

شبیه‌سازی عددی عملکرد یک موتور دیزل پاشش مستقیم در

بارهای کامل و جزئی

وهاب پیروزپناه^۳
دانشکده مکانیک
دانشگاه تبریز

محمد مهدی دوستدار^۲
گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه امام حسین (ع)

جعفر غفوری^۱
گروه مهندسی مکانیک
واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۹/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۹/۱۶)

چکیده

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی جریان توأم با اسپری و احتراق در موتور دیزل پاشش مستقیم روی شبکه متحرک با سازمان انجام شده است. همه پدیده‌های مؤثر در عملکرد موتور، از قبیل پاشش، تبخیر، شکست و برخورد قطرات، برخورد قطرات به دیواره، انتقال حرارت به دیواره، احتراق و ... در نظر گرفته شده‌اند. پروسه احتراق به صورت سینتیک شیمیایی بوده و آثار آشفستگی بر اختلاط سوخت و هوا و نرخ واکنش شیمیایی ملحوظ شده است. مدلسازی عددی بر پایه استفاده از کد KIVA-3V که برخی تغییرات در کد اعمال شده، می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق ارائه مدل عددی موتور، پیشگویی پارامترهای عملکردی و آلودگی، نرخ آزاد سازی انرژی و بررسی تأثیر میزان بار ورودی بر عملکرد و آلودگی می‌باشد. برای رسیدن به این اهداف موتور دیزلی پاشش مستقیم OM355 با توربوشارژر در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج این شبیه‌سازی با نتایج تجربی حاکی از تطابق رضایت بخش است.

واژه‌های کلیدی: موتور دیزل، پاشش مستقیم، شبیه‌سازی عددی، بارهای کامل و جزئی

Numerical Simulation of a DI Diesel Engine in Full and in Partial Loads

J. Ghafouri
Mech. Eng. Group
Science & Research Branch
Islamic Azad Univ.

M. M. Doustdar
Mech. Eng. Group
Imam Hossain Univ.

V. Pirouzpanah
Mech. Eng. Dep't.
Tabriz Univ.

ABSTRACT

In this work, numerical simulation of flow with spray and combustion has been performed in a direct injection diesel engine. The grid was structured and all phenomena that affect the operation of a diesel engine, such as injection, evaporation, droplet collision, droplet impinging on walls, heat transfer to walls, combustion, etc were taken into account. The kinetic of combustion and the effects of turbulence on fuel-air mixture and on rate of reaction were considered. The KIVA-3V code (with some changes) was used for the computations. The prediction of performance factors, pollution and energy release rate, as well as the investigation of input load effects on performance and pollution were the main purpose of this work. The geometry and operation data of OM355 engine were introduced as input data and the results of simulation and experiment were compared, which were relatively close.

Key Words: Diesel Engine, Direct Injection, Numerical Simulation, Full and Partia Loads

۱- دانشجوی دکتری: Gh_jafar@yahoo.com

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): mdostdar@ihu.ac.ir

۳- استاد (مرحوم)

۱- مقدمه

سالیان زیادی است که موتورهای دیزلی به عنوان منبع تولید توان به دلیل راندمان بالاتر نسبت به موتورهای اشتعال جرقه‌ای در اکثر خودروهای سنگین و نیمه سنگین استفاده می‌شوند. بنابراین بهبود عملکرد و کاهش آثار زیست محیطی این موتورها در دستور کار و اهداف بیشتر مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی فعال در زمینه موتورهای احتراق داخلی در دنیا می‌باشد و محققان زیادی به تلاش در این راستا مبادرت نموده‌اند.

