

بررسی میزان تشکیل دوده در اثر تغییر در زاویه شروع پاشش سوخت در موتور دیزل

هادی دستورانی*
کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد
hadi.dast@gmail.com

علی محمدیان
کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد
ali.mo988@gmail.com

محسن قاضی خانی
دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد
ghazikhani@um.ac.ir

* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۰۲ پذیرش نهایی مقاله: ۹۱/۱۲/۱۴

چکیده

مدیریت پاشش سوخت که شامل شکل پاشش و زمان بندی پاشش است، اثر مهمی بر عملکرد موتور بویژه شکل گیری آلاینده‌ها دارد. در این مطالعه از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی AVL Fire برای شبیه سازی شروع زمان پاشش سوخت در موتورهای دیزل و تأثیر آن بر میزان تولید دوده، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چه زاویه شروع پاشش به مکت بالا نزدیک شده بیشینه دوده تولید شده افزایش یافته است. همچنین مقدار دوده‌ای که در نهایت (بعد از مصرف شدن مقداری دوده) باقی می‌ماند نیز افزایش یافته است. چون با افزایش نسبت کربن به اکسیژن مقدار تشکیل دوده نیز افزایش می‌یابد، هر چه زاویه شروع پاشش به مکت بالا نزدیک می‌شود به علت افزایش فشار محفظه احتراق و همچنین زودتر شروع شدن احتراق (کم شدن مهلت اشتعال) مخلوط شدن سوخت و هوا ناقص بوده و بنابراین حجم مخلوط غنی زیاده‌تر شده که نتیجه‌اش شکل گیری دوده بیشتر است. بر این اساس درست است که از دیدگاه تشکیل دوده هر چه زودتر پاشش صورت گیرد بهتر است (دورتر از مکت بالا) ولی اگر متغیرهای دیگر مؤثر در عملکرد موتور مانند مهلت اشتعال، توان تولیدی و ... نیز در نظر گرفته شود به این نتیجه دست یافته می‌شود که تنها داشتن دوده کمتر نمی‌تواند مزیتی برای موتور باشد.

کلید واژه‌ها: تشکیل دوده، زاویه شروع پاشش، موتور دیزل، محفظه احتراق

۱- مقدمه

یکی از روش‌های کاهش ذرات معلق و سایر ترکیبات تولید شده در موتورهای دیزلی، بهبود عمل احتراق در داخل استوانه است. نخستین عامل مؤثر بر احتراق در این موتورها، سامانه تزریق سوخت است که در سامانه‌های جدید با افزایش فشار پاشش، گردافشانی هرچه بهتر سوخت و استفاده از مدیریت هوشمند در زمان و میزان پاشش، احتراق در این موتورها تکامل یافته است. همچنین طراحی مسیر ورودی هوا، طراحی اتاقک احتراق و سامانه تنفس هوا بر احتراق کامل در این موتورها تأثیر بسزایی دارد. بهینه‌سازی سامانه پاشش سوخت به عنوان یکی از راه‌های اساسی کاهش آلاینده‌های موتورهای دیزل سنگین و بهبود عملکرد، شناخته می‌شود. عوامل مؤثر دیگر در کاهش آلاینده‌های خروجی از دیزل‌ها، کیفیت و ترکیب سوخت است. اطلاعات موجود بیان‌گر آن است که کاهش متغیرهای سوخت (مثل گوگرد) و اجزای تشکیل دهنده سوخت (مثل آروماتیک‌ها و ترکیبات فزاد سوخت دیزل) و استفاده از مواد افزودنی می‌تواند اثر مطلوبی در کاهش هیدروکربن‌های نسوخته و ذرات معلق داشته باشد.

استفاده از تصفیه کننده و پالایند گازهای خروجی گازهای خروجی نیز روش مؤثری در کاهش آلاینده‌ها به شمار می‌رود. در حال حاضر چندین نوع از این وسایل موجود است که به عنوان مثال می‌توان مبدل‌های واکنشگر اکسیدکننده و تله‌های دود نام برد. با توجه به اهمیت آلاینده‌ها، نیاز به ابزارهای تحلیلی جدیدی در زمینه پدیده احتراق بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از این ابزارهای قدرتمند، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که به کمک آن می‌توان عملکرد موتور را پیش بینی کرد زیرا در موتورهای درون سوز جریان تراکم پذیر، درهم، ناپایدار، تناوبی و پویاست. رفتار فرآیند احتراق به شدت تحت تأثیر جزئیات پاشش سوخت قرار می‌گیرد که با فرآیند پیچیده تبخیر سوخت و جریان متراکم دو حالتی همراه است.

تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی اثر شکل و زمانبندی پاشش در انواع موتورهای دیزل انجام شده است. ویکمن^۱ تأثیر فشار قوی پاشش و شکل پاشش را بررسی کرد و نتیجه گرفت که شکل پاشش نزولی قابلیت کاهش شکل‌گیری دوده را دارا است [۱]. دسانتس^۲ اثر تغییرات شکل و نرخ پاشش را بر عملکرد و تولید آلاینده‌ها در موتور دیزل سنگین بررسی کرده است [۲]. جوارشکیان، پیروزپناه و قاسمی الگوهای مختلف تفکیک و تجزیه افشانه سوخت را شبیه‌سازی کرده و تأثیرات آن را بر احتراق و

عملکرد موتور بررسی کرده‌اند [۳].

موسیس^۳ و همکاران شبیه‌سازی سه بعدی احتراق در موتور دیزلی هیدرا^۴ را بر پایه احتراق سینتیکی و تعادلی و عکس برداری از محفظه با استفاده از KIVA-3 انجام داده‌اند [۴]. کریستوس^۵ و همکاران پاشش چندگانه بر اختلاط سوخت و هوا، تشکیل دوده و احتراق در موتور دیزلی را با استفاده از نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار KIVA-3V و فیلم برداری از شعله بررسی کردند [۵]. جعفرمدار و همکارانش فرایند احتراق و تولید آلاینده‌هایی مثل NOx و دوده را با ایجاد یک الگوی سه بعدی از موتور دیزل پاشش مستقیم در نرم افزار Fire مورد تحلیل قرار دادند [۶]. خانابازاده اثر شکل تاج سمبه روی فرایند احتراق و آلاینده‌ها را با استفاده از نرم افزار Fire مورد بررسی قرار داده است [۷].

دوگانه سوز کردن می‌تواند به صورت چشمگیری مقدار دوده را کاهش دهد تا بازده حرارتی در بارهای بیشینه در حد موتور دیزلی پایه قرار گیرد. در مقابل در بارهای کمینه، در موتور دوگانه‌سوز نسبت به موتور دیزلی پایه، مقدار بازده حرارتی ضعیف و مقدار آلاینده‌های هیدروکربن نسوخته و مونواکسیدکربن بیشتر است [۸].

در این تحقیق تأثیر تغییر در زاویه شروع پاشش سوخت روی شکل‌گیری آلاینده‌ها در موتور دیزل بخصوص دوده، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از نرم افزار محاسباتی Fire^۶ استفاده شده است.

۲- اساس تشکیل دوده

شکل اصلی ذرات دوده در سوخت دیزل کربن است. مرحله تشکیل آن با مولکول سوختی شامل ۱۲ تا ۲۲ اتم کربن و نسبت هیدروژن به کربن، از حدود ۲ شروع می‌شود و در پایان ذرات به قطر ۲۰ تا ۳۰ نانومتر می‌رسند که هر کدام شامل ۱۰۵ اتم کربن است. تشکیل دوده در احتراق دیزل در دمایی حدود ۱۰۰۰ تا ۲۸۰۰ کلوین و فشاری حدود ۵۰ تا ۱۰۰ اتمسفر حتی با هوایی بیش از آنچه برای سوختن کامل نیاز است، می‌تواند صورت پذیرد. پراکندگی ذرات جامد در گاز به وسیله مقدار خالص حالت چگال تعیین می‌شود که اغلب با F_p مشخص می‌شود. F_p کسر حجمی دوده تشکیل شده در واحد حجم گازهای خروجی است. تعداد ذرات دوده در واحد حجم گازهای خروجی با N مشخص می‌شوند و اندازه ذرات با قطر متوسط d مشخص می‌شود.

