ بالا) انجام می‌گیرد؛ لذا دامنه محاسباتی، شامل سيلندر بوده که به سرسیلندر، بوش سيلندر و کاسه پیستون به‌منظور در نظر گرفتن شرایط مرزی تقسیم می‌شود. در واقع بر روی شبکه ایجاد شده، سطوح مرزی با اسامی مناسب برای اعمال شرایط مرزی انتخاب می‌گردد.



(ب)

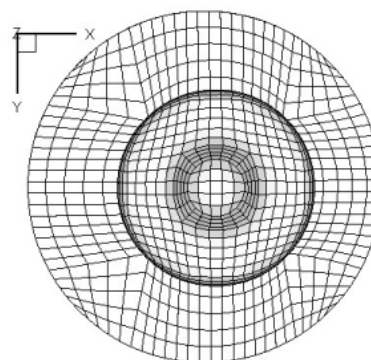


(الف)



Bnd- Piston

(د)



(ج)

شکل (۱). شبکه نهایی ایجاد شده در حالت‌های الف) پیستون در نقطه مرگ پایین، ب) شبکه سطحی ایجاد شده، ج) شبکه ایجاد شده از نمای پایین، و د) شبکه ایجاد شده در نقطه مرگ بالا با اعمال شرایط مرزی

۳-۱- معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{\rho}_s \quad (1)$$

که در معادله فوق، \mathbf{u} سرعت سیال، ρ چگالی کل و $\dot{\rho}_s$ دبی جرمی سوخت دیزل پاشیده شده به داخل محفظه احتراق می باشد [۲۹ و ۳۰].

۳-۲- معادله مومنتوم

معادله مومنتوم در رابطه (۲) آورده شده است.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\frac{1}{\alpha^2} \nabla p - A_0 \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \dot{\mathbf{F}}^s + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

که در آن p فشار سیال و α یک کمیت بی بعد بوده که برای بهبود بازده محاسبات در جریان های با عدد ماخ پایین به کار می رود و در صورت عدم استفاده از این روش، α برابر یک، خواهد بود. A_0 در محاسبات جریان آرام برابر صفر بوده، ولی در صورتی که از مدل های جریان آشفته استفاده شود، مقدار آن برابر یک خواهد بود. $\dot{\mathbf{F}}^s$ مومنتومی است که به وسیله اسپری سوخت به سیستم اضافه می شود و $\boldsymbol{\sigma}$ تانسور تنش های ویسکوز است که به صورت نیوتنی در نظر گرفته می شود.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right] + \lambda (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \quad (3)$$

که در آن μ ویسکوزیته سیال، \mathbf{I} تانسور واحد و λ ضریب دوم ویسکوزیته می باشد که از رابطه (۴) به دست می آید [۲۹، ۳۰].

$$\lambda = \frac{2}{3} \mu \quad (4)$$

۳-۳- معادله انرژی

معادله انرژی به کاررفته در حل مسئله، به صورت رابطه زیر می باشد.

$$\frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} I) = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} + (1 - A_0) \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{J} + A_0 \rho \varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s \quad (5)$$

که در آن I انرژی داخلی ویژه و \mathbf{J} بردار شار حرارتی است که مجموع رسانش حرارتی و پخش آنتالپی می باشد.

در مراحل بعدی مدل سازی شبکه متحرک انجام می شود. برای این منظور، حرکت قسمت متحرک (پیستون)، می بایست شبیه سازی گردد. حرکت پیستون با داشتن طول شاتون و کورس، مدل سازی می شود. در کارکرد واقعی موتور، پیستون حرکت می کند؛ بنابراین برای شبیه سازی تغییرات موقعیت پیستون نسبت به زاویه لنگ، شبکه نیز باید با این حرکت منطبق شود. برای این منظور جهت حفظ کیفیت شبکه، در زوایای خاصی دو شبکه با تعداد سلول متفاوتی ایجاد می شود. در این زوایا اطلاعات متغیرهای جریان که در شبکه اولیه محاسبه شده است به شبکه دوم، برای محاسبات بعدی منتقل می شود. به این عمل اصطلاحاً به روزرسانی (Rezoning)، می گویند. به روزرسانی شبکه به دلیل اینکه در شکل سلول ها در حین حرکت شبکه اعوجاج ایجاد می شود و استفاده از شبکه با کیفیت بهتر، باعث بالا بردن سرعت محاسبات می شود، امری اجتناب ناپذیر است. بنابراین در فواصل هر ۲۰ درجه میل لنگ، شبکه، به روزرسانی شده و در ادامه شبکه به صورت خودکار تولید می شود. شکل (۱)، شبکه نهایی ایجاد شده را در حالت های (الف) پیستون در نقطه مرگ پایین، (ب) شبکه سطحی ایجاد شده، (ج) شبکه ایجاد شده از نمای پایین و (د) شبکه ایجاد شده در نقطه مرگ بالا با اعمال شرایط مرزی را نشان می دهد.

۳- معادلات حاکم

در کار حاضر از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فایر (FIRE) که بر پایه روش حجم محدود است، استفاده شده است. فایر یک برنامه پر حجم است که توسط کمپانی AVL اتریش نوشته شده است و مانند دیگر کدهای عمل کننده به روش حجم محدود، اقدام به گسسته سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به همراه مدلی برای آشفته گی نموده و سپس با یک الگوریتم تکراری اقدام به حل معادلات جبری حاصل می نماید. در کار حاضر، از الگوریتم SIMPLE برای حل معادلات استفاده شده است. اسکیم خطی مرتبه دوم Upwind، برای گسسته سازی معادلات آشفته گی و پیوستگی و اسکیم Smart برای معادلات انرژی و مومنتوم استفاده شده است. معادلات حاکم که بقای جرم، مومنتوم و انرژی را بیان می کنند، در ادامه آورده شده است.

$$m_d \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{ig} + F_{ip} + F_{ib} \quad (7)$$

طرف دوم معادله بالا به ترتیب مجموع نیروهای درگ، گرانش و شناوری، فشاری و خارجی می‌باشد. F_{idr} نیروی درگ (پسا) می‌باشد که با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$F_{idr} = D_p \cdot u_{irel} \quad (8)$$

$$D_p = \frac{1}{2} \rho_g A_d C_D |u_{rel}| \quad (9)$$

D_p تابع درگ است و C_D نیز ضریب درگ نامیده می‌شود که به صورت کلی تابعی از عدد رینولدز قطرات (Re_d) و مساحت برش عرضی ذرات (A_d) می‌باشد. ضریب درگ که تابعی از عدد رینولدز قطره است از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}) & Re_d < 10^3 \\ 0.44 & Re_d \geq 10^3 \end{cases} \quad (10)$$

عدد رینولدز قطره در معادله زیر نشان داده شده که μ_g ویسکوزیته آن می‌باشد.

$$Re_d = \frac{\rho_g |u_{rel}| D_d}{\mu_g} \quad (11)$$

F_{ig} نیرویی است که شامل اثرات شناوری و گرانش می‌باشد و F_{ip} نیز نیروی فشاری است که به صورت زیر می‌باشند.

$$F_{ig} = V_p (\rho_p - \rho_g) g_i \quad (12)$$

$$F_{ip} = V_p \nabla p \quad (13)$$

F_{ib} ، نیروهای خارجی شامل نیروهای الکترواستاتیکی، مغناطیسی و غیره می‌باشند. در مقایسه بزرگی همه این نیروها، نیروی درگ تنها نیروی درگیر برای پاشش اسپری سوخت و محاسبه احتراق است. با وارد کردن این نیروها در رابطه (۷) و تقسیم طرفین رابطه به جرم قطره (m_d)، شتاب قطره به دست می‌آید.

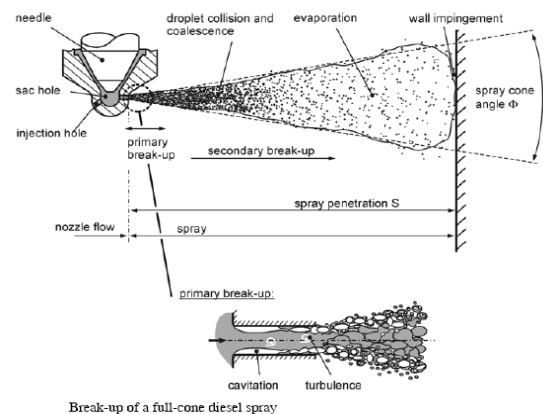
$$\frac{du_{id}}{dt} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{1}{D_d} |u_{ig} - u_{id}| (u_{ig} - u_{id}) + \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_d} \right) g_i \quad (14)$$

$$\mathbf{J} = -k\nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \quad (6)$$

در رابطه بالا، T دمای سیال، h_m آنتالپی ویژه گونه m و D ضریب نفوذ قانون فیک می‌باشد. \dot{Q}^c انرژی آزاد شده از سوخت و \dot{Q}^s انرژی آزاد شده از اثرات متقابل آفشانه سوخت می‌باشد [۲۹ و ۳۰].

۳-۴- مدل اتمیزاسیون اسپری سوخت

شبیه‌سازی اسپری سوخت شامل پدیده جریان چندفازی است و بنابراین نیازمند حل عددی معادلات پایستاری برای دو فاز مایع و گاز به طور هم‌زمان می‌باشد. در مهندسی امروزی، همه محاسبات اسپری برای فاز مایع بر اساس یک روش آماری یعنی روش قطرات مجزا^۱ (DDM) می‌باشد. در این روش معادلات مسیر، مومنتم، انتقال گرما و انتقال جرم برای قطرات مجزا که عضو یک گروه قطرات یکسان غیر واکنشی باهم تحت عنوان بسته قطرات هستند، حل می‌شوند. هر قطره نماینده کل قطرات درون بسته از لحاظ دما، سرعت و اندازه می‌باشد. با توجه به اینکه بین قطرات سوخت مایع و گاز اطراف آن درون سیلندر تبادل جرم، مومنتم و انرژی وجود دارد معادلات هر دو فاز به هم کوپل می‌شوند. معادلات دیفرانسیل برای مسیر حرکت و سرعت بسته‌های ذرات در زیر توضیح داده شده است [۳۱].



شکل (۲). طرح‌واره خروج اسپری سوخت از دهانه نازل انژکتور و فرایندهای مربوطه [۳۱]

معادله دیفرانسیل مومنتم مربوط به بسته‌های قطرات آفشانه با رابطه زیر بیان می‌شود [۳۱]:

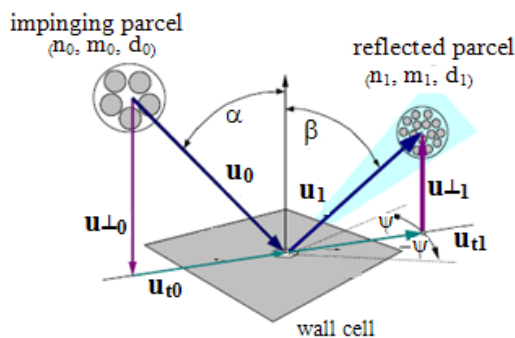
¹ Discrete Droplet Method

$$\tau = \frac{3.726 \beta_1 r}{\Lambda \Omega} \quad (17)$$

ثابت β_1 زمان مشخصه شکست را تصحیح می‌کند و از یک انژکتور به انژکتور دیگر تغییر می‌کند و به سطح آشفستگی اولیه در فرایند تجزیه مایع وابسته است. این ثابت برابر ۱۲ فرض شده است که محدوده آن بین ۵ تا ۶۰ می‌باشد و هر چه قدر این ثابت کمتر باشد زمان اتمیزاسیون جت سوخت و طول پاشش کوتاه‌تر می‌شود. شایان‌ذکر است که مقدار ثابت β_1 به صورت تجربی حاصل می‌شود که طبق آزمایشات انجام شده برای موتورهای دیزلی سنگین (موتور استفاده شده در کار حاضر)، مقدار ۱۲ پیشنهاد شده است. مقدار توصیه شده برای β_0 بر طبق توصیه ریتز و همکاران ۰/۶۱ می‌باشد که وابسته به خواص محلی جریان می‌باشد [۳۲].