به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد جریان داخل این نوع موتورها، بهینه‌سازی عملکرد و کاهش آلودگی نیازمند فهم دقیق و شناسایی کامل پروسه‌هایی از قبیل پاشش، تبخیر، شکست و برخورد قطرات، برخورد قطرات به دیواره، انتقال حرارت به دیواره، احتراق و آثار آنها بر جریان گاز داخل موتور است. از طرف دیگر با توجه به کثرت عوامل مختلف موتور بررسی تأثیر همزمان همه این عوامل فقط با تکیه بر آزمایش موتور ممکن نبوده و مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی است. امروزه با پیشرفت سرعت کامپیوترها روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مرسوم به CFD نقش مهمی در شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف در زمینه سیالات، انتقال حرارت، احتراق و ... ایفا می‌کنند و سبب صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شوند. بنابراین در زمینه شبیه‌سازی موتورهای دیزلی نیز مدل‌سازی عددی که همه اتفاقات موتور را در برگیرد اجتناب ناپذیر است. با استفاده از شبیه‌سازی دقیق می‌توان، تأثیر عوامل مختلف را بر عملکرد و آلودگی بررسی نمود. محققان زیادی برای شبیه‌سازی پروسه‌های مختلف داخل موتور دیزل کارهای تحقیقاتی صورت داده‌اند که نتایج همه آنها را می‌توان در آخرین نسخه KIVA جست. آخرین ویرایش این کد KIVA-3V-MZ حاصل تلاش ۲۵ ساله آزمایشگاه ملی لوس آلاموس بوده و محققان بسیاری برای بهبود و توسعه قابلیت‌های این کد شبیه‌سازی مبادرت نموده‌اند. کد KIVA که به صورت برنامه فرتن است و امکان تغییر در متن اصلی آن وجود دارد به عنوان ابزاری بسیار سودمند برای شبیه‌سازی موتور است. محققان زیادی اقدام به شبیه‌سازی در زمینه موتورهای دیزلی به منظور بهبود عملکرد و کاهش آلودگی با استفاده از این کد نموده‌اند،

که هر یک با دیدگاه خاصی و به دنبال اهداف ویژه‌ای از این شبیه‌سازی‌ها بوده‌اند.

بیلاردینی^۱ و همکاران یک مدل برای احتراق و تشکیل دوده موتور دیزل در کد KIVA-II توسعه دادند [۱]. پاترسون^۲ و همکاران آثار مشخصه‌های پاشش را بر آلودگی اکسید نیتروژن (NO_x) و دوده در موتور دیزلی بررسی کردند [۲]. تتسو^۳ و همکاران در مرکز تحقیقات ایسوزو شبیه‌سازی عددی پروسه اختلاط اسپری در موتور دیزل را با استفاده از KIVA-II مطالعه کردند [۳]. تانر^۴ و همکاران مطالعه عددی تأثیر اسپری پیوسته و متناوب بر توزیع سوخت در موتور دیزل را ارائه کردند [۴]. موسیس^۵ و همکاران شبیه‌سازی سه بعدی احتراق در موتور دیزلی هیدرا^۶ را بر پایه احتراق سینتیکی و تعادلی و عکسبرداری از محفظه با استفاده از KIVA-3 انجام داده‌اند [۵]. جونس^۷ و همکاران در دانشگاه چالمرز با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی موتور با کد KIVA-3V پاشش چندگانه و اثر آن بر عملکرد را مطالعه کردند. در این شبیه‌سازی از مکانیزم سینتیکی هپتان نرمال برای احتراق سوخت دیزل استفاده گردید [۶]. بیلاردینی و بیرتولی^۸ مدل‌سازی عددی احتراق و تشکیل آلودگی در موتور دیزلی با فنلوری جدید پاشش فشار بالا را با استفاده از کد KIVA-II بررسی کردند [۷]. گالووچف^۹ و همکاران شبیه‌سازی سه بعدی اسپری در موتور دیزل را با استفاده از کد KIVA-3V انجام دادند. در این شبیه‌سازی مدل احتراقی بر پایه سینتیک شیمیایی و اندرکنش توربولانس استوار بود [۸]. فرآیند احتراق و تشکیل اکسیدهای نیتروژن و دوده در یک موتور دیزلی با سرعت متوسط با استفاده از شبیه‌سازی عددی بر پایه کد KIVA-II و اعمال تغییراتی در مدل احتراقی توسط تسکینین^{۱۰} ارائه شد [۹]. دانیل لی^{۱۱} و روتلاند^{۱۲} مدل‌سازی عددی موتور دیزل را با استفاده از کد KIVA-3V انجام

- 1- Belardini
- 2- Patterson
- 3- Tetsuo
- 4- Tanner
- 5- E. Moses
- 6- Hydra
- 7- Jonas
- 8- Bertoli
- 9- Golovitchev
- 10- Taskinen
- 11- Daniel Lee
- 12- Rutland

یکی دیگر از اهدافی که نویسندگان از این شبیه‌سازی دنبال می‌کنند، رسیدن به مدل مناسب برای شبیه‌سازی عملکرد موتور در حالت دیزل کامل است، که به عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی در شرایط عملکردی دوگانه سوز دیزل-گاز در کار آتی استفاده می‌نمایند.