3- E. Moses

4- Hydra

5- Christos

6- CFD Workflow Manager

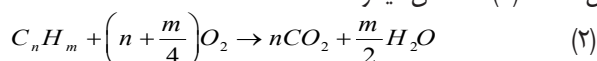
1- Wickman

2- Desantes

به هم می‌چسبند و تعداد ذرات در واحد حجم خروجی کاهش می‌یابند و در صورتی که کسر حجمی ثابت می‌ماند [۹].

۳- فرآیند تشکیل دوده

تحت شرایط مطلوب احتراق سوخت‌های هیدروکربنی H_2O و CO_2 تشکیل می‌شود. مقدار اکسیژن مورد نیاز برای واکنش احتراق درست طبق معادله (۲) مشخص می‌شود:



مقدار واقعی اکسیژن در دسترس برای احتراق به وسیله نسبت هوای در دسترس λ یا غنا ϕ بیان می‌شود که نسبت λ و ϕ بدین صورت است:

$$\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{O_{2,st}}{O_2} \quad (3)$$

شرایط $\phi > 1$ ظرفیت بزرگی برای تشکیل دوده دارد. مطالعه شعله‌های پیش آمیخته نشان می‌دهد که مولکول‌های سوخت به اجزاء اصلی‌شان که عمدتاً استیتیلن است تجزیه می‌شوند سپس این جزء اصلی دو بعدی به وسیله واکنش‌های شیمیایی رشد می‌کند و استیتیلن و اتم هیدروژن افزایش می‌یابد. در مرحله بعدی مولکول‌ها سه بعدی می‌شوند و در اثر انعقاد ذرات هیدروکربنی تشکیل می‌شوند و بعد از تبدیل جامد-گازی ذرات دوده رشد می‌کنند.

۴- متغیرهای موثر در شکل‌گیری دوده

در شرایط سوخت زیاد و دمای گرم سوخت‌های هیدروکربنی تمایل شدیدی دارند که به شکل ذرات کربن‌دار (دوده) در بیایند. معمولاً تحت شرایط کاری موتور، در مراحل اولیه فرآیند احتراق، به علت اکسایش، دوده وجود ندارد. این مکان در محفظه احتراق به عنوان مکان پراکسیژن بدر چرخه موتور در نظر گرفته می‌شود.

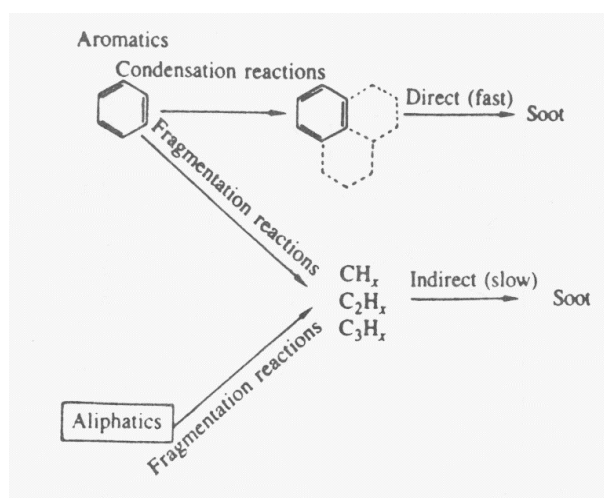
پیدااست که تشکیل دوده در مقایسه با تبدیل هیدروکربن و اجزاء چربی‌دار که درگیر تعداد کمی از اتم‌های کربن می‌باشند، نتیجه فرآیندهای خیلی پیچیده که درگیر هزارها واکنش و گونه‌های اصلی می‌باشد. اکسایش در اصل به علت حمله اتم اکسیژن به ذرات کربن‌دار در شرایط دمایی گرم اتفاق می‌افتد [۱۰].

با وجود پیچیدگی فرآیندهای مورد نظر واکنش‌های منحصر به فرد شرکت کننده در تشکیل دوده و شرح اکسایش می‌تواند به متغیرهای

$$F_v = \frac{\pi}{6} N d^3 \quad (1)$$

مراحل تشکیل دوده بدین شرح است:

تشکیل ذرات دوده: وقتی مواد حالت چگال از مولکول‌های سوخت، از طریق سوختن و سپس تجزیه شیمیایی در اثر حرارت‌گیری (پیرولیز) به وجود آمدند، این محصولات شامل هیدروکربن‌های غیر اشباع گوناگون مانند استیتیلن (C_2H_2) و هیدروکربن‌های مشابه بزرگتر ($C_{2n}H_2$) و هیدروکربن‌های پلی چرخه یک آروماتیک که عبارت از ترکیبات هیدروکربن اشباع حلقوی به هم چسبیده، می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱ الگو تشکیل دوده از ترکیبات هیدروکربن‌های حلقوی و غیر حلقوی [۹]

این دو نوع هیدروکربن بیشترین ماده تشکیل دهنده دوده در شعله‌ها در نظر گرفته می‌شوند. اولین ذرات دوده قابل تشخیص از واکنش‌های متراکم حالت گازی کربن ظاهر می‌شوند. (اولین حالت گازی کربن را که به جامد تغییر حالت می‌دهد nuclei می‌نامند) این ذرات اولیه خیلی کوچکند، ($d < 2 \text{ mm}$) که به تشکیل دوده به وسیله به هم ملحق شدن کمک می‌نمایند [۹].

رشد ذرات: که شامل رشد سطحی، انعقاد و تجمع می‌شود. رشد سطحی که در آن توده‌ای از مواد حالت جامد به وجود می‌آیند، حاصل پیوستن گونه‌های حالت گاز به سطوح ذرات است که پس از پیرولیز تبدیل به حالت جامد شده و با یکدیگر پیوند می‌خورند [۹].

واکنش‌های رشد سطحی مقدار دوده را افزایش می‌دهند اما تعداد ذرات بدون تغییر باقی می‌ماند. روش دیگری که در باره به هم پیوستن حالت جامد کربن صورت می‌گیرد، انعقاد است. در این روش ذرات بزرگ

H_2O وجود دارد. تشکیل دوده در نسبت C/O بحرانی شروع می‌شود:

$$\left(\frac{C}{O}\right)_{st} < \left(\frac{C}{O}\right)_{cr} < 1 \quad (5)$$

نسبت C/O بحرانی به دما بستگی دارد و تا دمای ۱۵۰۰ کلونین بشدت کاهش می‌یابد و در دماهای گرمتر از ۱۵۰۰ کلونین به صورت تقریباً خطی با دما افزایش می‌یابد. نسبت C/O در دماهای خنک‌تر از ۱۵۰۰ کلونین با افزایش فشار از ۱ تا ۱۰ اتمسفر، کاهش می‌یابد. این بدین معنی است که تشکیل دوده از نواحی سوخت غلیظ شروع می‌شود. با کاهش نرخ جریان جرم سوخت و یا هوا نسبت C/O بحرانی نیز کاهش می‌یابد و دلیل آن دمای گرمتر ناشی از سرعت جریان کندتر می‌باشد. به طور کلی مشاهده می‌شود که برای نسبت‌های C/O کوچک مقدار گونه‌های O و OH افزایش می‌یابد و دلیل آن نرخ اکسایش بزرگ است بنابراین غلظت نمونه‌ها و مقدار دوده به مقدار زیادی کاهش می‌یابد [۱۳].