۳-۵- مدل برخورد اسپری سوخت به دیواره

برای پیشگویی برخورد قطرات جت سوخت به دیواره، مدل وال جت^۱ در نظر گرفته شده است. بر طبق این مدل فرض می‌شود در شرایط کاری موتور، یک لایه بخار بین قطرات و دیواره تشکیل شده و بسته به عدد وبر قطره باعث برگشتن یا لغزیدن قطرات روی دیواره می‌شود (شکل ۴).

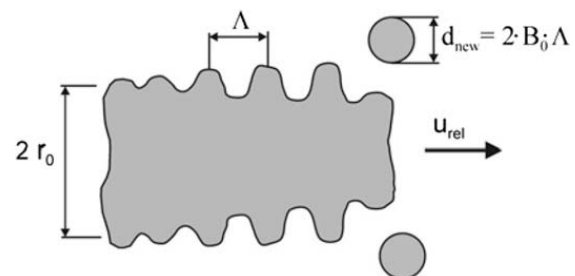


شکل ۴). طرح‌واره برخورد قطرات جت سوخت به دیواره [۳۳]

معیار انتقال بین این دو رژیم عدد وبر بحرانی ۸۰ می‌باشد. در کمتر از این حد، پدیده برگشت قطرات از دیواره را داریم که مؤلفه مماسی سرعت ثابت مانده ولی مؤلفه عمودی سرعت در جهت عکس قبلی و به صورت

u_{id} و u_{ig} ، به ترتیب، سرعت گاز اطراف درون سیلندر و سرعت قطره اسپری هستند. با انتگرال‌گیری از رابطه فوق، سرعت قطره و با انتگرال‌گیری مجدد از رابطه سرعت قطره، موقعیت لحظه‌ای قطره به دست می‌آید. شایان‌ذکر است که در کنار معادله بالا، معادلات انتقال گرما و تبخیر قطرات سوخت، پراکندگی آشفته اسپری سوخت و برخورد آمیختگی قطرات نیز در نظر گرفته می‌شود.

برای مدل‌سازی توزیع و پخش قطرات جت سوخت از مدل ریلی-تیلور استفاده شده است. در این مدل فرض بر این است که به دلیل آشفستگی جریانی که درون سوراخ نازل انژکتور وجود دارد، طیفی از موج‌های سینوسی با نوسانات محوری بی‌نهایت کوچک در سطح جت سوخت به وجود می‌آیند. به دلیل نیروهای آیرودینامیکی که بر اثر سرعت نسبی بین جت سوخت مایع و گاز اطراف درون سیلندر به وجود می‌آید، موج‌های سطحی ایجاد شده، رشد می‌کنند. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، شعاع قطره جدید جدا شده از جت سوخت، متناسب با طول موج‌های سطحی درسته جت سوخت می‌باشد.



شکل ۳). طرح‌واره مدل اتمیزاسیون اسپری سوخت [۳۲]

$$r_{new} = \beta_0 \Lambda \quad (15)$$

که در آن، شعاع قطره تولید شده است که متناسب با طول موج Λ برای سریع‌ترین موج رشدکننده بر سطح سیال می‌باشد. در حالت کلی آهنگ کاهش شعاع قطره به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{(r - r_{new})}{\tau} \quad (16)$$

همچنین زمان متلاشی شدن جت سوخت نیز از رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

^۱ Walljet

$$\rho \dot{V}_{fu} = \frac{C_{fu}}{\tau_R} \rho \min \left(\dot{y}_{fu}, \frac{Y_{Ox}}{S}, \frac{C_{Pr} Y_{Pr}}{1+S} \right) \quad (21)$$

دو عبارت اول عملگر "min" به سهولت مشخص می‌کند که آیا سوخت یا اکسیژن در محدوده مقدار آن وجود دارد، و عبارت سوم، احتمال وجود واکنش است به طوری که اطمینان می‌دهد که شعله در عدم حضور محصولات داغ، گسترش نمی‌یابد. C_{Pr} و C_{fu} ضرایب تجربی هستند و τ_R مقیاس زمانی اختلاط آشفته واکنش است. محدوده ثابت C_{fu} بین ۳ تا ۲۵ می‌باشد و مطابق با داده‌های تجربی موتور باید تنظیم شود. افزایش در این ثابت باعث تقویت شدت آهنگ واکنش آشفته می‌شود. ثابت C_{Pr} نباید به طور دلخواه تغییر داده شود. مقدار پیشنهاد شده آن برای موتورهای دیزلی برابر یک می‌باشد [۳۴].

همان‌طور که می‌دانیم در مباحث احتراقی، سینتیک شیمیایی مورداستفاده نقش مهمی در تعیین تولید و مصرف گونه‌ها دارد. با توجه به وابستگی شدید احتراق نانوذرات و سوخت دیزل به سینتیک شیمیایی، در هنگام مدل‌سازی این سبک احتراقی، باید سینتیک شیمیایی در نظر گرفته شود. اما اعمال سینتیک شیمیایی مفصل به یک مدل احتراقی، زمان محاسبات آن را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد، زیرا به ازای هر گونه موجود در مکانیزم سینتیک شیمیایی، یک معادله دیفرانسیل غیرخطی به معادلات حاکم اضافه می‌شود. از طرف دیگر، در صورت استفاده از مدل‌های احتراقی دقیق نیز زمان محاسبات افزایش خواهد یافت. از این‌رو، واضح است که استفاده هم‌زمان از یک مکانیزم سینتیک شیمیایی مفصل با اندازه بسیار بزرگ و یک مدل احتراقی دقیق زمان محاسبات را به گونه‌ای بالا می‌برد که شبیه‌سازی احتراق عملاً غیرممکن می‌شود [۳۵]. بنابراین ضرورت کاهش اندازه مکانیزم (به عبارت دیگر تعداد گونه‌ها و واکنش‌های موجود در مکانیزم) برای شبیه‌سازی دقیق‌تر احتراق به‌وضوح احساس می‌شود. روش‌های مستقیم مبتنی بر حذف گونه‌ها با دارا بودن زمان محاسباتی پایین و خطی با تعداد کم واکنش‌ها [۳۶]، برای اعمال به مکانیزم‌های بزرگ بسیار مناسب هستند [۳۶ و ۳۷]. شیمی اشتعال مبحث بسیاری از مطالعات بوده است. در این طرح، گونه‌ها که نقش مشابهی در شیمی اشتعال بازی می‌کنند، ترکیب می‌شوند و به صورت یک جزء واحد رفتار می‌کنند. واکنش‌های

تابعی از عدد وبر قطره تغییر می‌کند. بالاتر از عدد وبر بحرانی، رژیم تشکیل جت دیواره را خواهیم داشت که سرعت بازتاب جت با فرض ثابت بودن مقدار آن و فقط تغییر زاویه انعکاس، به دست می‌آید. با توجه به شکل ۴، زاویه انعکاس $(\alpha - 90) = \beta$ در محدوده $0 < \beta < 180$ تغییر می‌کند. جهت مماسی قطرات منعکس شده بر روی سطح با زاویه ψ که در محدوده $-180 < \psi < +180$ تغییر می‌کند، تعیین می‌شود. این زاویه نیز توسط یک تابع توزیع احتمال، تعیین می‌شود:

$$\psi = -\frac{\pi}{k} \ln[1 - p(1 - e^{-k})] \quad (18)$$

در این رابطه عدد تصادفی p بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند و پارامتر k از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sin \alpha = \frac{e^k + 1}{e^k - 1} \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{k}\right)^2} \quad (19)$$

اندازه قطرات پس از برخورد نیز، در عدد وبرهای مختلف به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\text{if } \begin{cases} We < 50 & \text{then } d_1 = d_0 \\ 50 \leq We \leq 300 & \text{then } d_1 = d_0 \cdot f(We_{\text{norm}, \text{in}}) \\ We > 300 & \text{then } d_1 = 0.2d_0 \end{cases} \quad (20)$$

۳-۶- مدل احتراق و خوداشتعالی

مدل احتراقی استفاده شده در کار حاضر، مدل احتراقی کنترلی اختلاط آشفته است که توسط مگنسن توصیف شده است [۳۴]. در این مدل فرض می‌شود که در شعله‌های آشفته پیش‌آمیخته، واکنش‌گرها (سوخت و اکسیژن)، ادی‌های مشابهی را در برمی‌گیرند و مجزا از ادی‌هایی که محصولات داغ را در برمی‌گیرند، هستند. واکنش‌های شیمیایی معمولاً مقیاسی زمانی دارند که در مقایسه با مشخصات فرایندهای انتقال آشفته خیلی کوتاه هستند. بنابراین می‌توان فرض نمود که نرخ احتراق توسط نرخ آمیختگی در مقیاس مولکولی ادی‌هایی که شامل واکنش‌گرها و محصولات داغ هستند، به عبارت دیگر توسط نرخ اضمحلال این ادی‌ها، تعیین می‌شود. ویژگی جالب این مدل این است که برای پیش‌بینی نوسانات گونه‌های واکنش‌دهنده، استفاده نمی‌شود؛ بنابراین نرخ میانگین واکنش را مطابق مدل مگنسن، به صورت زیر نوشت [۳۴].

واکنش شاخه‌داری^۳:



واکنش خاتمه مرحله اول^۴:



واکنش خاتمه مرحله دوم^۵:



در معادلات فوق \bar{R} نشان‌دهنده رادیکال آزاد، F_u نشان‌دهنده سوخت، Q یک عامل میانی، B عامل شاخه‌داری، I نشان‌دهنده گونه‌های میانی غیرفعال و P محصولات اکسیدشده را نشان می‌دهد. ω_i ها، نرخ واکنش‌ها است. ضرایب نرخ منحصربه‌فرد ظاهر شده در ω_i ، شکل آرنیوسی رایج را به خود می‌گیرد.