۲- الگوریتم محاسباتی

محتویات داخل سیلندر موتورهای دیزلی پاشش مستقیم تحت تأثیر مجموعه‌ای از فرآیندهای پیچیده که در تقابل شیمیایی و فیزیکی با یکدیگر هستند، قرار می‌گیرد و همین امر سبب پیچیده شدن تحلیل عددی میدان جریان داخل این موتورها می‌شود. این فرآیندها شامل تبخیر گذرای سوخت در تقابل با مخلوط چند جزئی گاز در حال حرکت در اثر حرکت پیستون، احتراق، واکنش‌های شیمیایی در محیط مغشوش، انتقال حرارت و ... می‌باشند. در این تحقیق برای مدل‌سازی سه بعدی فرآیندهای داخل سیلندر از کد KIVA-3V که به صورت متن اصلی است و اعمال برخی تغییرات در آن استفاده می‌شود.

مدلسازی به کار رفته در کد KIVA مبتنی بر مدل اصطلاحاً قطره-جدا (DDM) است [۱۵]. در این مدل، فاز مایع به صورت بسته‌هایی از قطرات در میدان حل در نظر گرفته می‌شوند. هر بسته حاوی تعدادی قطره است. از روش لاگرانژی برای محاسبه سرعت و جا به جایی بسته‌ها و از روش اویلری برای حل میدان جریان فاز گازی استفاده می‌شود. برای تخمین خواص ذرات در محل پاشش و یا در پایین دست جریان، از تکنیک نمونه‌گیری مونت کارلو استفاده می‌شود.

برای فاز گاز معادلات بقای جرم را برای گونه‌های شیمیایی مخلوط، بقای ممنتوم و انرژی که هریک شامل چشمه‌های مناسب به واسطه اندرکنش ناشی از اسپری و احتراق می‌باشند، حل می‌کند. حل معادلات فاز گاز با تکنیک حجم محدود تغییر یافته به نام ALE بر پایه روش لاگرانژی-اولری است. فرآیند حل به چند مرحله تقسیم‌بندی می‌شود، در مرحله اول پدیده‌های مربوط به قطرات از قبیل شکست، برخورد و تبخیر محاسبه می‌شود. پس از انجام محاسبات اسپری عبارات چشمه فاز گاز محاسبه شده و معادلات فاز گاز مجدداً حل می‌شوند. این

دادند و با نتایج تست براساس مود-۶ مقایسه کردند. آنها از مدل تابع احتمال دانسیته برای احتراق استفاده کردند [۱۰]. تسکین آثار تشعشع از ذرات دوده را بر دمای شعله و انتقال حرارت در یک موتور دیزلی با سرعت متوسط با استفاده از شبیه‌سازی عددی بر پایه کد KIVA-II و اعمال تغییراتی در آن مطالعه نمود [۱۱]. ارتور^۱ و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی بر پایه کد KIVA-3V محفظه احتراق موتور دیزل پاشش مستقیم را بهینه‌سازی کردند. بهینه‌سازی براساس نتایج شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیکی استوار بود [۱۲]. کریستوس^۲ و همکاران آثار پاشش چندگانه بر اختلاط سوخت و هوا، تشکیل دوده و احتراق در موتور دیزلی را با استفاده از نتایج شبیه‌سازی توسط کد KIVA-3V و فیلم برداری از شعله بررسی کردند [۱۳]. سانجین^۳ و همکاران مدل‌سازی عددی جریان احتراقی در موتورهای دیزلی را به منظور پیشگویی آلودگی دوده در محدوده وسیعی از عملکرد بر پایه بکارگیری کد KIVA-3V انجام دادند. در این شبیه‌سازی از مکانیزم سینتیکی براساس زنجیر هپتان نرمال برای اشتعال و احتراق استفاده شد [۱۴]. ملاحظه می‌شود که محققان مختلف براساس اهداف مورد نظر موضوعات متعددی را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی موتور دیزل پاشش مستقیم به منظور شناسایی و مدل‌سازی فرآیندهای متعدد داخل موتور ارائه می‌شود. شبیه‌سازی بر پایه کد KIVA و اعمال تغییرات در برخی قسمت‌های برنامه مانند انتخاب گام زمانی برای کاهش زمان شبیه‌سازی و بالا بردن دقت و روش تولید شبکه محاسباتی انجام شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده است. برای این مقایسه، با توجه به در دسترس بودن اطلاعات تجربی موتور OM355، مشخصات هندسی و عملکردی این موتور مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه برای حصول اطمینان از پیش‌بینی‌های مدل در شرایط مختلف، اثر کاهش مقدار بار ورودی به موتور بر عملکرد و آلودگی (عملکرد موتور در بار جزئی) مطالعه شده است.