۴-۳- تأثیر دما

دما یکی از متغیرهای اصلی مؤثر در فرآیند تشکیل دوده است. مشاهده شده است که با افزایش دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا نرخ تشکیل دوده افزایش می‌یابد و این به علت افزایش تجزیه حرارتی است که نمونه‌هایی مثل اسپیتیلن و بوتادین تولید می‌کند [۱۴].

۴-۴- تأثیر فشار

رشد سطح در فرآیند تشکیل دوده به وسیله افزایش هیدروکربن و اسپیتیلن انجام می‌شود. با افزایش فشار، نرخ رشد سطح افزایش می‌یابد در حالی که غلظت اسپیتیلن کاهش می‌یابد [۱۴].

۴-۵- تأثیر زمان ماندگاری سوخت

زمان ماندگاری بر فرآیندی که فرآیند تشکیل دوده را محدود می‌کند، اثر می‌گذارد. غلظت دوده در شعله‌های نفوذی آشفته، آشفته‌گی مهار شده است. نرخ مخلوط آشفته بزرگتر از نرخ واکنش شیمیایی است در این مورد غلظت دوده با زمان ماندگاری افزایش می‌یابد [۱۵].

۵- مراحل شبیه سازی

موتوری که برای تحلیل با استفاده از نرم افزار AVL Fire انتخاب شده است، موتور OM 355 می‌باشد که به عنوان مثال در اتوبوس‌ها نیز به کار رفته است. برخی از مشخصات این موتور در جدول ۲ آورده شده است.

شناخته شده‌ای از قبیل کسر جرمی سوخت، فشار جزئی اکسیژن، دمای شعله و شدت اغتشاش بستگی داشته باشد [۱۱].

اصلی‌ترین و مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در تشکیل دوده رقت (نسبت هوا به سوخت) محلی (نسبت C/H و C/O)، دما، فشار و زمان ماندگاری سوخت در احتراق می‌باشد که در ادامه به آنها می‌پردازیم.

۴-۱- تأثیر نسبت کربن به هیدروژن (C/H)

بیان یک وابستگی دقیق بین تشکیل دوده و ترکیب سوخت امکان پذیر نیست. شکل شیمیایی اجزاء سوخت بر طبق ساختار مولکولی‌شان به صورت جدول ۱ طبقه بندی می‌شوند [۱۲]:

جدول ۱ شکل شیمیایی اجزاء سوخت

$C_n H_{2n+2}$	.
$C_n H_{2n}$	.
$C_n H_{2n-2}$	.
..	.

تمایل تشکیل دوده از طرف پارافین‌ها (آلکان‌ها) به طرف هیدروکربن‌های آروماتیک افزایش می‌یابد. علاوه بر این تشکیل دوده و اکسایش وابستگی شدید به شدت محلی واکنش دهنده‌ها دارد. بنابراین تأثیر C/H روی تشکیل دوده در شعله پیش آمیخته و شعله نفوذی متفاوت است:

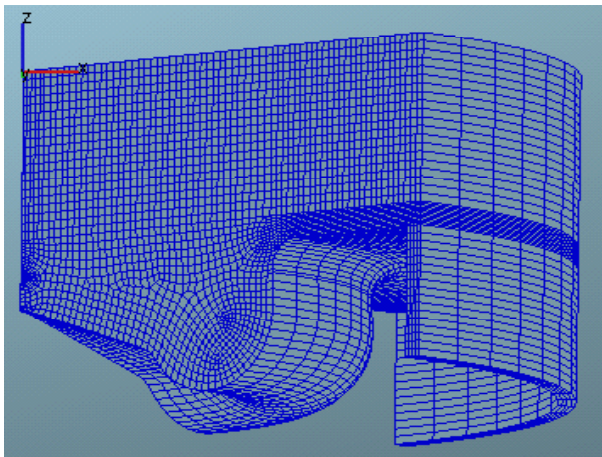
شعله نفوذی: نفتالین < بنزن < اسپیتیلن < آلکن < پارافین
شعله پیش آمیخته: نفتالین < بنزن < پارافین < آلکن < اسپیتیلن
غنا (φ) و دما تأثیر زیادی روی رفتار اسپیتیلن دارد.

۴-۲- تأثیر نسبت کربن به اکسیژن (C/O)

از لحاظ نظری اگر یک اتم اکسیژن برای هر اتم کربن وجود داشته باشد (نسبت C/O یک باشد)، دوده تولید نمی‌شود و طی فرآیند احتراق CO و H_2 تشکیل می‌شود. در حالت احتراق درست H_2O و CO_2 تشکیل می‌شود و نسبت C/O احتراق درست بدین صورت به دست می‌آید:

$$\left(\frac{C}{O}\right)_{st} = \frac{n}{2n + m/2} \quad (4)$$

در شعله نفوذی اختلاف زیادی در نسبت C/O محلی وجود دارد. در شعله پیش آمیخته یک تعادل شیمیایی بین گونه‌های H_2 ، CO_2 ، CO و



شکل ۳ شبکه بعد از ۱۲۰ درجه حرکت میل لنگ

۶- الگوهای محاسباتی

روش حجم محدود در دینامیک سیالات محاسباتی برای وصف رفتار ماده در برخورد با محیط اطراف بر اصول کلی بقا برای ویژگی‌های آن ماده متکی می‌باشد. این قوانین هم در جامدات و هم در سیالات به کار می‌روند. هر چند فرمولاسیون اصلی قوانین بقا برای یک جرم ثابت مفیداند (دیدگاه لاگرانژی)، برای وصف جریان سیال از حجم محاسباتی (دیدگاه اویلری) استفاده می‌شود. یک استنباط کلی از روش حجم محاسباتی نیاز است تا انتقال حرارت جابه‌جایی ناشی از ورود و خروج جریان به حجم محاسباتی در نظر گرفته شود.

۶-۱- معادلات بقا

فرم تفاضلی مرسوم برای معادله بقا بدین صورت است:

$$\rho \frac{D\hat{\phi}}{Dt} = \rho \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial t} + \rho \hat{U}_j \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x_j} = \rho \hat{\gamma}_m + \frac{\partial \hat{\gamma}_A}{\partial x_j} \quad (6)$$

که در آن D/Dt مشتق مادی است.

معادلات مومنتوم (ناویر-استوکس): $\hat{\phi} = \hat{U}_i$

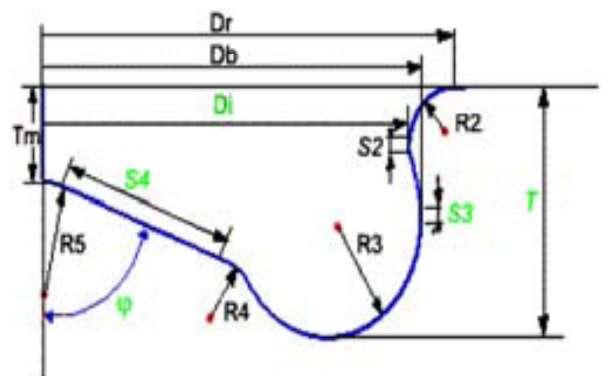
$$\rho \frac{D\hat{U}_i}{Dt} = \rho \frac{\partial \hat{U}_i}{\partial t} + \rho \hat{U}_j \frac{\partial \hat{U}_i}{\partial x_j} = \rho g_i + \frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} = \quad (7)$$

$$\rho g_i - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \hat{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{U}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \hat{U}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right]$$

جدول ۲ مشخصات موتور انتخابی

OM-355	
۶	•
۱۲۸ mm	•
۱۵۰ mm	•
۲۸۰ mm	•
۱۶:۱	•
۱۴۰۰ rpm	•
۴ × ۳,۱ mm	×

شکل سطح فوقانی سمبه یا به عبارت دیگر شکل محفظه احتراق، ω_1 در نظر گرفته شده است که در ادامه برخی از مشخصات این طرح آورده شده است. در شکل ۳ یک قطاع ۹۰ درجه از محفظه بالای تاج سمبه به صورت شبکه‌بندی شده نمایش داده شده است.