۳-۷- مدل انتقال حرارت

به‌طور کلی مهم‌ترین اثر دمای بالای محیط مورد مطالعه بر عملکرد نانوذرات، ناپایداری حرارتی آن‌ها می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم مواد با قرارگیری در یک محیط، اثر گرمای آن محیط می‌توانند انرژی دریافت کنند. مقدار این انرژی برابر با $K_B \times T$ است که در آن پارامتر اول ثابت بولتزمن با مقدار 1.38×10^{-23} (ژول بر کلوین) است و پارامتر دوم نیز دما (به کلوین) است. اگر دما خیلی بالا نباشد، این میزان انرژی که در اثر دمای محیط به اجسام بالک منتقل می‌شوند ناچیز است. اما برای نانوذرات به دلیل حجم بسیار کوچک آن‌ها این انرژی قابل توجه می‌شود. برای مثال، اگر این انرژی را به انرژی پتانسیل ناشی از افزایش ارتفاع نانوذره تبدیل کنیم، نانوذره می‌تواند تا اندازه‌هایی در اندازه متر بالا رود. به عبارت دیگر، به دلیل قابل توجه بودن انرژی حرارتی محیط برای نانوذرات، همواره یک ناپایداری حرارتی در آن‌ها وجود دارد و باعث می‌شود که نانوذرات همواره در حال حرکت باشند. به‌طور کلی در اثر افزایش دما، انرژی ارتعاشی اتم‌ها بیشتر می‌شود که علاوه بر بالا رفتن هدایت حرارتی به تغییر ویسکوزیته و حرارت ویژه و نیز افزایش حرکات براونی منجر می‌گردد و لذا سبب افزایش نسبت درصد اتم‌های سطحی می‌گردد. انتقال حرارت از

شیمیایی رخ داده، همان سینتیک شیمیایی در موتورهای دیزلی یک فرایند شاخه‌داری زنجیری است که شامل ۴ دسته واکنش‌ها، یعنی آغاز زنجیر، انتشار زنجیر، شاخه‌داری زنجیر و خاتمه زنجیر می‌باشد. پس از شروع پاشش، اشتعال بعد از طی دوره زمان تأخیر در اشتعال رخ می‌دهد. در طول دوره تأخیر در اشتعال، سوخت تبخیر می‌شود تا اینکه اولین منطقه مخلوط قابل اشتعال با نسبت هوا به سوخت $0.7 < \lambda < 0.5$ تشکیل شود. علاوه بر این، واکنش‌های شیمیایی در این منطقه باید رادیکال‌های کافی به‌منظور شروع فرایند احتراق تولید کنند. واکنش آغاز زنجیر، این رادیکال‌ها را از مولکول‌های سوخت پایدار تولید می‌کند. بعداً این غلظت رادیکال به مقدار مشخصی رسید، واکنش‌های انتشار و شاخه‌داری زنجیر، رادیکال‌های اضافی را تولید می‌کنند. واکنش‌های انتشار زنجیر طبیعت رادیکال‌ها را تغییر می‌دهند بدون اینکه تغییری در تعداد آن‌ها حاصل شود. بعضی از واکنش‌های انتشار زنجیر، رادیکال‌هایی تولید می‌کنند که در واکنش‌های شاخه‌داری زنجیر شرکت کرده که تعداد رادیکال‌ها را افزایش داده و به واکنش‌ها شتاب بیشتری می‌دهند که نهایتاً می‌تواند منجر به وقوع انفجار شود. تأخیر در اشتعال به شدت تابع دما است. افزایش در دما این زمان را کاهش می‌دهد. این مدل که توسط هاستید و همکارانش [۳۸]، ارائه شده است، شیمی دما پایین سوخت‌های هیدروکربنی را تشریح می‌کند. این مدل یک مکانیزم سینتیکی کاهش یافته (مکانیزم کاهش یافته شیل) که شامل ۵ گونه و ۸ واکنش است را به همراه نانوذرات که به رادیکال‌های آزاد اضافه گردیده است، را بکار می‌گیرد تا احتراق و خوداشتعالی را شبیه‌سازی کند.

واکنش آغازی^۱:



واکنش انتشار^۲:



³ branching

⁴ linear termination

⁵ quadratic termination

¹ initiation

² propagation

یکنواخت در سطح قطره معادلات اساسی برای شار گرمی به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{dm_d}{dt} = \dot{Q} \frac{\dot{f}_{vs}}{\dot{q}_s} \quad (32)$$

و معادله انرژی قطره نیز به صورت زیر بیان می‌شود.

$$m_d c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = \dot{Q} \left(1 + L \frac{\dot{f}_{vs}}{\dot{q}_s} \right) \quad (33)$$

این‌ها به ترتیب معادلاتی هستند که معادله تغییر در جرم قطره و بنابراین معادله تغییر قطر و دمای قطره را تعیین کرده و شار گرمایی سطحی \dot{Q} ، و نسبت $\frac{\dot{f}_{vs}}{\dot{q}_s}$ را مشخص می‌کند. نسبت شار گرمی بخار به شار حرارتی سطحی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\dot{f}_{vs}}{\dot{q}_s} = \frac{\rho \beta}{k} \left(\frac{1}{1 - \mu_{vs}} \right) \frac{\nabla_s \mu_v}{\nabla_s T} \quad (34)$$

نسبت $\frac{\nabla_s \mu_v}{\nabla_s T}$ در معادله بالا با فرض شباهت معادلات دیفرانسیل انتقال جرم و حرارت و همچنین شرایط مرزی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\nabla_s \mu_v}{\nabla_s T} = \frac{Le}{c_p} \left[\frac{h_{vs} - h_v - h_{vs} + h_{gs}}{\mu_{vs} - \mu_v} \right] \quad (35)$$

با در نظر گرفتن اینکه عدد Lewis برابر با واحد است ($Le=1$)، نسبت شارها در حالت نهایی به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\dot{f}_{vs}}{\dot{q}_s} = \frac{-B_y}{h_{\infty} - h_s - (h_{vs} - h_{gs})(\mu_{v\infty} - \mu_{vs})} \quad (36)$$

$$B_y = \frac{\mu_{v\infty} - \mu_{vs}}{1 - \mu_{vs}} \quad (37)$$

که در آن B_y برابر با عدد انتقال جرم می‌باشد. با تعویض ضریب انتقال حرارت جابجایی در معادله (۳۰) با عدد نوسلت، شار حرارتی جابجایی به صورت زیر درمی‌آید.

$$\dot{Q} = D_d \pi \lambda \text{Nu} (T_{\infty} - T_s) \quad (38)$$

برای قطرات کروی شار حرارتی \dot{Q} ، را می‌توان از همبستگی مابین ضرایب انتقال حرارت به دست آورد. عدد

سیال عامل به دیواره‌های سیلندر بر عملکرد، بازده و آلاینده‌گی موتور تأثیر دارد. تغییرات در دمای گازهای حاصل از احتراق در نتیجه انتقال حرارت، تأثیر شدیدی بر فرایند تشکیل آلاینده‌ها در داخل سیلندر دارد، به طوری که افزایش انتقال حرارت باعث افزایش تولید اکسیدهای نیتروژن و کاهش بازده حجمی موتور در حین سیکل کاری موتور می‌شود. انتقال حرارت بین سیال عامل و دیواره سیلندر عمدتاً به دو صورت تشعشعی و جابجایی صورت می‌گیرد. در موتورهای دیزلی به علت اینکه فرایند احتراق غیرهمگن در مرحله‌ای که ذرات جامد دوده تولید شده‌اند، کامل می‌گردد، ممکن است انتقال حرارت توسط فرایند تشعشع حدود ۲۰ الی ۴۰ درصد کل انتقال حرارت در داخل سیلندر باشد، که معمولاً آن را با استفاده از یک ضریب مناسب به شکل انتقال حرارت جابجایی در نظر می‌گیرند. در کار حاضر از مدل انتقال حرارت دوکویز استفاده شده است. این مدل بیان می‌دارد که با در نظر گرفتن وجود دمای یکنواخت به ازای تغییر قطر قطره، تغییرات دمایی توسط معادله تعادل گرمایی به دست می‌آید. به عبارت دیگر بیانگر این مطلب می‌باشد که انرژی گرمایی انتقال یافته به قطره موجب افزایش دمای قطره و در نهایت تبخیر آن می‌شود.

$$m_d c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = L \frac{dm_d}{dt} + \dot{Q} \quad (30)$$

که در آن، m_d جرم قطره، T_d دمای قطره، L گرمای نهان تبخیر قطره سوخت، c_{pd} ظرفیت گرمایی ویژه قطره در فشار ثابت و \dot{Q} شار گرمایی جابجایی از گاز و محیط اطراف قطره می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{Q} = 0.82 \alpha A_s (T_{\infty} - T_s) \quad (31)$$

که α ضریب انتقال حرارت جابجایی از فیلم دربرگیرنده قطره در غیاب انتقال جرم، T_s دمای سطح قطره، T_{∞} دمای محیط و A_s مساحت قطره می‌باشد که همان‌طور که ذکر گردید سهم انتقال حرارت تشعشعی در ضرایب رابطه، مستتر است [۳۹]. در این مدل، نکته قابل توجه این است که قطره در محیط گازی چگال ناپذیر، تبخیر می‌شود و بنابراین در حالت گازی دو جزء وجود دارد که شامل گاز چگال ناپذیر و بخار می‌باشد. با معرفی شار حرارتی سطحی (\dot{q}_s)، و شار گرمی بخار (\dot{f}_{vs})، و با لحاظ وجود شرایط

فیزیکی-شیمیایی که نشان‌دهنده به هم چسبیدن ذرات، رشد صفحه‌ای و اکسیداسیون آن است، می‌باشد. آلایندة دوده در داخل محفظه احتراق، هم تشکیل و هم اکسید می‌گردد؛ لذا آهنگ تشکیل دوده کل، به صورت اختلاف بین دوده تشکیل شده و دوده اکسیدشده مدل می‌شود.

$$\frac{dM_{soot}}{dt} = \frac{dM_{form}}{dt} - \frac{dM_{oxide}}{dt} \quad (47)$$

به طوری که تشکیل دوده، عبارت است از:

$$\frac{dM_{form}}{dt} = A M_{fv} P^{0.5} \exp\left(-\frac{E_f}{RT}\right) \quad (48)$$

که در آن A فاکتور پیش‌نمایی، M_{fv} جرم بخار سوخت، P فشار و E_a انرژی اکتیواسیون می‌باشد. آهنگ اکسیداسیون دوده نیز بر طبق مطالعات ناگیل و استریکلند می‌باشد [۴۲].

$$\frac{dM_{oxide}}{dt} = \frac{6M_{wc}}{\rho_s D_s} M_s \dot{i}_{tot} \quad (49)$$

که در آن M_{wc} وزن مولکولی کربن، ρ_s چگالی دوده، D_s قطر میانگین دوده، M_s جرم دوده و \dot{i}_{tot} آهنگ واکنش می‌باشد.