1- Arturo de Risi
2- Christos
3- Sangjin

برای احتراق یک مرحله‌ای سوخت دیزل بوده و معادلات (۲-۴) مکانیزم زلدویج برای تشکیل اکسید نیتروژن است. این چهار معادله به صورت سینتیکی ادامه می‌یابند و نرخ واکنش مطابق با روش آرنیوس محاسبه می‌شود. اما در مورد شش معادله دیگر با توجه به این که خیلی سریعتر از چهار معادله قبلی هستند، به صورت تعادلی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به این که اکسیداسیون سوخت به صورت یک مرحله‌ای انتخاب شده، مدل‌سازی نرخ واکنش‌ها حساسیت خاصی به ضریب به سمت جلو این واکنش دارد [۱۷].

جدول (۱): معادلات شیمیایی احتراق استفاده شده در شبیه‌سازی.

شماره	معادله
۱	$2C_{14}H_{30} + 32O_2 = 28CO_2 + 60H_2O$
۲	$O_2 + 2N_2 = 2N + 2NO$
۳	$2O_2 + N_2 = 2O + 2NO$
۴	$N_2 + 2OH = 2H + 2NO$
۵	$H_2 = 2H$
۶	$O_2 = 2O$
۷	$N_2 = 2N$
۸	$O + H = OH$
۹	$O_2 + 2H_2O = 4OH$
۱۰	$O_2 + 2CO = 2CO_2$

البته گفتنی است که آثار توربولانس بر احتراق یعنی سینتیک تحت کنترل اختلاط براساس مدل اتلاف ادی^۶ که توسط ماگنوسن^۷ و هجرتاگر^۸ ارائه شده در محاسبه نرخ واکنش ملحوظ می‌شود [۱۹].

۳- تولید شبکه، شرایط مرزی و اندازه قدم محاسباتی
 کد KIVA دارای یک پیش پردازنده K3PREP برای تولید شبکه است اما با توجه به این که تولید شبکه هندسه‌های پیچیده توسط آن دشوار است، در این تحقیق از روش دیگری برای تولید شبکه که برای هندسه‌های

پروسه تا همگرایی حل ادامه می‌یابد. حل گذرای معادلات به روش قدم‌زنی زمانی^۱ با استفاده از روش ضمنی مشابه سیمپل^۲ می‌باشد. برای مدل‌سازی آشفستگی از مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ ، که برخی تغییرات در آن برای در نظر گرفتن آثار انبساط حجمی و اندرکنش اسپری لحاظ شده، استفاده می‌شود. برای در نظر گرفتن آثار فاز گاز بر روی قطرات، نیروهای آیرودینامیکی فاز گاز به عنوان نیروی خارجی در نظر گرفته می‌شود. از دیدگاه هندسی نیز امکان شبیه‌سازی حرکت پیستون با استفاده از شبکه متحرک وجود دارد [۱۷-۱۶]. معادلات حاکم در مرجع [۱۵] به خوبی تشریح شده است که به علت طولانی بودن از ذکر آن خودداری می‌شود.

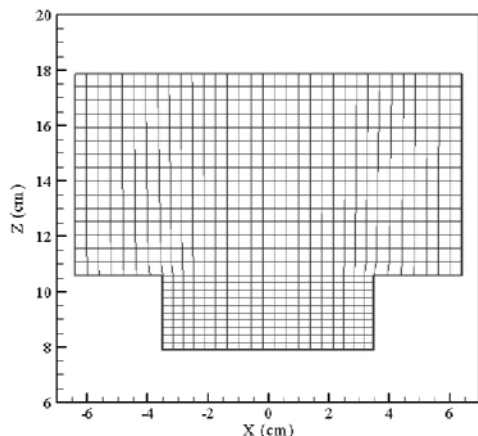
۲-۱- مدل‌سازی پاشش، شکست، تبخیر و برخورد قطرات
 در کد KIVA برای تحلیل نوسان و شکست قطرات، از مدل TAB^۳ استفاده می‌شود [۱۵]. در این مدل که براساس مقایسه بین نوسان قطره با نوسان یک سیستم ساده جرم و فنر استوار است، کشش سطحی به عنوان نیروی ارتجاعی فنر، لزجت به عنوان میراکننده و نیروهای آیرودینامیکی به عنوان نیروی خارجی تعبیر می‌شوند. همچنین در این کد رابطه فراسلینگ^۴ که رابطه‌ای نیمه‌تجربی است و آثار اختلاف دما، اختلاف غلظت و اختلاف سرعت را بر تبخیر قطرات در نظر می‌گیرد، برای محاسبه تبخیر قطرات استفاده می‌شود [۱۵]. مدل‌سازی برخورد قطرات در کد KIVA براساس مدل رورک^۵ شبیه‌سازی می‌گردد، در این مدل احتمال برخورد دو قطره، به کمک تابع توزیع پواسون محاسبه می‌شود [۱۸].