شکل ۲ نمایی از تاج سمبه ω_1

جدول ۳ مشخصات تاج سمبه ω_1

۹ mm	Tm
۸۶,۶۱ mm	Dr
۷۹,۲۱ mm	Db
۳,۸۵ mm	R2
۹ mm	R3
۴,۹۲ mm	R4
۵,۹۱ mm	R5
۰,۳۹ mm	S2
۱۱,۵۹ mm ³	•

$$\hat{\phi} = \hat{h} + \frac{\hat{U}}{2}$$

الگوی $k-\varepsilon$ شامل معادلات انتقال برای k و ε می‌باشد. معادله دقیق k از ضرب مقدار معادله انتقال برای سرعت نوسانی (Du/Dt) در خود سرعت نوسانی بدست می‌آید:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} \equiv \underbrace{\rho \frac{\partial k}{\partial t}}_L + \underbrace{\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_C = \underbrace{\rho \overline{f_i u_i}}_{\rho G} - \underbrace{\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}}_{\rho P} \quad (11)$$

$$- \underbrace{\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2}_{\rho \varepsilon} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho \overline{k u_j} - \overline{p u_i} \delta_{ij} \right)}_D$$

معادله $\rho Dk/Dt$ دینامیک انرژی جنبشی آشفتگی را توصیف می‌کند. L تغییر موضعی در زمان، C انتقال جابه جایی، P تولید k توسط تغییر شکل جریان (کار تنش‌های اغتشاشی مرتبط با تغییر شکل جریان) می‌باشد.

در الگوی $k-\varepsilon$ از معادله ε تامین می‌شود. نفوذ لزجت در شکل دقیق وارد عمل می‌شود اما برای جریان‌های با عدد رینولدز بزرگتر می‌تواند چشم پوشی شود (به جز در نزدیکی دیواره).

با استفاده از الگوی لزجت گردباده‌ها (متغیر P)، نیروهای حجمی یا نیروی جاذبه در الگوی لورنتز (G) و در نظر گرفتن نفوذ آشفتگی، الگوی $k-\varepsilon$ کامل برای جریان‌های با عدد رینولدز بزرگ بر روی یک حجم محاسبتی انتگرال گرفته می‌شود:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P + G - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \left(C_{\varepsilon 1} P + C_{\varepsilon 3} G + C_{\varepsilon 4} k \frac{\partial U_k}{\partial x_k} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right) \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (13)$$

$$P = -2\mu_t S : S - \frac{2}{3} [\mu_t (trS) + k] (trS) \quad (14)$$

$$G = - \frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} \nabla \rho \quad (15)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (16)$$

مقادیر استاندارد ضرایب نیز در جدول ۴ آمده است [۱۷].

$$\hat{\rho} \frac{D\hat{H}}{Dt} = \hat{\rho} \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial t} + \hat{U}_j \frac{\partial \hat{H}}{\partial x_j} \right) = \quad (8)$$

$$\hat{\rho} \hat{q}_g + \frac{\partial \hat{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\hat{c}_{ij} \hat{U}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \hat{T}}{\partial x_j} \right)$$

معادلات غلظت: $\hat{\phi} = \hat{C}$

$$\hat{\rho} \frac{D\hat{C}}{Dt} = \hat{\rho} \left(\frac{\partial \hat{C}}{\partial t} + \hat{U}_j \frac{\partial \hat{C}}{\partial x_j} \right) = \hat{\rho} \hat{r} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \hat{C}}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

۶-۲- الگوی فرآیند احتراق

فرآیند احتراق در این طرح به کمک الگوی ادی بریکاپ^۱ تحلیل شده است که یک الگو برای احتراق مهار شده مغشوش است. این الگو فرض می‌کند که در شعله آشفته پیش آمیخته واکنش دهنده‌ها در ریز گردباده‌های مشابهی محصورند و از ریز گردباده‌های شامل محصولات داغ جدا می‌شوند. نرخ تجزیه این ریز گردباده‌ها نرخ احتراق را مشخص می‌کنند.

$$\overline{\rho} \overline{r_{fu}} \frac{C_{fu}}{\tau_R} \overline{\rho} \min \left(\overline{y_{fu}}, \frac{\overline{y_{ox}}}{S}, \frac{C_{pr} \overline{y_{pr}}}{1+S} \right) \quad (10)$$

دو متغیر اول داخل کمان سمت راست کمیت محدود کننده را مشخص می‌کنند و متغیر سوم یک احتمال واکنش است که تضمین می‌کند که شعله در غیاب محصولات داغ منتشر نمی‌شود. معادله ده شامل سه ثابت است و C_{fu} در موتورهای دیزل از ۳ تا ۲۵ تغییر می‌کند [۱۶].

۶-۳- الگوی آشفتگی

الگوی $k-\varepsilon$ پرکاربردترین الگوی آشفتگی، بخصوص برای محاسبات صنعتی و استفاده در برنامه‌های دینامیک سیالات محاسباتی است و به صورت عددی برای بازه وسیعی از جریان‌ها شامل انتقال حرارت، احتراق، سطح آزاد و جریان‌های دوحالتی مفید است. با وجود نقاط ضعف فراوانی که در سه دهه اخیر کشف شده‌اند، به طور کلی الگوی $k-\varepsilon$ معمولاً پیش‌بینی‌های واقع بینانه‌تری از خواص متوسط جریان در بیشتر وضعیت‌ها به دست می‌دهد.

1- Eddy break-up

جدول ۴ مقادیر استاندارد ضرایب در الگوی k-ε

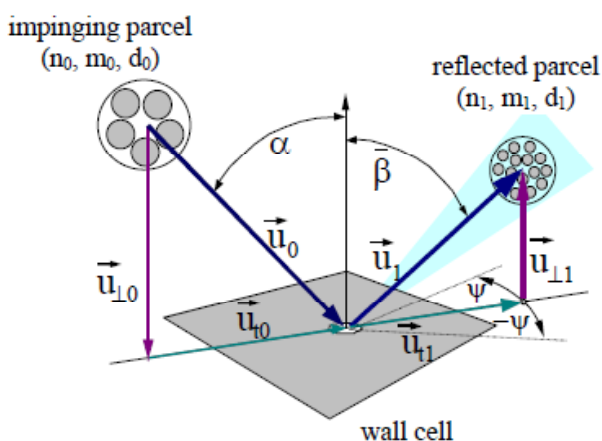
C_μ	$C_{\tau 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$	σ_k	σ_ε	σ_p
0.09	0.05	0.04	0.01	0.01	1.0	1.3	0.6

جریان غیرلزج این مقدار صفر فرض می‌شود [۱۸].

۶-۴-۲- الگوی برخورد با دیواره^۲

برای موتورهای دیزل با قطر استوانه کوچک، فاصله بین افشانه و تاج سمبه^۳ می‌تواند خیلی کوچک باشد تا حدی که بخش زیادی از سوخت وقتی به دیواره برخورد می‌کند، گردافشانی یا تبخیر نشود. این تأثیرات فرآیند احتراق و در نتیجه آلاینده‌های محصول، به عنوان یک احتراق ناقص در مجاورت دیواره، آلاینده HC و ذرات دوده^۴ زیادی نتیجه خواهند داد.