۳-۱۰- مدل آشفستگی

در کار حاضر از مدل آشفستگی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. از لحاظ حل عددی این مدل برای جریان‌های مختلفی از قبیل انتقال گرما، احتراق، سطح آزاد و جریان‌های دوفازی، آزمایش شده است. با وجود اینکه این مدل نقص‌هایی دارد، ولی در حالت کلی منجر به پیش‌بینی‌های واقعی قابل قبولی در بیشتر مسائل احتراقی و مرحله تبخیر و اختلاط و به‌ویژه آهنگ اختلاط سوخت می‌شود و برای تخمین اولیه میدان جریان یا سایر حالت‌هایی که پدیده‌های فیزیکی از قبیل واکنش‌های شیمیایی، تابش، برهم‌کنش چندفازی و غیره را مدل می‌کند، این مدل توصیه شده است [۴۲]. هنگامی که از مدل آشفستگی استفاده می‌شود دو معادله انتقال اضافی برای انرژی جنبشی جریان آشفته k و استهلاک آن ε ، حل

نوسلت از رابطه پیشنهاد شده توسط ریتز و همکاران [۳۲] برای ذرات منفرد، به دست می‌آید.

$$Nu = 2 + 0.6(Re_d)^{\frac{1}{2}} (Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (39)$$

در این معادله عدد رینولدز (Re)، و پرانتل (Pr)، توسط عبارت‌های متداول خودشان به دست می‌آیند. دمای مرجع برای برآورد خصوصیات انتقال مانند گرمای ویژه، هدایت حرارتی و غیره برابر با دمای میانگین سیال و دمای سطح قطره می‌باشد.

$$\bar{T} = \frac{T_\infty + T_s}{2} \quad (40)$$

۳-۸- مدل آلایندة اکسیدهای نیترون (NO_x)

برای ارزیابی اکسیدهای نیتروژن حرارتی از مکانیزم زلدوویچ توسعه‌یافته، استفاده شده است. این مکانیزم یک کاهش سینتیماتیک شیمیایی چندمرحله‌ای بر اساس فرضیات تعادل جزئی واکنش‌های مقدماتی می‌باشد.



از ضرب کردن طرف‌های راست و چپ معادلات بالا، واکنش کلی زیر به دست می‌آید:



بنابراین آهنگ تشکیل NO طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_f [N_2][O_2] \quad (45)$$

آهنگ واکنش k_f نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_f = \frac{A}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (46)$$

که در آن A فاکتور پیش‌نمایی و E_a انرژی اکتیواسیون می‌باشد [۴۰].

۳-۹- مدل تشکیل و اکسیداسیون دوده

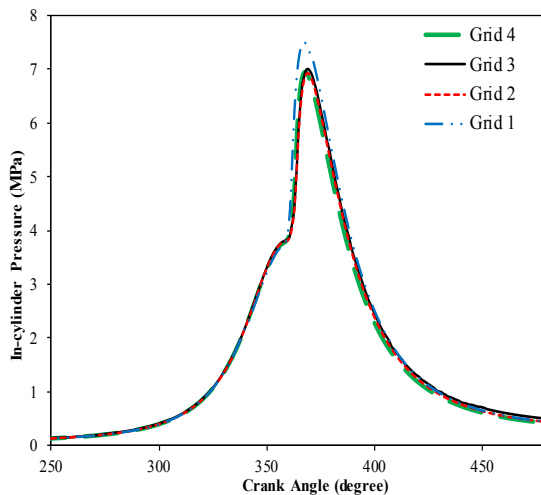
به منظور مدل‌سازی دوده از مدل هیرویسو استفاده شده است [۴۱]. این مدل بر اساس ترکیب مناسب آهنگ

به صورت سیکل بسته (از لحظه بسته شدن سوپاپ هوا (IVC)، تا لحظه باز شدن سوپاپ دود (EVO)) می‌باشد. همچنین دما و فشار لحظه شروع شبیه‌سازی به ترتیب، ۳۱۴ کلوین و فشار ۱۱۹ کیلوپاسکال می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی استقلال از شبکه

یکی از موضوعات مهم در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، آن است که نتایج گرفته شده از تعداد شبکه مستقل باشد. برای این منظور، با تولید چهار شبکه محاسباتی مختلف با تعداد سلول‌های متفاوت (۶۱۳۸۳، ۶۷۲۲۹، ۷۳۰۷۵ و ۸۴۷۶۷) و مقایسه نتایج فشار نسبت به زاویه میل‌لنگ، مناسب‌ترین شبکه از لحاظ تعداد سلول به منظور کاهش زمان محاسبات و دقت نتایج شبیه‌سازی، انتخاب گردید. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود خطای نسبی بین نتایج شبکه‌های ۲، ۳ و ۴ کمتر از ۰/۸ درصد است؛ لذا شبکه ۲ به‌عنوان شبکه مناسب برای مطالعات بعدی انتخاب گردید.



شکل (۵). منحنی فشار بر حسب زاویه لنگ برای شبکه‌های محاسباتی مختلف

با توجه به اختلاف بسیار جزئی نتایج به دست آمده در گام‌های زمانی ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۱ درجه میل‌لنگ، برای کم کردن زمان محاسبات، گام زمانی ۱ درجه میل‌لنگ همراه با تعداد شبکه ۶۷۲۲۹ سلول در نقطه مرگ پایین، به‌عنوان مدل اصلی انتخاب شده است. همچنین حداقل ۱۰ و

می‌شود. مدل $k-\varepsilon$ استاندارد برای یک حجم کنترل به صورت زیر می‌باشد [۴۳].

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P + G - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (50)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \left(C_{\varepsilon_1} P - C_{\varepsilon_2} \varepsilon + C_{\varepsilon_3} G + C_{\varepsilon_4} k \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (51)$$

که در آن

$$P = 2\mu_t S:S - \frac{2}{3} [\mu_t (\text{tr} S) + k] (\text{tr} S) \quad (52)$$

$$G = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} \nabla \rho \quad (53)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (54)$$

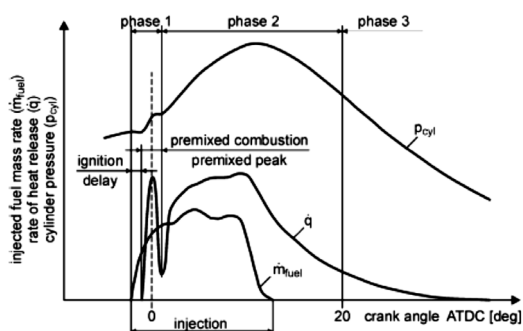
ثابت‌های مدل آشفتگی در جدول ۲ آمده است [۴۳].

جدول (۲). ثابت‌های مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ [۴۳]

مقدار	ثابت مدل
۰/۰۹	C_μ
۱/۴۴	C_{ε_1}
۱/۹۲	C_{ε_2}
۰/۸	C_{ε_3}
۰/۳۳	C_{ε_4}
۱	σ_k
۱/۳	σ_ε
۰/۹	σ_p

محاسبات در بار کامل و دور حداکثر توان خروجی یعنی ۲۰۰۰ rpm برای موتور انجام شده است. حوزه تحلیل

با توجه به شکل ۷، اولین فاز با شروع تزریق سوخت آغاز شده و بعد از احتراق پیش‌آمیخته پایان می‌پذیرد. (احتراق پیش‌آمیخته، منظور، همان پیک اول در نمودار P- θ فوق می‌باشد که ناشی از واکنش‌های پیش‌اشتهالی در طی دوره تأخیر در اشتعال می‌باشد). با پاشش مستقیم سوخت به داخل سیلندر، جت سوخت سرد به داخل محفظه احتراق نفوذ کرده و شروع به اختلاط با هوای متراکم داغ می‌کند. پس از انجام یک سری واکنش‌های شیمیایی، دما و نرخ واکنش به سرعت افزایش می‌یابد که منجر به سوختن کل مخلوط سوخت و هوا که در طول مرحله تأخیر در اشتعال می‌گردد. این احتراق ناگهانی مخلوط سوخت و هوای خوب آماده شده، منجر به افزایش شدید و آزادسازی حرارت و فشار سیلندر می‌شود. به گونه‌ای که پیک پیش‌آمیخته و گرادیان فشار شدید ($dp/d\theta$) تأثیر بسیاری بر روی عملکرد و آلایندگی‌های خروجی دارد. احتراق پیش‌آمیخته، تمام مخلوط سوخت و هوا اطراف منطقه داخلی اسپری را مصرف می‌کند و همه اکسیژن موجود در این منطقه با اکسیداسیون جزئی سوخت مصرف می‌شود. هوا و محصولات سوختن جزئی که از داخل اسپری به مناطق بیرونی تر نفوذ می‌کنند در یک منطقه واکنشی خیلی نازک به نام شعله نفوذی در اطراف اسپری می‌سوزند. این نوع احتراق یعنی سوختن نفوذی، فازهای بعدی احتراق را مشخص می‌کند و با اختلاط محصولات سوختن جزئی و هوا محدود می‌شود که منجر به واکنش کندتری نسبت به احتراق پیش‌آمیخته می‌شود. در نهایت با کاهش دمای گاز در کورس انبساط و کاهش شدید اکسیژن، واکنش‌های شیمیایی کندتر شده و به‌عنوان فاکتور محدودکننده عمل می‌کنند.

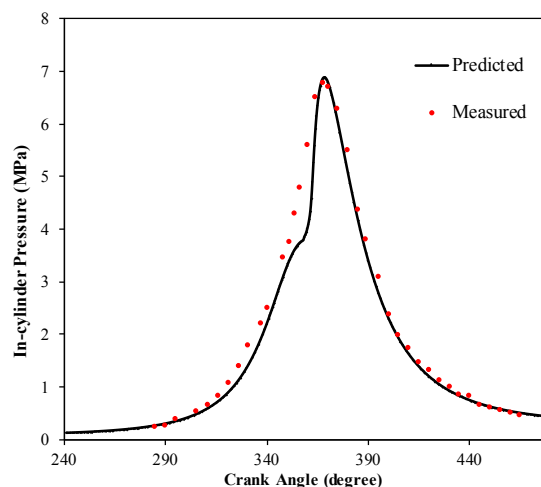


شکل (۷). فازهای مختلف احتراق دیزلی [۴۴]

حداکثر ۱۰۰ تکرار برای هر گام زمانی در نظر گرفته شده است.

۴-۱- اعتباردهی به نتایج شبیه‌سازی شده

به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، در شکل ۶ مقادیر عددی و تجربی فشار داخل سیلندر برحسب زاویه لنگ برای سوخت دیزل، آورده شده است [۲۸]. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی، حاصل شده است. مشاهده می‌گردد که گرادیان فشار زیادی از ۳۵۹ درجه میل‌لنگ به بعد به علت احتراق پیش‌آمیخته سوخت دیزل به وجود می‌آید. بیشینه فشار حاصل از شبیه‌سازی برابر ۶/۹۱ مگاپاسکال و در موقعیت ۳۶۸ درجه میل‌لنگ یعنی ۸ درجه بعد از نقطه مرگ بالا رخ می‌دهد که توافق خوبی را در مقایسه با بیشینه فشار تجربی (۶/۸۳ مگاپاسکال) نشان می‌دهد.



شکل (۶). مقایسه منحنی فشار تجربی و عددی برحسب

زاویه لنگ برای دیزل خالص [۲۸]

شایان ذکر است که در یک موتور دیزلی، سوخت به داخل هوای متراکم داغ درون محفظه احتراق، تزریق می‌شود. به خاطر دمای افزایش یافته گاز در طول تراکم، فرایند احتراق با خود اشتعالی آغاز می‌شود. از طرفی به علت زمان کوتاه در دسترس برای تشکیل مخلوط، همواره مخلوط سوخت و هوا شامل دو ناحیه غنی و فقیر سوخت می‌باشد که شدیداً غیرهمگن است.