۲-۲- مدل‌سازی احتراق

در این مدل‌سازی، سوخت $C_{14}H_{30}$ به عنوان سوخت دیزل انتخاب شده است. پروسه احتراق به صورت سینتیک شیمیایی شامل ۱۰ معادله و ۱۲ گونه شیمیایی مدل‌سازی می‌شود. این معادلات در جدول ۱ ارائه شده‌اند. معادله (۱)

- 1- Time Marching
- 2- Simple
- 3- Taylor's Analogy Breakup Model
- 4- Frossling
- 5- Rourke

- 6- Eddy-Dissipation
- 7- Magnussen
- 8- Hjertager

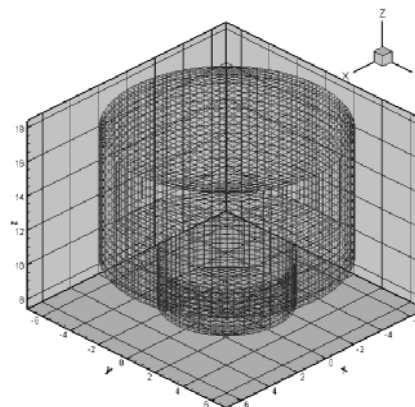


شکل (۳): مقطع طولی از شبکه تولید شده داخل موتور OM355

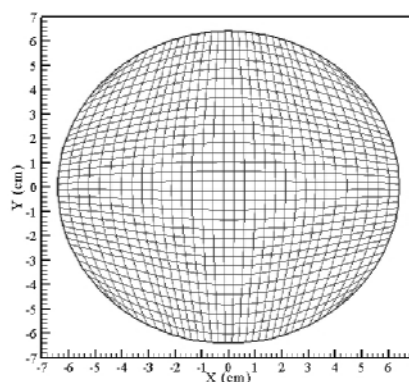
دیوارهای سیلندر و سرسیلندر به عنوان مرز جامد با شرط عدم لغزش و دیوارهای کاسه پیستون و تاج پیستون به عنوان دیواره متحرک که متناسب با سرعت میل‌لنگ به سمت بالا حرکت می‌کنند، تعریف می‌شوند. در تمامی مرزهای جامد از قانون دیواره آشفته به عنوان شرایط مرزی معادلات توربولانس $k - \epsilon$ استفاده می‌شود. اندازه اولیه هر یک از ذرات به هنگام پاشش به کمک تابع توزیع $X - squared$ و به روش استوکاستیک تعیین می‌شود [۱۵]. سرعت پاشش، درجه حرارت قطرات، موقعیت نازل‌ها و زاویه مخروط اسپری به عنوان داده‌های ورودی تعریف می‌شوند.

با توجه این که در روش عددی به کار رفته در KIVA عبارات دیفیوژنی به صورت ضمنی و عبارات جا به جایی نیز در تعدادی زیر قدم محاسبه می‌شوند، بنابراین اندازه قدم محاسباتی به واسطه شرط پایداری محدود نمی‌شود، اما تعدادی شرط دقت انتخاب اندازه قدم محاسباتی را محدود می‌نماید [۱۶]. برای رسیدن به دقت مناسب و حل سریعتر در این تحقیق، شرط دیگری نیز در زیر برنامه (سابروتین) قدم زمانی به کد KIVA اضافه شد. این شرط بدین صورت است که قبل از پاشش سوخت حل با قدم زمانی بزرگ انجام می‌شود و به محض شروع پاشش قدم زمانی کوچکتر می‌گردد، به طوری که بتواند معادلات دینامیک اسپری و سینتیک احتراق و ... با دقت بسیار خوبی حل شوند. پس از اتمام پاشش و توسعه احتراق دوباره اندازه قدم محاسباتی برای تحلیل مرحله انبساط