در الگوی walljet0/walljet1/walljet2 مبنای الگوی برخورد افشانه - دیواره نابر و ریتز می‌باشد. مفهوم این الگو این است که در شرایط کاری موتور یک لایه بخار زیر قطرات تشکیل می‌شود که باعث جهش یا لغزش آن‌ها در امتداد دیواره می‌شود. در الگوی به کار گرفته شده فوار سوخت مایع بسته به عدد وبر یکی از دو پیامد جهش یا انعکاس را تجربه می‌کند. معیار گذار بین این دو وضعیت با عدد وبر بحرانی مشخص می‌شود که آن را ۸۰ در نظر می‌گیرند.



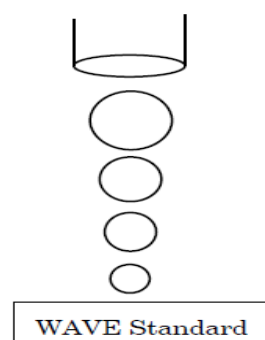
شکل ۵ برخورد قطرات با دیواره

در حالت walljet0 هیچ تجزیه‌ای بعد از برخورد به دیواره صورت نمی‌گیرد. زاویه انعکاس β بین صفر تا ۵ درجه تغییر می‌کند. این حالت زمانی که سرعت قطرات خیلی تند نیست و افشانه توسعه یافته است، نتایج خوبی به دست می‌دهد.

در حالت walljet1 قطر قطره بعد از برخورد با دیواره در هر دو محاسبه تابعی از عدد وبر می‌باشد. این وابستگی در ادامه نشان داده شده است:

۶-۴-۱- الگوی تجزیه موجی^۱

الگوی تجزیه موجی بیشتر برای به شمار آوردن تأثیرات برخورد افشانه به دیواره استفاده می‌شود. قطرات اولیه سوخت قطر سوراخ نازل را دارند و پاشش قطره‌ای نامیده می‌شوند. نرخ پراکندگی قطرات با معادله (۱۷) شبیه سازی می‌شوند که در آن A و Ω طول موج و نرخ رشد موج بوده و از مشخصات قطره و عدد وبر بحرانی هستند.



شکل ۴ خروج قطرات از دماغه، در الگوی wave

$$\tau = \frac{3.726 C_2 r}{\Lambda \Omega} \quad (17)$$

علاوه بر این شعاع قطره از معادله ۱۸ در شرایط پایدار تبعیت می‌کند.

$$\begin{aligned} r_{\text{stable}} &= C_1 \Lambda \\ r_{\text{stable}} &= \min \left\{ \left(\frac{3\pi^2 U}{2\Omega} \right)^{0.33}, \left(\frac{3r^2 \Lambda}{4} \right)^{0.33} \right\} \text{ when } C\Lambda > r \end{aligned} \quad (18)$$

ثابت $C2$ (بین ۵ تا ۶۰) مشخصه زمان تجزیه را تصحیح می‌کند و از یک افشانه تا افشانه بعدی تغییر می‌کند. مقدار کوچک‌تر آن زمان تجزیه را کاهش می‌دهد و معمولاً طول نفوذ را کاهش می‌دهد. برای موتور در دست تحلیل (OM355)، مقدار ۱۲ در نظر گرفته شده است.

ضریب دیگر مورد استفاده در نرم افزار برای نزدیک شدن به داده‌های آزمایشی $C1$ می‌باشد که مقدار آن ثابت و برابر با ۰/۶۱ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این دو ضریب، از ضریب $C3$ که برابر با یک است، برای به شمار آوردن تأثیرات لزجت سوخت نیز استفاده شده است. در

2- Spray wall interaction
3- Bowl

1- Wave break up

این متغیرها برای یک توزیع کسر مخلوط، نرخ اتلاف مقدار، دما و فشار محاسبه شده‌اند. منابع مختلف می‌توانند به مسئله اضافه شوند. بنابراین چهار متغیر سنجش معرفی می‌شوند. مقادیر مینا، یک در نظر گرفته می‌شوند. برای هر توزیع متغیر منبع کسر حجمی دوده یک عامل سنجش موجود است. عامل سنجش در انتگرال سطوح توزیع مختلف ضرب می‌شود. سطح انتگرال به طور کیفی تعیین می‌کند که توزیع متغیرهای منابع مختلف به متغیر منبع کسر حجمی دوده چقدر بزرگ است. نرخ اتلاف مقدار به توسط واریانس کسر مخلوط تعیین می‌شود

$$\tilde{\chi} = 2\tilde{Z}^2 \frac{\epsilon}{k} \quad (21)$$

معادله انتقالی برای کسر مخلوط به صورت (22) نوشته می‌شود

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{Z}^2}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Z}^2}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{Sc_{t,z}} \frac{\partial \tilde{Z}^2}{\partial x_j} \right) + 2 \frac{\mu_e}{Sc_{t,z}} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} - 2\tilde{\rho} \frac{\epsilon}{k} \tilde{Z}^2 \quad (22)$$

با واریانس کسر مخلوط

$$\tilde{Z}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (Z - \tilde{Z})^2 f(Z) dZ \quad (23)$$

و خود معادله انتقالی کسر مخلوط

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Z}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{Sc_{t,z}} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} \right) \quad (24)$$

کسر مخلوط مجموع جرم سوخت سوخته شده و نسوخته است بر کل جرم در سامانه [16].

$$Z = \frac{m_{fu} + m_{fb}}{m_{tot}} \quad (25)$$

۷- بحث و بررسی نتایج

۷-۱- مقایسه نتایج نرم افزار Fire با نتایج تجربی

برای اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار AVL Fire از داده‌های تجربی موجود در مرجع [7] استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از حل عددی شبیه‌سازی شده تطابق قابل قبولی با داده‌های تجربی دارد. شرایط عملکرد موتور، که تحت عنوان شرایط اولیه و مرزی به نرم افزار داده می‌شود، در ادامه آورده شده است.

$$\begin{aligned} We < 50 & \quad d_1 = d_0 \\ 50 \leq We \leq 300 & \quad d_1 = d_0 \times f(We_{\text{lin}}) \\ We > 300 & \quad d_1 = 0.2d_0 \end{aligned} \quad (19)$$

زاویه انعکاس β نیز بین صفر تا ۵ درجه تغییر می‌نماید. در حالت walljet2 قطر قطره بعد از برخورد با دیواره از معیارهای (20) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} We \leq 50 & \quad d_1 = d_0 \\ 50 < We \leq 300 & \quad d_1 = d_0 \times \left\{ 1 - \frac{(We_{\text{lin}} - 50)}{500} \right\} \\ We > 300 & \quad d_1 = 0.5d_0 \end{aligned} \quad (20)$$

زاویه انعکاس β در این حالت بین صفر تا ۱۸ درجه تغییر می‌کند. قابل ذکر است که حالات walljet1/walljet2 برای در نظر گرفتن تأثیر گردآفشانی در برخورد با دیواره می‌باشد. البته توجه شود که در این تحقیق در محاسبات با نرم افزار از حالت walljet1 استفاده شده است [18].

۶-۵- الگوی تبخیر سوخت

به طور کلی دو رویکرد متفاوت را می‌توان برای تبخیر ذرات سوخت به صورت تابعی از زمان در نظر گرفت. رویکرد اول به الگوهای غیردائم بر می‌گردد که در آن حالت مایع به صورت تات ذرات کروی شکل به همراه تغییرات خواص ترمودینامیکی در جهت شعاعی در نظر گرفته می‌شود. رویکرد دوم استفاده از الگوهای شبه پایدار است که خواص ترمودینامیکی ثابتی را برای کل حجم ذرات سوخت و لایه‌های مرزی اطراف آن‌ها در نظر می‌گیرند. در این الگوها برخلاف الگوهای دائم، انتقال حرارت هدایتی و جا به جایی از محیط اطراف ذرات سوخت به سطح این ذرات، علاوه بر تأمین انرژی تبخیر، دمای حالت مایع را نیز افزایش می‌دهد، که فرآیند اخیر باعث تبخیر حالت مایع از طریق جا به جایی و نفوذ می‌گردد. در کل این فرایندها شکل ذرات سوخت به صورت کروی باقی می‌ماند. الگوی تبخیر مورد استفاده در نرم افزار Dukowicz می‌باشد [18].