مشخصی باشد. چراکه استفاده از آن‌ها دارای محدودیت می‌باشد. نانوذرات مقاومت لایه‌ای سیال را افزایش داده و بنابراین ویسکوزیته سیال افزایش می‌یابد که روی عملکرد موتور تأثیر می‌گذارد. اتمی‌سازی سوخت، متأثر از ویسکوزیته می‌باشد، بنابراین افزایش ویسکوزیته باعث تشکیل قطرات بزرگ‌تر سوخت، شده که باعث احتراق فقیر و در نتیجه افزایش آلاینده‌ها و دوده می‌شود [۲۴، ۴۰ و ۴۱]. لازم به ذکر است که در تمامی حالات مورد بررسی به غیر از تغییر در سوخت ورودی، سایر پارامترهای فیزیکی و عددی، ثابت و برابر مقادیر آن در حالت شبیه‌سازی دیزل پایه در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ مشخصات مختلف اسپری سوخت آورده شده است. همچنین خواص ترموفیزیکی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه برای هر نانوذره در جدول (۴) آمده است. لازم به ذکر است برای مدل‌سازی وابستگی خواص ترموفیزیکی نانوسیال به دما از رابطه تجربی آبرومند و همکاران [۴۶] که به صورت زیر برای ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته، ظرفیت حرارتی ویژه و چگالی نانو سیال بهره برده، استفاده شده است.

$$k_{nf} = (3.9 \times 10^{-5} T - 0.0305) \phi^2 + (0.86 - 1.6 \times 10^{-4} T) \phi + 3.1 \times 10^{-4} T + 0.129 - 5.77 \times 10^{-6} k_p - 40 \times 10^{-4} \quad (55)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1.15 + 1.061 \phi - 0.5442 \phi^2 + 0.1181 \phi^3) \quad (56)$$

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (57)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_p + (1 - \phi) (\rho C_p)_f \quad (58)$$

که در روابط بالا، k_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، k_p ضریب هدایت حرارتی نانوذره، k_f ضریب هدایت حرارتی سیال پایه (سوخت)، μ_{nf} ویسکوزیته نانوسیال، μ_f ویسکوزیته سیال پایه (سوخت)، ρ_{nf} چگالی نانوسیال، ρ_p چگالی نانوذره، ρ_f چگالی سیال پایه (سوخت)، $(C_p)_{nf}$ ظرفیت حرارتی ویژه نانوسیال، $(C_p)_p$ ظرفیت حرارتی ویژه

از لحاظ کمی، با توجه به موجود بودن مقادیر تجربی مصرف سوخت، توان ترمزی و آلاینده‌های دوده و اکسید نیتروژن، می‌توان پارامترهای مرتبط را با مقادیر شبیه‌سازی، مورد ارزیابی قرار داد. در جدول ۳، مقادیر تجربی آلاینده‌ها، مصرف سوخت ویژه و توان ترمزی با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بین مقادیر تجربی و عددی، درصد خطای کمی وجود دارد. با توجه به وجود خطاهای موجود چه در ثبت نتایج تجربی و چه در فرضیاتی که برای شبیه‌سازی عددی صورت گرفته، درصد خطای قابل قبولی می‌باشد.

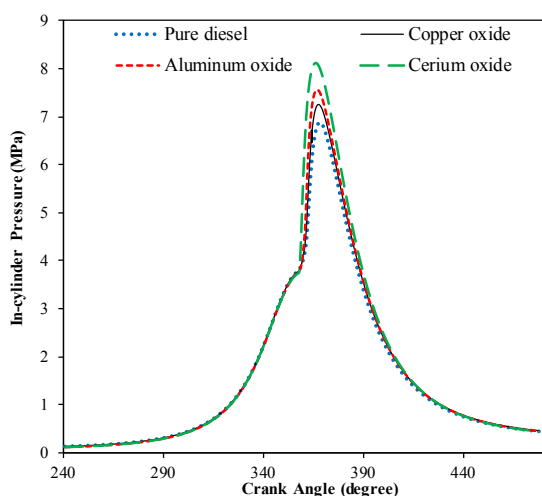
جدول (۳). مقایسه داده‌های تجربی و نتایج عددی [۲۸]

Performance and emissions	Experimental value	Numerical value	Error (%)
NO _x (gr/kW-hr)	۷/۸۱	۸/۱۱	۳/۶
Soot (gr/kW-hr)	۰/۴۷۱	۰/۴۸۶	۳/۰
Bsfc (gr/kW-hr)	۳۴۵/۵	۳۵۴/۶	۲/۵
P _b (kW)	۶۴	۶۶/۷	۴/۱

۲-۴- نتایج عددی حاصل از افزودن نانوذرات به سوخت دیزل

در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی احتراق در اثر افزودن نانوذرات اکسیدهای سریم، آلومینیوم و مس با قطر ۶۰ nm و غلظت یکسان (۱۰۰ ppm) به سوخت دیزل، ارائه شده است. لازم به ذکر است که دلیل انتخاب قطر ۶۰ nm، با توجه به مطالعات پیشین صورت گرفته در خصوص سایز و اندازه نانوذرات افزودنی به سوخت دیزل است که بیان داشته‌اند که نانو ذرات با ابعاد کمتر از ۱۰۰ nm، ویژگی‌های احتراق مطلوب مانند تولید حرارت بالای احتراق، افزایش انرژی حرارتی آزاد شده، نرخ بالای فرآیند احتراق و غیره را به همراه خواهد داشت [۴۵]. همچنین انتخاب غلظت (۱۰۰ ppm)، بر اساس مراجع مختلفی انجام شد که بیان داشته‌اند این غلظت را می‌توان به راحتی با سوخت دیزل به منظور بهبود عملکرد و آلاینده‌گی موتورهای دیزلی و بدون هیچ‌گونه اصلاح ساخت‌افزاری موتور یکپارچه کرد. افزودن نانوذرات باید بر اساس چارچوب

مشاهده گردید. همچنین بیشینه فشار نانو سوخت اکسید سریم بیشتر از نانو سوخت اکسید آلومینیوم و آن نیز هم، بیشتر از نانو سوخت اکسید مس می باشد. اکسید سریم به عنوان یک کاتالیست اکسیژن دهنده، عمل کرده و باعث می شود که واکنش های آغازین احتراقی سریع تر صورت پذیرد. در واقع اکسید سریم با تسریع سوختن، زمان تأخیر در اشتعال را کاهش داده و سبب افزایش فشار و دمای داخل سیلندر گردیده و بالطبع ماکزیمم فشار بالاتری نسبت به حالت های دیگر خواهد داشت.



شکل (۸). تغییرات فشار داخل سیلندر برحسب زاویه لنگ برای نانو سوخت های مختلف و سوخت دیزل خالص

همچنین با توجه به شکل ۹، مشاهده می گردد که انرژی آزاد شده از نانو سوخت اکسید سریم بیشتر از نانو سوخت اکسید آلومینیوم و آن نیز هم، بیشتر از نانو سوخت اکسید مس و سوخت دیزل خالص می باشد. بالاتر بودن نسبت سطح به حجم که باعث بهبود فرآیند اکسیداسیون ترکیبات سوخت می شود و محتوای انرژی بالای نانو ذرات اکسید سریم، می تواند از دلایل اصلی آن باشد. نانو ذرات اکسیدهای فلزی به دلیل محتوای اکسیژن بالایی که دارند، به هنگام اضافه شدن به سوخت دیزل، که فاقد اکسیژن است، سبب بهبود احتراق (احتراق کامل تر) و کاهش دوره تأخیر در اشتعال می گردند. محتوای انرژی بالای این گروه از نانو ذرات نسبت به سوخت دیزل، سبب افزایش عدد ستان مخلوط سوخت و نیز کیفیت اشتعال آن می گردد و بالطبع سبب افزایش کارایی سوخت و ارزش حرارتی آن می گردد. افزودن نانو ذرات اکسید سریم، انتقال

نانو ذره و $(C_p)_f$ ظرفیت حرارتی ویژه سیال پایه (سوخت) است.

جدول (۳). مشخصات مختلف اسپری سوخت

پارامتر	مقدار
ترکیب سوخت	نانو ذرات با غلظت حجمی ۱۰۰ ppm
دبی سوخت (kg/s)	۰/۰۰۱۸
دمای سوخت (°C)	۳۴
فشار سوخت (bar)	۱۸۵
موقعیت اسپری	(-۱، ۰، ۱)
قطر اسپری	قطر سوراخ نازل برابر ۲۶۰ μm زاویه اسپری ۱۲۵°

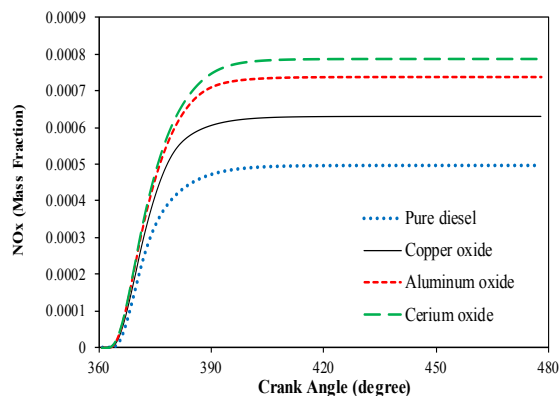
جدول (۴). خواص ترموفیزیکی نانو سیال و سیال پایه

خواص ترموفیزیکی	سوخت دیزل	نانو سوخت اکسید سریم	نانو سوخت اکسید آلومینیوم	نانو سوخت اکسید مس
چگالی (kg/m ³)	۸۳۵	۸۷۲	۸۶۰	۸۴۹
ارزش حرارتی (kJ/kg)	۴۳۵۰۰	۴۳۷۸۳	۴۳۶۳۰	۴۳۵۵۸
هدایت حرارتی (W/mK)	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۳۷	۰/۱۳۲

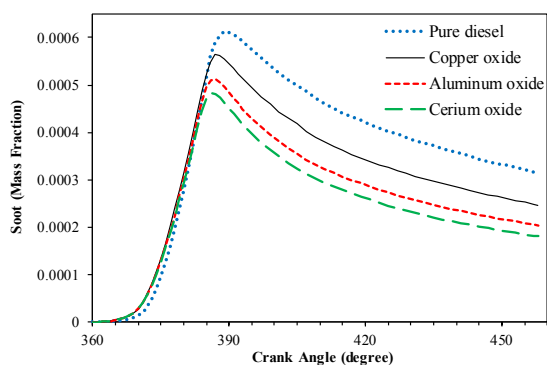
در شکل های (۸ و ۹) به ترتیب تغییرات فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی انرژی، در اثر افزودن نانو ذرات مختلف (اکسیدهای سریم، آلومینیوم و مس) به سوخت و همچنین مقایسه آن با سوخت دیزل خالص، آورده شده است.

با توجه به شکل ۸، همه نمودارها، رفتار کیفی تغییرات فشار داخل سیلندر را به درستی پیش بینی کرده اند. بیشترین و کمترین مقادیر فشار داخل سیلندر، به ترتیب برای نانو سوخت اکسید سریم و سوخت دیزل خالص

شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب مقادیر آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده برحسب زاویه لنگ را برای نانوسوخت‌های مختلف و سوخت دیزل خاص، نشان می‌دهند.