پیچیده نیز مناسب است استفاده شده است. پس از جستجوی کافی در زمینه تولید شبکه محاسباتی برای موتورهای احتراق داخلی و روش‌ها و ابزارهای متعدد، نرم‌افزار تولید شبکه ICFM-CFD برای تولید شبکه انتخاب و تهیه شد. این نرم‌افزار یکی از قویترین نرم‌افزارهای تولید شبکه است که قابلیت تولید شبکه برای همه نرم‌افزارها و کدهای دینامیک سیالات محاسباتی را دارا است. مدل سه بعدی موتور OM355 در محیط نرم‌افزار ایجاد و پس از شبکه‌بندی و معرفی دقیق شرایط مرزی فایل ورودی شبکه برای کد KIVA تهیه شد تا اطلاعات آن با کد فراخوانی شود. شبکه محاسباتی تولید شده داخل سیلندر موتور OM355 در شکل‌های ۱-۳ ارائه شده است.



شکل (۱): شبکه سه بعدی تولید شده داخل موتور OM355



شکل (۲): مقطع عرضی از شبکه تولید شده داخل موتور OM355

بعدی ارائه می‌گردد. مشخصات فنی موتور دیزلی پاشش مستقیم OM355 در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): مشخصات فنی موتور دیزلی OM355 [۲۰].

دیزلی - شش سیلندر خطی	نوع موتور
چهار زمانه	نوع سیکل
پاشش مستقیم	نوع پاشش
4 - $\Phi 0.31\text{mm}$	تعداد نازل - قطر نازل
توربوشارژر	نوع تنفس
128 mm	قطر سیلندر
150 mm	طول کورس
11.58 lit	حجم جا به جایی سیلندرها
16.1:1	نسبت تراکم

۴-۱- عوامل عملکردی موتور در حالت بار کامل

عوامل عملکردی موتور که در آزمایش موتور در حالت بار کامل اندازه‌گیری شده‌اند، در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

گازها بزرگتر می‌شوند. این روش باعث صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان محاسبات می‌گردد. نتیجه این تغییر در قسمت نتایج ارائه و بحث شده است.

۴- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

پس از تولید شبکه و معرفی شرایط مرزی عوامل ورودی شبیه‌سازی موتور استخراج و فایل ورودی برنامه آماده گردید. سپس با انتخاب ضرایب معادلات سینتیکی، معرفی شرایط اولیه دما و فشار هوای داخل سیلندر در لحظه شروع محاسبات و انتخاب گام زمانی مناسب، میدان جریان توأم با اسپری و احتراق روی شبکه محاسباتی تولید شده تحلیل شد. با توجه به این که آزمایش عملکرد موتور در حالت بار کامل انجام شده بود، ابتدا شبیه‌سازی در حالت بار کامل انجام شد و در ادامه با کاهش مقدار سوخت آثار آن بر عملکرد و آلودگی موتور بررسی گردید. گفتنی است که این تحلیل در پیوند قدرت موتور انجام شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در بخش‌های

جدول (۳): عوامل عملکردی موتور در حالت بار کامل [۲۱].

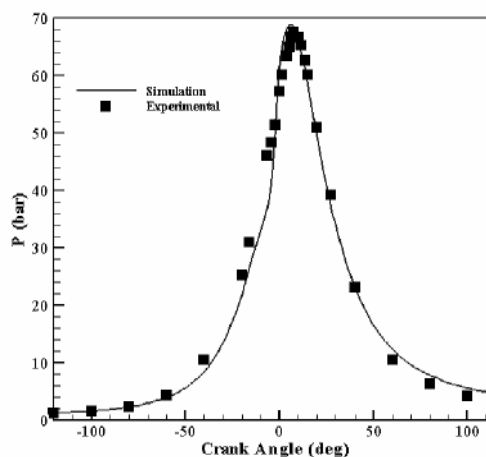
197.5 bar	فشار پاشش	
-16 BTDC	زمان شروع پاشش	
-120 BTDC	زمان بستن سوپاپ ورودی	
116 ATDC	زمان باز شدن سوپاپ خروجی	
1.19 bar	فشار داخل سیلندر در لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی	
40 C	دمای داخل سیلندر در لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی	
1400 RPM	سرعت موتور	
92.2	بازده حجمی	
23.1	نسبت هوا به سوخت (AFR)	
16 C	دمای سوخت	
68.2 bar	بیشینه فشار محفظه	
4.07 bar/deg	بیشینه نرخ افزایش فشار محفظه	
6.5 g/sec	دبی سوخت	
151.17 g/sec	دبی هوا	
3.897	CO	شاخص آلودگی (g/kw-hr)
7.672	NO	
-	UHC	