۶-۶- الگوی تشکیل و سوختن دوده ۱

این الگو متغیرهای منبع کسر حجمی دوده را به عنوان تابعی از نرخ اتلاف مقدار، دما و فشار در سمت اکسیدکننده محاسبه می‌کند. چهار بخش متفاوت برای متغیر منبع کسر حجمی دوده، (رشد سطحی، اکسایش، تشکیل ذرات و خرد شدن ذرات)، در نظر گرفته شده است.

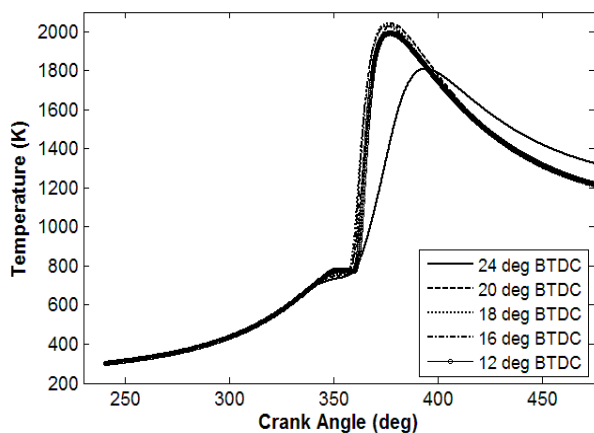
1- Soot

۱۶ BTDC	
۱۲۰ BTDC	
۱،۱ bar	
۳۰۱ K	
۱۴۰۰ rpm	
۳۵۳ K	
۱۱۶ ATDC	
۵۹۰ K	
۵۸۰ K	
۶۰۰ K	

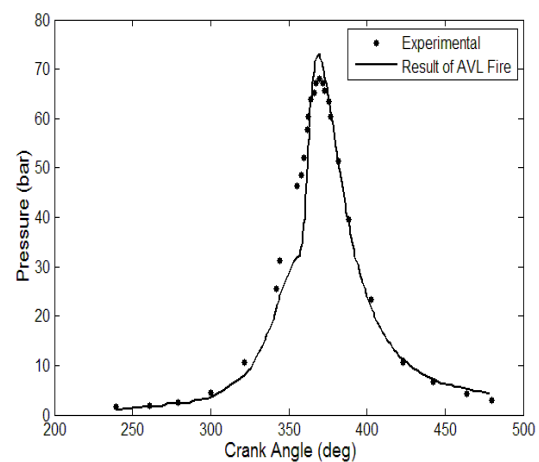
قرار گیری افشانه نیز باید در تمام موارد مشابه باشد. تنها تغییری که هر مرحله نسبت به قبل ایجاد می شود، زاویه شروع پاشش است البته چون با تغییر زاویه پاشش، زمان شروع احتراق هم تغییر می کند باید گام های پیشروی را در هر مرحله طوری تعیین کرد که در اطراف زوایای مربوط به احتراق تحلیل ها دقیق تر انجام شوند. برای مثال می توان این گام را در بازه مورد نظر برابر با ۰/۱ درجه حرکت میل لنگ در نظر گرفت. قابل ذکر است که در شکل های زیر نمودارهای مربوط به پاشش در ۱۲ درجه قبل از مکث بالا با نماد نقطه خط، رسم شده اند که به دلیل تعدد نقاط، در برخی بازه ها به صورت خط ضخیم دیده می شود.

در ادامه منحنی های تغییرات دما، فشار، جرم متوسط دوده و نرخ واکنش دوده بر حسب زاویه میل لنگ برای زوایای شروع پاشش سوخت ۳۳۶، ۳۴۰، ۳۴۲، ۳۴۴ و ۳۴۸ درجه میل لنگ رسم شده است.

در شکل های ۷ و ۸ به ترتیب دما و فشار بر حسب زاویه میل لنگ در زوایای مختلف شروع پاشش رسم شده است. دیده می شود که با نزدیک شدن زاویه شروع پاشش به مکث بالا بیشینه فشار و دما افزایش یافته است. تفاوت در منحنی راجع به پاشش در ۲۴ درجه قبل از مکث بالا با سایر منحنی ها در این است که چون در این حالت مخلوط نسبت به حالات دیگر کمتر متراکم شده و در نتیجه دما و فشار کمتری دارد، علاوه بر این که دیرتر به اشتعال می رسد، احتراق هم آهسته تر پخش می شود و لذا دما و فشار نهایی کمتر خواهد بود.



شکل ۷ منحنی تغییرات دما بر حسب زاویه میل لنگ برای زوایای مختلف شروع پاشش



شکل ۸ منحنی تغییرات فشار محفظه استوانه بر حسب زاویه میل لنگ، داده های تجربی و نتایج نرم افزار [۷] Fire

۷-۲- نتایج راجع به تشکیل دوده

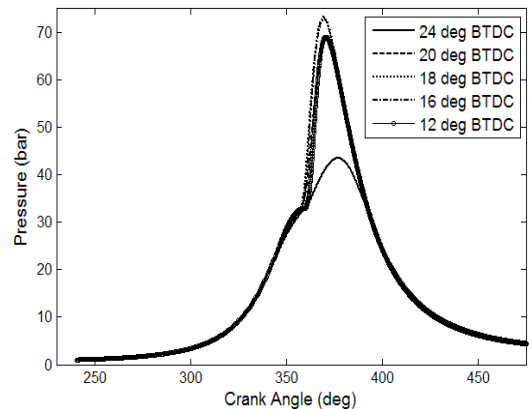
پس از این که شرایط اولیه و مرزی (دمای محیط، فشار محیط، دمای دیواره و ...) تعریف شد و معادلات حاکم در هر بخش مشخص گردید، می توان زاویه شروع و پایان پاشش سوخت را وارد نموده و تحلیل را آغاز کرد. البته برای این که بتوان فقط تأثیر زاویه پاشش سوخت را بر میزان تشکیل دوده بررسی کرد، باید در نظر داشت که در هر مرحله از تحلیل، برای زوایای مختلف پاشش، مقدار جرم سوخت پاشیده شده و طول زمان پاشش (۱۸ CA) نیز یکسان باشد. همچنین واضح است که سرعت موتور یا مواردی از قبیل محل افشانه، قطر سوراخ افشانه و نحوه

شکل‌های ۹ و ۱۰ بترتیب جرم متوسط دوده و نرخ واکنش دوده را برحسب زاویه میل‌لنگ برای زوایای مختلف پاشش سوخت نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با نزدیک شدن زاویه شروع پاشش به مکث بالا بیشینه دوده تولید شده افزایش یافته است همچنین مقدار دوده‌ای که در نهایت باقی می‌ماند نیز افزایش یافته است. (در بازه‌ای که نرخ واکنش دوده منفی است (شکل ۱۰) دوده در حال مصرف شدن است و تا زمانی که نرخ واکنش دوده صفر شود ادامه دارد). تشکیل دوده با فرآیندهای انعقاد، رشد سطح و تجزیه ذرات مرتبط است. با نزدیک‌تر شدن پاشش سوخت به مکث بالا، فشار و دمای اولیه و نهایی مخلوط افزایش می‌یابد که با تأثیر گذاشتن روی نرخ رشد سطح و تجزیه حرارتی ذرات، تمایل به تشکیل دوده را افزایش می‌دهد. پاشش دیرهنگام سوخت همچنین موجب ناقص مخلوط شدن سوخت و هوا می‌شود. مخلوط ناقص سبب افزایش غلظت محلی سوخت در برخی نقاط داخل استوانه می‌شود که موجب احتراق ناقص و افزایش تولید دوده می‌گردد.