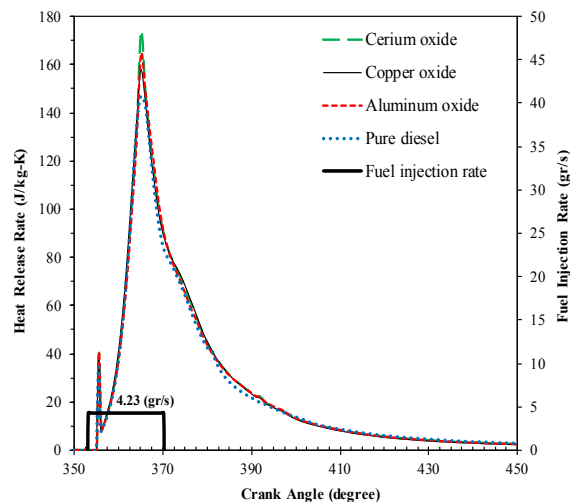
شکل (۱۱). تغییرات آلاینده‌های نیتروژن برحسب زاویه لنگ برای نانوسوخت‌های مختلف و سوخت دیزل



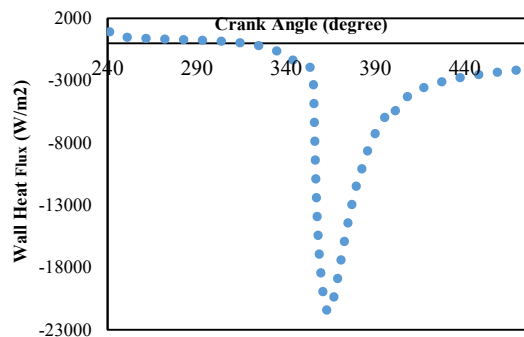
شکل (۱۲). تغییرات آلاینده دوده برحسب زاویه لنگ برای نانوسوخت‌های مختلف و سوخت دیزل خالص

با توجه به شکل ۱۱، آلاینده اکسیدهای نیتروژن در نانوسوخت اکسید سریم بیشتر از نانوسوخت اکسید آلومینیوم و آن هم، بیشتر از نانوسوخت اکسید مس و سوخت دیزل خالص می‌باشد. با توجه به اینکه بیشینه فشار و دمای داخل سیلندر در نانوسوخت اکسید سریم، بالاتر از بقیه حالت‌ها می‌باشد، بالطبع، مقدار اکسیدهای نیتروژن تولیدی نیز بیشتر از حالات دیگر می‌باشد. بیشتر دوده تولیدشده در زمان احتراق، در ادامه مرحله انبساط، مجدداً اکسید می‌شود. فرایند اکسیداسیون دوده بسیار کندتر از فرایند تشکیل آن است. وجود شرایطی که باعث کاهش اکسیژن موجود در محفظه احتراق شود (نظیر اختلاط

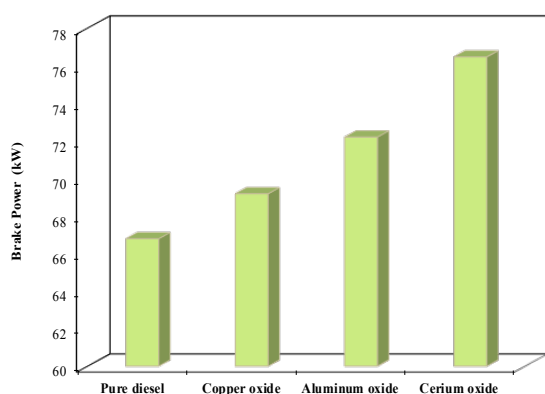
حرارت به سوخت و احتمال اشتعال آن را نسبت به نانوذرات دیگر، افزایش می‌دهد [۴۷]. برای درک بهتر دمای دیواره محفظه احتراق در فرایند انتقال حرارت، در شکل (۱۰)، نمودار شار حرارتی دیواره محفظه احتراق برحسب زاویه لنگ و در طول فرایند شبیه‌سازی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چون حوزه تحلیل به صورت سیکل بسته (از لحظه بسته شدن سوپاپ هوا (IVC)، تا لحظه باز شدن سوپاپ دود (EVO)) می‌باشد، در کورس تراکم، فرآیند داخل سیلندر، گرماگیر بوده و لذا شار حرارتی دیواره سیلندر، مثبت می‌باشد. اما با شروع احتراق، فرایند داخل سیلندر، گرمازا بوده و بالطبع شار حرارتی دیواره، منفی می‌باشد و در واقع از روی شار حرارتی نیز می‌توان دمای لحظه‌ای دیواره را نیز به دست آورد.



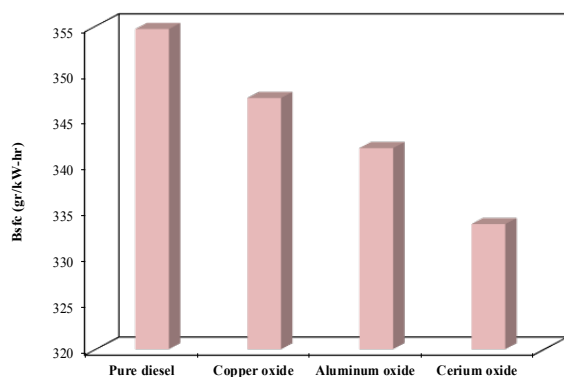
شکل (۹). آهنگ انرژی آزادسازی برحسب زاویه لنگ برای نانوسوخت‌های مختلف و سوخت دیزل خالص



شکل (۱۰). تغییرات شار گرمایی دیواره برحسب زاویه لنگ برای سوخت دیزل خالص



شکل (۱۳). مقادیر توان ترمزی برحسب زاویه لنگ برای نانوسوخت‌های مختلف و سوخت دیزل خالص



شکل (۱۴). مقادیر مصرف سوخت ویژه ترمزی برحسب زاویه لنگ برای نانوسوخت‌های مختلف و سوخت دیزل خالص

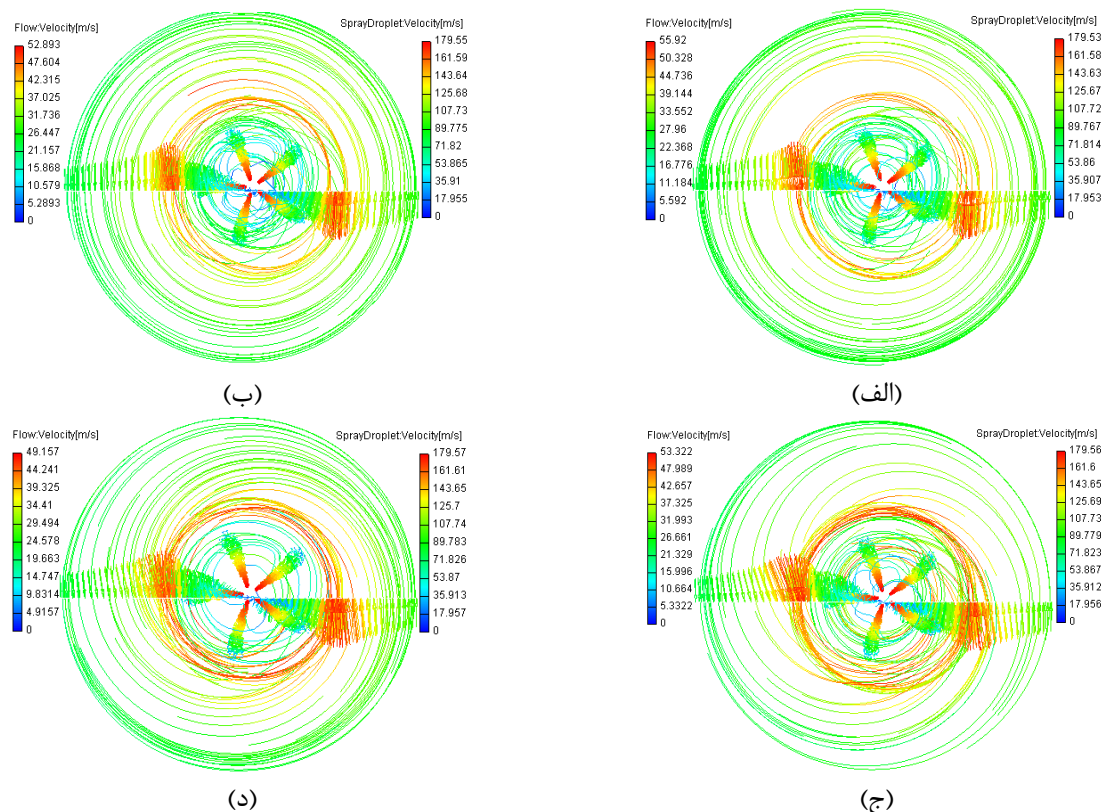
در شکل ۱۵، سرعت قطرات و چرخش اسپری برای نانوذرات مختلف و همچنین سوخت دیزل خالص، در نقطه مرگ بالا آورده شده است. نانوذرات اکسید سریم سبب شدت چرخش و سرعت بیشتر قطرات اسپری سوخت نسبت به سایر نانوذرات و همچنین سوخت دیزل خالص گردید. نانوذرات اکسید سریم، سبب اختلاط بهتر سوخت و هوا و تسریع در فرآیند اکسیداسیون آن می‌گردد. اختلاط بهتر سوخت با هوا بیانگر این موضوع است تبخیر سوخت، بهتر صورت گرفته که منجر به پیک پیش‌آمیخته و پیک فشار بالاتر و نیز دمای بالاتر داخل سیلندر شده و در نتیجه اکسیدهای نیتروژن که مکانیزم تولید آن، حساس به دمای داخل سیلندر است، افزایش پیدا می‌کند. از طرفی، دوده به خاطر اختلاط بهتر و احتراق کامل‌تر، کاهش می‌یابد.

نامناسب و یا شرایط کارکرد با نسبت هوا به سوخت پایین، باعث افزایش انتشار این آلاینده خواهد شد. با توجه به شکل ۱۲، مشاهده می‌گردد که بیشترین و کمترین میزان آلاینده دوده، به ترتیب برای سوخت دیزل خالص و نانوسوخت اکسید سریم می‌باشد. نانوذرات اکسید سریم، مکانیسم اشتعالی سوخت را نسبت سایر نانوذرات دیگر، بهبود بخشیده و باعث اختلاط بهتر مخلوط سوخت و هوا می‌گردد. لذا با اختلاط بهتر، سبب کاهش آلاینده دوده می‌گردد. همچنین نانوذرات اکسید سریم، به‌عنوان یک کاتالیست اکسیژن‌دهنده عمل کرده و اکسیژن را برای اکسیداسیون دوده فراهم می‌نماید؛ لذا میزان آلاینده دوده، به خاطر کاهش تشکیل دوده و تسهیل در چرخه اکسیداسیون، کاهش می‌یابد.

شکل‌های (۱۳ و ۱۴)، به ترتیب مقادیر توان و مصرف سوخت ویژه ترمزی را به ازای نانوسوخت‌های مختلف و مقایسه آن با سوخت دیزل خالص، نشان می‌دهند.

با توجه به شکل ۱۳، مشاهده می‌گردد که بیشترین کمترین مقادیر توان ترمزی، به ترتیب برای نانوسوخت اکسید سریم و سوخت دیزل خالص می‌باشد (افزایش ۱۴/۵ درصدی توان در مقایسه با سوخت دیزل خالص). بالاتر بودن نسبت سطح به حجم در نانوذرات اکسید سریم که باعث بهبود فرآیند اکسیداسیون ترکیبات سوخت می‌شود و همچنین محتوای انرژی بالای آن، می‌تواند از دلایل اصلی افزایش توان با افزودن نانوذرات اکسید سریم به سوخت باشد [۴۸].