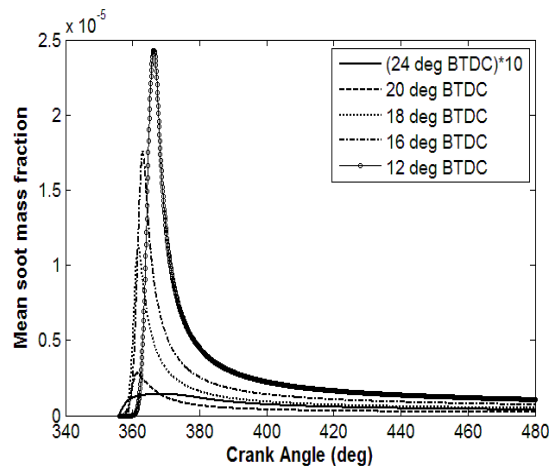
در ادامه جداولی برای مقایسه تغییرات دوده در زوایای پاشش مختلف آورده شده است. ستون اول از سمت چپ زوایایی را که در آن‌ها پاشش سوخت به داخل استوانه آغاز شده است نشان می‌دهد. ستون دوم نمایان‌گر زوایایی است که در آن‌ها مقدار دوده در داخل استوانه به بیشینه مقدار خود در طول یک چرخه کاری موتور می‌رسد. ستون سوم دما را در این زوایا نشان داده و در نهایت ستون چهارم نشان دهنده مقدار دوده وابسته به این زوایا می‌باشد. در جدول ۷ نیز مقدار دوده‌ای که در پایان چرخه کاری موتور باقی مانده و همراه گازهای خروجی خارج می‌گردد، و همچنین طول بازه‌ای را که در آن دوده تولید یا مصرف می‌شود، ارائه شده است.

جدول ۶ داده‌های برای مقایسه

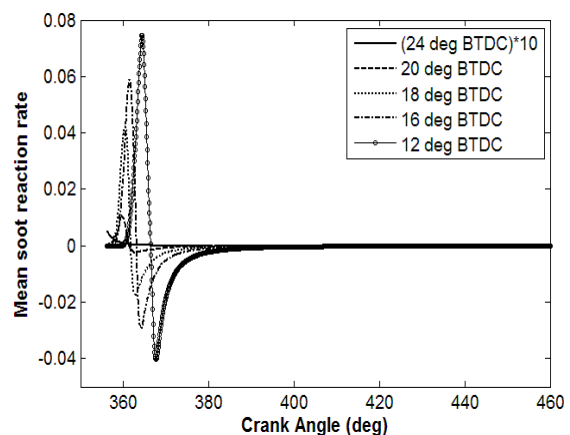
α	β	γ	δ
12°	16°	18°	20°
24°	20°	18°	16°
12°	16°	18°	20°
24°	20°	18°	16°



شکل ۸ منحنی تغییرات فشار محفظه استوانه بر حسب زاویه میل‌لنگ برای زوایای مختلف شروع پاشش



شکل ۹ منحنی تغییرات جرم متوسط دوده بر حسب زاویه میل‌لنگ برای زوایای مختلف شروع پاشش



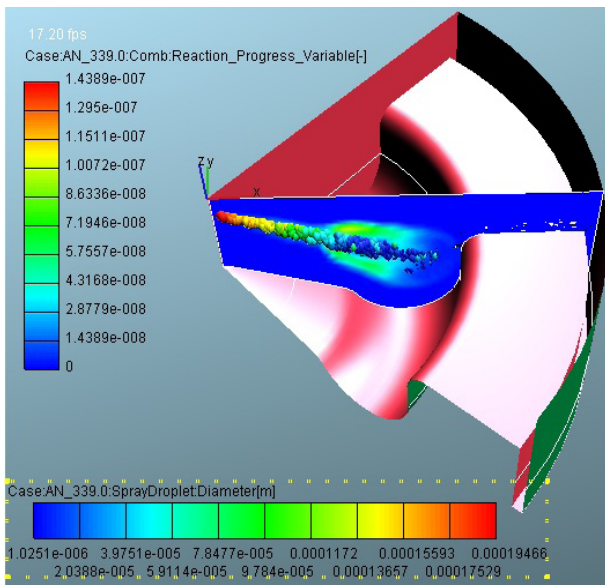
شکل ۱۰ منحنی تغییرات نرخ واکنش دوده بر حسب زاویه میل‌لنگ برای زوایای مختلف شروع پاشش

جدول ۷ داده‌های برای مقایسه

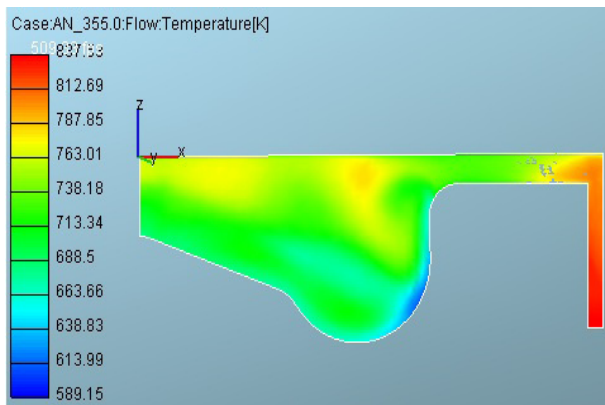
fl	L	fl	L	"
ēī	ēī*ēç ⁱ	ā		
ēēç	éēē*ēç ⁱ	ā		
ēēé	çìē*ēç ⁱ	ēé		
ēēē	çīī*ēç ⁱ	ēē		
ēēī	èēē*ēç ⁱ	ēç		

۷-۳- نمای برش خورده استوانه

شکلها وضعیت داخل استوانه را برای شروع پاشش سوخت در ۳۳۶ درجه میل لنگ نمایش می دهند. وضعیت دما و فشار و سایر متغیرهای موتور همانند جدول ۵ بوده و فقط زاویه شروع پاشش سوخت تغییر نموده است. شکل ۱۱ سرعت جریان هوا را در داخل استوانه در زاویه ۳۳۰ درجه میل لنگ و برحسب متر بر ثانیه نشان می دهد. شکل ۱۲ افشانه سوخت به داخل استوانه سه درجه بعد از شروع پاشش را نشان می دهد. قطر قطرات سوخت و پیشرفت واکنش احتراقی نیز بر روی این شکل به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱۲ افشانه سوخت به داخل استوانه سه درجه بعد از شروع پاشش

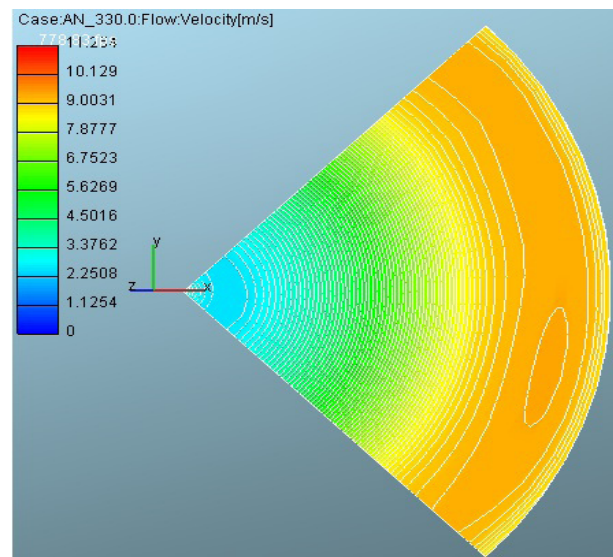


شکل ۱۳ دمای داخل استوانه یک درجه قبل از شروع احتراق

شکل ۱۳ توزیع دمای داخل استوانه را بر حسب کلویین نشان می دهد. نمای برش خورده راجع به وضعیت محفظه احتراق در ۵ درجه قبل از مکث بالا می باشد. شروع احتراق، شروع افزایش ناگهانی دما و آزادسازی انرژی در نظر گرفته شده است.