همچنین در شکل ۱۴، میزان مصرف سوخت ویژه ترمزی برای نانوسوخت‌های مختلف و سوخت دیزل خالص آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نانوذرات اکسید سریم، کمترین میزان مصرف سوخت را نسبت به سایر سوخت‌ها دارد. به‌گونه‌ای که افزودن نانوذرات اکسید سریم به سوخت، منجر به کاهش ۶ درصدی مصرف سوخت نسبت به دیزل خالص گردید. بهبود فرآیند احتراق در نتیجه اختلاط بهتر هوا با سوخت با اضافه کردن افزودنی نانوذرات اکسید سریم می‌تواند دلیل کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی باشد [۴۹ و ۵۰].



شکل (۱۵). سرعت قطرات و چرخش اسپری برای نانوذرات مختلف و سوخت دیزل خالص الف) اکسید سریم، ب) اکسید آلومینیوم، ج) اکسید مس، و د) دیزل خالص

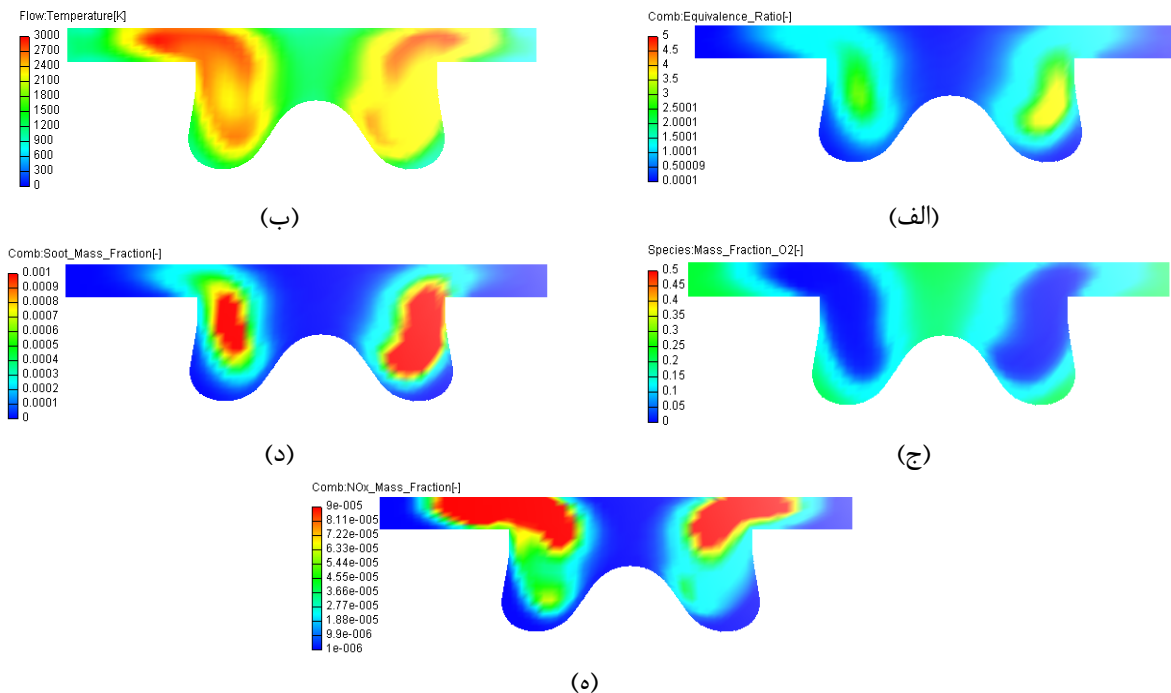
دقت در کانتورهای دوده و اکسیژن مشاهده می‌شود در محل‌هایی که تولید دوده بیشینه است اکسیژن موجود به اندازه کافی نمی‌باشد تا احتراق کامل صورت گیرد. با توجه به کانتورهای دما و نسبت هم‌ارزی، مشاهده می‌شود که تولید دوده بیشتر در مناطق با نسبت هم‌ارزی برابر با ۲ تا ۳/۵ و محدوده دمایی ۲۰۰۰ تا ۲۲۰۰ درجه کلوین تشکیل می‌شود. با دقت در کانتورهای فوق، یک نتیجه مهم دیگر نیز مشاهده می‌شود و آن، رفتار متضادی است که بین محل‌های تشکیل دوده و اکسیدهای نیتروژن، دیده می‌شود. این دو آلاینده در طرفین نقاط دما بالای داخل سیلندر تشکیل می‌شوند. اکسیدهای نیتروژن در منطقه فقیرتر ناحیه دما بالا و دوده در منطقه غنی ناحیه دما بالا تشکیل می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به مکانیزم احتراق و تشکیل آلاینده‌ها در یک اسپری سوختی (شکل ۱۷)، در ناحیه شعله فقیر^۱ (بین لبه و هسته) که نسبت سوخت به

با توجه به نتایج اشاره شده در بالا این‌گونه استنباط می‌گردد که نانوذرات اکسید سریم، نرخ اختلاط و اکسیداسیون بهتر سوخت و هوا و همچنین عملکرد و آلاینده‌گی بهتری نسبت به سایر نانوذرات و نیز دیزل خالص را دارد. برای درک بهتر این موضوع، در شکل ۱۶، به ترتیب کانتورهای نسبت هم‌ارزی، دما، کسر جرمی اکسیژن، دوده و اکسیدهای نیتروژن، برای نانوسوخت اکسید سریم در ۲۰ درجه بعد از نقطه مرگ بالا، ارزیابی گردیده است. بررسی کانتورهای دما، نسبت هم‌ارزی و آلاینده اکسیدهای نیتروژن نشان می‌دهند که در مناطق با نسبت هم‌ارزی برابر با یک (مخلوط استوکیومتریک) و دمای مناطق بالای ۲۰۰۰ درجه کلوین، اکسیدهای نیتروژن، بیشترین مقدار می‌باشد. هرچه دمای مناطق محلی بیشتر باشد تولید این آلاینده نیز بیشتر است. دوده در نواحی احتراق غنی یعنی جایی که آهنگ نفوذ اکسیژن به ناحیه احتراقی، جهت رسیدن به شرایط استوکیومتریک، کافی نمی‌باشد تشکیل می‌شود. با

^۱ Lean Flame Region

کامل انجام می‌گیرد. در این ناحیه آلاینده اکسیدهای نیتروژن، به صورت محلی و به میزان زیادی تولید می‌شود که البته در بارهای کم، به دلیل پایین بودن دما میزان تولید آن نیز کم خواهد بود.

هوا از صفر تا بی نهایت تغییر می‌کند و هسته‌های احتراقی در این ناحیه به وجود می‌آیند، آلاینده اکسیدهای نیتروژن، به صورت محلی و به اندازه بالایی تولید می‌شود. به عبارت دیگر، در این ناحیه، نسبت سوخت به هوا فقیرتر از مخلوط استوکیومتری می‌باشد و احتراق در آن به صورت

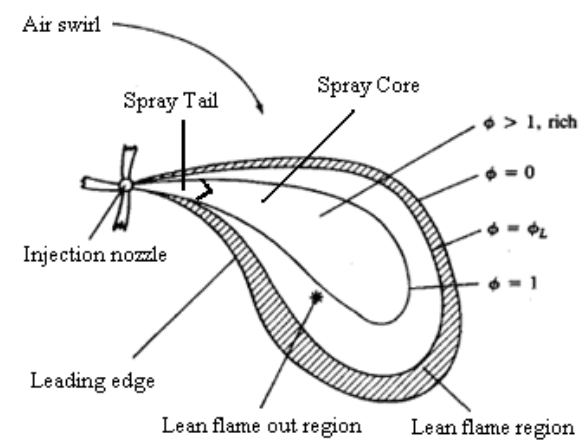


شکل (۱۶). کانتورهای الف (نسبت هم‌ارزی، ب) دما، ج) اکسیژن، د) دوده و ه) اکسیدهای نیتروژن، برای نانوذرات اکسید سریم در ۲۰ درجه بعد از نقطه مرگ بالا

۵- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، تأثیر افزودن نانوذرات اکسیدهای سریم، مس و آلومینیوم با غلظت یکسان، به سوخت دیزل، بر روی مشخصه‌های اتمیزاسیون اسپری سوخت، احتراق و آلاینده‌های موتورهای دیزلی پاشش مستقیم، بررسی شد. برجسته‌ترین نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:

۱- افزودن نانوذرات به سوخت دیزل، سبب بهبود پارامترهای عملکردی موتور و کاهش آلاینده‌های خروجی می‌گردد. البته باید توجه داشت که تغییرات ایجاد شده در عملکرد و آلاینده‌ها، با توجه به شرایط کاری موتور می‌باشد.



شکل (۱۷). مکانیزم احتراق و تشکیل آلاینده‌ها در اسپری سوخت پاشیده شده به محفظه احتراق [۴۴]

6. Ranjbar, M. A., and Pourmoayed, A. "Simulation of the Effect of Fuel Nano Catalysts on the Combustion Performance of a Liquid Propellant Engine using Computational Fluid Dynamics," Vol. 9, pp. 151-165, 2021. (In Persian)
 7. Khond, V. W., and Kriplani, V. M. "Effect of Nanofluid Additives on Performances and Emissions of Emulsified Diesel and Biodiesel Fueled Stationary CI Engine: A Comprehensive Review", *Renew. Sust. Energ. Rev.* Vol. 59, pp. 1338-1348, 2016.
 8. Wen, D. "Nanofuel as a Potential Secondary Energy Carrier", *Energy Environ. Sci.* Vol. 3, pp. 591-600, 2010.
 9. Choi, S. U. S., and Eastman, J. A. "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles in Developments and Applications of Non-newtonian Flows", *ASME Int. Mech. Eng. Congress Expos. NewYork*, 1995.
 10. Mimani, T., and Patil, K. C. "Solution Combustion Syntheses of Nanoscale Oxide and Their Composites", *Mater. Phys. Mech.* Vol. 4, pp. 134-137, 2001.
 11. Guru, M., Karakaya, U., Altiparmak, D., and Alicilar, A. "Improvement of Diesel Fuel Properties by using Additives", *Energy Convers. Manag.* Vol. 43, pp. 1021-1025, 2002.
 12. Kao, M. J., Ting, C. C., and Tsung, T. T. "Aqueous Aluminum Nanofluid Combustion in Diesel Fuel", *J. Test. Eval.* Vol. 36, pp. 186-190, 2008.
 13. Tyagi, H., Phelan, P., Parsher, R., Peck, R., Lee, T., Pacheco, J., and Arentzen, P. "Increased Hot-plate Ignition Probability for Nanoparticle Diesel Fuel", *Nano Lett.* Vol. 8, pp. 1410-1416, 2008.
 14. Arul Mozhi Selvan, V., Anand, R. B., and Udayakumar, M. "Effects of Cerium Oxide Nanoparticle in Diesel and Diesel-biodiesel Ethanol Blends on the Performance and Emission Characteristics of a CI Engine", *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* Vol. 4, pp. 1-6, 2009.
 15. Sajish, V., Sobhan, C. B., and Peterson, G. P., "Experimental Investigation on the Effects of Cerium Oxide Nanoparticle Fuel Additives on Biodiesel", *Adv. Mech. Eng.* Vol. 47, pp.61-69, 2010.
 16. Daneshvar, F., and Shafii, M. B. "Performance Investigation of a Four Stroke Diesel using Water-based Ferrofluid as an Additive", *IMECE2011, USA*, 2011.
 17. Solero, G. "Experimental Analysis of the Influence of Inert Nano-additives Upon Combustion of Diesel Sprays", *Nanosci. Nanotechnol.* Vol. 2, pp. 129-133, 2012.
 18. Banapurmath, N. R., Sankaran. R, Tumbal, A.
 - ۲- به‌طور کلی وجود نانوذرات در محفظه احتراق، انتقال حرارت به سوخت را افزایش داده و با تسریع سوختن، زمان تأخیر در اشتعال را کاهش می‌دهد.
 - ۳- نانوذرات هنگام پاشش، به سوخت کمک می‌کنند تا سرعت قطرات سوخت در هوای فشرده بیشتر گردیده و آهنگ اختلاط سوخت با هوا را افزایش می‌دهند.
 - ۴- اختلاط بهتر مخلوط سوخت و هوا در نانوذرات اکسید سریم نسبت به سایر نانوذرات، مکانیسم اشتعالی سوخت و فرایند سوختن را بهبود بخشیده که منجر به احتراق کامل‌تر و عملکرد و آلاینده‌گی بهتر موتور نسبت به سایر نانو سوخت‌ها و سوخت دیزل خالص گردید.
 - ۵- به‌طور کلی نانوذرات اکسید سریم منجر به افزایش ۱۴/۵ درصدی توان و نیز کاهش ۶ درصدی مصرف سوخت و ۳۴ درصدی آلاینده دوده در مقایسه با سوخت دیزل خالص گردید. تنها نکته منفی آن، افزایش ۳۱ درصدی آلاینده اکسیدهای نیتروژن می‌باشد که می‌توان آن را با مبدل‌های کاتالیزوری، EGR و غیره، کاهش داد.
- ۷- مراجع**
1. Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani, A., and Esfandeh, S. "Improving Engine Oil Lubrication in Light-duty Vehicles by using of Dispersing MWCNT and ZnO Nanoparticles in 5W50 as Viscosity Index Improvers (VII)", *Appl. Therm. Eng.* Vol. 143, pp. 493-506, 2018.
 2. Hemmat Esfe, M., Esfandeh, S., and Hosseinzadeh, E. "Nanofluid Flooding in a Randomized Heterogeneous Porous Media and Investigating the Effect of Capillary Pressure and Diffusion on Oil Recovery Factorx", *J. Mol. Liq.* Vol. 320, 113646, 2020.
 3. Hemmat Esfe, M., Esfandeh, S., and Hosseinzadeh, E. "Nanofluid Flooding for Enhanced Oil Recovery in a Heterogeneous Two-dimensional Anticline Geometry", *Int. Commun. Heat Mass Transf.* Vol. 118, 104810, 2020.
 4. Hemmat Esfe, M., Hosseinzadeh, E., and Esfandeh, S. "Flooding Numerical Simulation of Heterogeneous Oil Reservoir using Different Nanoscale Colloidal Solutions", *J. Fluid. Mech. Aerodyn.* Vol. 302, 111972, 2020.
 5. Bazdidi Tehrani, F., Sharifi Sedeh, E., and Abedinejad, M. S. "Analysis of the Influence of Alumina Nanoparticles Addition on Diesel Fuel Droplets Evaporation in the Gas Turbine Model's Combustion Chamber", Vol. 9, pp. 101-111, 2021. (In Persian)

- Characteristic of a Six-cylinder Diesel Engine using Response Surface Methodology”, *Energy Convers. Manag.* X11: 100091, 2021.
28. Shi, J. P., Harrison, R. M., and Brear, F. “Particle Size Distribution From a Modern Heavy Duty Diesel Engine”, *Sci. Total Environ.* Vol. 235, pp. 305-317, 1999.
 29. Mewes, D., and Mayinger, F. “Heat and Mass Transfer, part: Mixture Formation in Internal Combustion Engines”, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg GmbH: Germany, 2008.
 30. ICE Physics and Chemistry. “AVL FIRE CFD Solver v.2009. 1”, 2009.
 31. Part: Spray. “AVL FIRE CFD Solver v.2009. 1”, 2009.
 32. Patterson, M. A., and Reitz, R. D. “Increased Hot-plate Ignition Probability for Nanoparticle Diesel Fuel”, *Nano Lett.* Vol. 8, pp. 1410-1416, 2008.
 33. Naber, J. D., and Reitz, R. D. “Modeling Engine Spray/wall Impingement”, SAE, Paper NO. 880107, 1988.
 34. Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H. “On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion”, Sixteenth Int. Symp. Combust. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1977.
 35. Huang, H., and Su, W. “A New Reduced Chemical Kinetic Model for Autoignition and Oxidation of Lean N-heptane/air Mixtures in HCCI Engines”, SAE, Paper 2005-01-0118, 2005.
 36. Lu, T., and Law, C. “Linear Time Reduction of Large Kinetic Mechanism with Directed Relation Graph: N-heptane and Iso-octane”, *Combust. Flame*, Vol. 144, pp. 24-36, 2006.
 37. Lu, T., and Law, C. “Strategies for Mechanism Reduction for Large Hydrocarbons: N-heptane”, *Combust. Flame*, Vol. 154, pp. 153-163, 2008.
 38. Halstead, M., Kirsch, L., and Quinn, C. “The Auto Ignition of Hydrocarbon Fueled at High Temperatures and Pressures-fitting of a Mathematical Model”, *Combust. Flame*. Vol. 30, pp. 45-60, 1977.
 39. Dukowicz, J. K. “A Particle-fluid Numerical Model for Liquid Sprays”, *J. Comput. Phys.* Vol. 1, pp.313-326, 1970.
 40. Lavoie, G. A., Heywood, J. B., and Keck, J. C. “Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines”, *Combust. Sci. Technol.* Vol. 47, pp. 61-69, 2010.
 41. Hiroyasu, H., and Nishida, K. “Simplified Three-dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a DI Diesel Engine”, SAE Paper: 890269, 1989.
 - A. V., Hunashyal, A. M., and Ayachit, N. H. “Experimental Investigation on Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Graphene, Silver and Multiwalled Carbon Nanotubes-biodiesel Blended Fuels”, *Automot. Eng. Technol.* Vol. 3, pp. 129-138, 2014.
 19. Zha, M. “Effect of Particle Size on Reactivity and Combustion Characteristics of Aluminum Nanoparticles”, *Combust. Sci. Technol.* Vol. 187, pp. 1036-1043, 2015.
 20. Ashok, B., Nanthagopal, K., Mohan, A., Johny, A., and Tamilarasu, A. “Comparative Analysis on the Effect of Zinc Oxide and Ethanox as Additives with Biodiesel in CI Engine”, *Energy.* Vol. 140, pp. 352-364, 2017.
 21. Ghareghani, A., Mirsalim, M., and Hosseini, R. “Effects of Waste Fish Oil Biodiesel on Diesel Engine Combustion Characteristics and Emission”, *Renew. Energy.* Vol. 101, pp. 930-936, 2017.
 22. Hosseini, S. H., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B., and Abbaszadeh-Mayvan, A. “Performance and Emission Characteristics of a CI Engine Fuelled with Carbon Nanotubes and Diesel-biodiesel Blends”, *Renew. Energy* Vol. 111, pp. 201-213, 2017.
 23. Sivakumar, M., Sundaram, N. S., and Thasthagir, M. H. S. “Effect of Aluminium Oxide Nanoparticles Blended Pongamia Methyl Ester on Performance, Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine”, *Renew. Energy.* Vol. 116, pp. 518-526, 2018.
 24. Hoseini, S. S., Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Ebadi, M. T., and Yusaf, T. “Novel Environmentally Friendly Fuel: The Effects of Nanographene Oxide Additives on the Performance and Emission Characteristics of Diesel Engines Fuelled with Ailanthus Altissima Biodiesel”, *Renew. Energy.* Vol. 125, pp. 283-294, 2018.
 25. Elahi, M., Soudagar, M., Nik-Nazri NikGhazali, N. N., Abul Kalam, M., Badruddin, I. A., Banapurmath, N. R., and Akram, N. “The Effect of Nano-additives in Diesel-biodiesel Fuel Blends: A Comprehensive Review on Stability, Engine Performance and Emission Characteristics”, *Energy Convers. Manag.* Vol. 178, pp. 146-177, 2018.
 26. Khan, S., Dewang, Y., Raghuwanshi, J., Shrivastava, A., and Sharma, V. “Nanoparticles as Fuel Additive for Improving Performance and Reducing Exhaust Emissions of Internal Combustion Engines”, *Int. J. Environ. Anal. Chem.* doi: 10.1080/03067319.2020.1722810, 2020.
 27. Ghanbari, M., Mozafari-Vanani, L., Dehghani-Soufi, M., and Jahanbakhshi, A. “Effect of Alumina Nanoparticles as Additive with Diesel-biodiesel Blends on Performance and Emission

47. Nano Science and Technology Consortium A105, Level-III, Sector 63. Noida UP. INDIA 201301, 2010.
48. Senthil kumar, J., Ramesh Babu, B. R., and Gagan, R. "Emission Examination on Nanoparticle Blended Diesel in Constant Speed Diesel Engine", *Pet. Sci. Technol.* doi.org/10.1080/10916466.2019.1683579, 2019.
49. Saxena, V., Kumar, N., and Saxena, V. K. "A Comprehensive Review on Combustion and Stability Aspects of Metal Nanoparticles and Its Additive Effect on Diesel and Biodiesel Fuelled CI Engine", *Renew. Sust. Energ. Rev.* Vol. 70, pp. 563-588, 2017.
50. D'Silva, R., Binu, K. G., and Bhat, T. "Performance and Emission Characteristics of a CI Engine Fuelled with Diesel and Nanoparticles as Fuel Additive", *Mater. Today: Proc.* Vol. 2, pp. 3728-3725, 2015.
42. Nagle, J. and Strickland Constable, R. F. "Oxidation of Carbon Between 1000-2000 C", *Proceedings of the Fifth Conference on Carbon*, New York: Pergamon, 1962.
43. Barbouchi, Z., and Bessrou, J. "Turbulence Study in the Internal Combustion Engine", *J. Eng. Technol.* Vol. 9, pp. 194-202, 2009.
44. Heywood, J. B. "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988.
45. Kuo, K., Risha, G. A., Evans, B. J., and Boyer, E. "Potential Usage of Energetic Nano-sized Powders for Combustion and Rocket propulsion", *Material Res. Society Symp.* Published online by Cambridge University Press, 2003.
46. Aberoumand, S., Jafarimoghaddam, A., Moravej, M., Aberoumand, H., and Javaherdeh, K. "Experimental Study on the Rheological Behavior of Silver-heat Transfer Oil Nanofluid and Suggesting Two Empirical Based Correlations for Thermal Conductivity and Viscosity of Oil Based Nanofluids", *Appl. Therm. Eng.* Vol. 101, pp. 372-362, 2016.