۷-۴- نتیجه گیری کلی

با توجه به نمودارهای قبلی مشخص است که هرچه فاصله پاشش سوخت تا مکث بالا زیادتر باشد مقدار دوده تولید شده کاهش می یابد که علت آن این است که مخلوط سوخت و هوا فرصت بیشتری دارد تا کامل تر مخلوط شود و چون هر چه مخلوط یکنواخت تر باشد حجم مخلوط غنی کمتر می شود پس مقدار دوده تولید شده کاهش می یابد.



شکل ۱۱ وضعیت سرعت جریان هوا در داخل استوانه در زاویه ۳۳۰ درجه میل لنگ بر حسب متر بر ثانیه

β	.....
$\dot{\gamma}_\alpha$	.....
ρ	.....
μ	.....
μ_t	.....
λ	.....
λ	.....
Λ	.....
ω	.....
Ω	.....
ϕ	.....
$\hat{\phi}$	.....
ε	.....
ε_{ij}	.....
σ_k	.....
σ_ε	.....
σ_p	.....
σ_x	.....
σ_{ij}	.....
δ_{ij}	.....
τ_R	.....
τ_{ij}	.....

از طرفی دیگر هر چه فاصله پاشش سوخت از مکث بالا بیشتر می‌شود مهلت اشتعال افزایش می‌یابد بنابراین درست است که از دیدگاه تشکیل دوده هرچه زودتر پاشش صورت گیرد بهتر است ولی اگر متغیرهای دیگر مؤثر در عملکرد موتور به مانند مهلت اشتعال، توان تولیدی و ... نیز در نظر گرفته شود، این نتیجه حاصل می‌شود که تنها داشتن دوده کمتر نمی‌تواند مزیتی برای موتور باشد.

فهرست علائم

C	.....
C_i	.....
C_{ei}	.....
C^μ	.....
C^{pr}	.....
C_{fu}	.....
D	.....
d	.....
d_l	.....
d_o	.....
G	.....
g	.....
H	.....
h	.....
K	.....
k	.....
CN	.....
n_R	.....
P	.....
q	.....
r	.....
$r^>$	.....
S	.....
T	.....
\hat{U}	.....
We	.....
y_{ox}	.....
y_{pr}	.....
y_{fu}	.....

فهرست علائم یونانی

α
----------	-------

References:

- [1] D.D. Wickman, K.V. Tanin, P.K. Senecal, R.D Reitz, K. Gebert, R.L. Barkhimer, N.J. Beck, Methods and results from the development of a 2600 bar diesel fuel injection system, SAE International, Paper No. 2000-01-0947, 2000
- [2] J.M. Desantes, J. Benajes, S. Molina, C.A. Gonzalez, The modification of the fuel injection rate in heavy-duty diesel engines, part 1: effects on engine performance and emissions, Journal of Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp. 2701-2714, 2004
- [3] M.H. Djavareshkian, V. Pirouzpanah, A. Ghasemi, Investigation of jet break-up process in diesel engine Spraymodelling, Second Conference of Iran Combustion, Mashhad, Issue code: CCI2116, 2008
- [4] E. Moses, K.K. Rao, D.E. Winterbone, 3D modeling and photographic investigation of combustion in hydra DI diesel engine, SAE International, Paper No. 1996-01-0836, 1996
- [5] A.C. Christos, D.N. Assanis, S. Kook, C. Bae, Effect of multiple injections on fuel- air mixing and soot formation in diesel combustion using direct flame visualization and CFD techniques, The ICES2005 ASME Internal Combustion Engine Division 2005 Spring Technical Conference, Chicago, IL, USA, April 5-7, 2005
- [6] S. Jafarmadar, R. Barzegar, S. Shafee, Three-dimensional modeling of combustion process, soot and NO_x formation in a direct-injection diesel engine, The Journal of Engine Research, Vol. 14, pp. 35-42, 2009
- [7] S. Jafarmadar, M. Khanbabazadeh, A computational study of the effects of combustion chamber geometries on combustion process and emission in a DI diesel engine, Journal of Fuel and Combustion, Vol. 1, No. 1, 2008
- [8] D.T. Hountalas, R.G. Papagiannakis, Development of a simulation model for direct injection dual fuel diesel-natural gas engines, SAE International, Paper No. 2000-01-0286, 2000
- [9] B.S. Hymes, H.G. Wagner, Soot Formation, Journal of Porgress in Energy combust Science, Vol. 7, pp. 299-273, 1981
- [10] J. Nagle, R.F. Strickland-Constable, Oxidation of Carbon between 1000-2000°C, Fifth Conference on Carbon, New York, Pergamon, 1962
- [11] R. Tatschl, K. Pachler, H. Fuchs, W. Almer, Multidimensional simulation of diesel engine combustion modeling and experimental verification, Fifth Conference The Working Process of the Internal Combustion Engine, Austria, Graz, 1995
- [12] C. Vovelle, J.L. Delfau, M. Reuillon, Formation of aromatic hydrocarbons in decane and kerosene flamesat reduced pressure, Soot formation in combustion: mechanisms and models, Springer Publication, 1994
- [13] H. Böhm, M. Bönig, CH. Feldermann, H. Jander, G. Rudolph, H.Gg. Wagner, Pressure dependence of formation of soot and PAH in premixed flames, Soot Formation in Combustion, Springer Publication, 1994
- [14] D. Böhm, H.Gg. Wagner, D. Hesse, H. Jander, B. Lüers, J. Pietscher, M. Weiss, The Influence of Pressure and Temperature on Soot Formation in Premixed Flames, 21th International Symposium on Combustion Conference, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1988
- [15] J.H. Kent, H.Gg. Wagner, Journal Combustion Science and Technology, Vol. 41, pp. 245-269, 1984
- [16] AVL Fire manual, Fire_v83_combustion.pdf
- [17] AVL Fire manual, Fire_v83_CFD_solver.pdf
- [18] AVL Fire manual, Fire_v83_spray.pdf

Evaluation of Changes in Soot Formation with Variation of Start Angle of Fuel Injection in Diesel Engine

H. Dastourani*

MSc. Student, Ferdowsi University of Mashhad
hadi.dast@gmail.com

A. Mohammadian

MSc. Student, Ferdowsi University of Mashhad
ali.mo988@gmail.com

M. Ghazikhani

Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
ghazikhani@um.ac.ir

*Corresponding Authors

Received: Dec. 22, 2013

Accepted in Revised Form: Mar. 04, 2013

Abstract

Controlling of the fuel injection, including the spray structure and injection timing has a significant impact on the engine performance, especially the formation of pollutants. In this study, a computational fluid dynamics software (AVL Fire) has been used to simulate the start time of the fuel injection in diesel engines and its effect on the soot formation rate. Results show that if the start angle of the fuel injection approaches the TDC, the maximum soot formed will be increased. Also, the amount of the remained soot is increased. Mixing of the fuel and the air cannot be completed as the start angle of the fuel injection gets closer to the TDC, because of increasing the combustion chamber pressure and so decreasing the ignition delay, as a consequent, the rich mixture volume increases and leads to more soot formations. Although that is better to the inject fuel earlier (far from the TDC), but considering other effective parameters on the engine performance, like the ignition delay, produced power, it has been concluded that lower soot formation can not be an advantage by itself.

Keywords: *formation, start angle of fuel injection, diesel engine, combustion chamber*