با توجه به نمودارهای دما و فشار شکل‌های ۴-۵ ملاحظه می‌گردد، پس از بسته شدن سوپاپ ورودی (-120 BTDC) هوا محبوس شده داخل سیلندر با حرکت پیستون به سمت نقطه مرگ بالا تحت فرآیند تراکم قرار می‌گیرد که افزایش دما و فشار سیلندر را به دنبال دارد. قبل از این که پیستون به نقطه مرگ بالا برسد (-16 BTDC) پاشش سوخت به داخل سیلندر شروع می‌شود، که در نمودارهای فشار و دما دیده می‌شود که با اندکی تأخیر، شیب نمودارهای دما و فشار افزایش می‌یابد. افزایش شیب نمودارهای دما و فشار ناشی از احتراق مخلوط سوخت و هوا است. بین زمان پاشش و شروع احتراق اختلافی دیده می‌شود که همان پریود تأخیر در اشتعال می‌باشد. تأخیر در اشتعال به این دلیل است که مدت زمانی طول می‌کشد که سوخت تزریق شده شکسته شده و قطرات حاصله تبخیر و بخار حاصل با هوا مخلوط و احتراق را شروع نمایند. پس از شروع احتراق مخلوط سوخت و هوا تا بعد از نقطه مرگ بالا ادامه می‌یابد به طوری که بیشینه فشار بعد از نقطه مرگ بالا اتفاق می‌افتد که مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. شبیه‌سازی تا پایان مرحله انبساط یعنی باز شدن سوپاپ خروجی ادامه یافته و نتایج تجربی و شبیه‌سازی کاهش فشار و دمای گازهای داخل سیلندر را در این مرحله نشان می‌دهد.

به منظور بحث بیشتر در باره فرآیند آزاد شدن گرمای ناشی از احتراق در شکل‌های ۶-۷ به ترتیب گرمای انباشته شده در سیلندر و نرخ گرمای آزاد شده ارائه شده است. در شکل ۶ پریود تأخیر در اشتعال به خوبی نمایان است. نرخ گرمای آزاد شده از فرآیند احتراق یکی از عوامل مهم عملکردی موتور است، که تأثیر به‌سزایی بر بیشینه فشار و دمای سیلندر، نرخ افزایش فشار و تشکیل آلودگی‌های موتور دارد. این منحنی به خوبی توسط شبیه‌سازی پیشگویی شده و به دو ناحیه احتراق پیش آمیخته (از شروع احتراق تا بعد از بیشینه فشار) و ناحیه احتراق نفوذی (از پایان احتراق پیش آمیخته تا زمان باز شدن سوپاپ خروجی) قابل تفکیک است. رفتار کلی این نمودار مطابقت خوبی با منحنی‌های معمول برای موتورهای دیزلی دارد [۲۲]. منحنی شکل ۷ نشان می‌دهد که قسمت عمده‌ای از سوخت به صورت پیش‌آمیخته

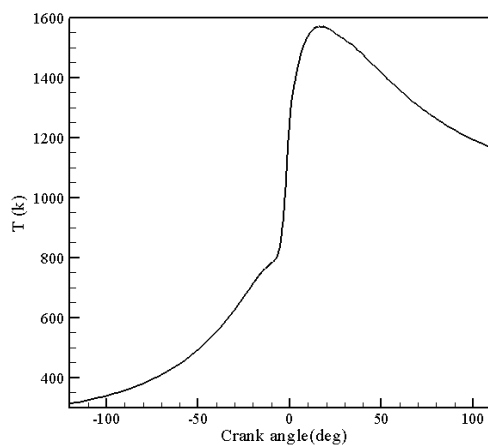
۴-۲- نتایج شبیه‌سازی در حالت بار کامل

یکی از نتایج مهم شبیه‌سازی که مبنای عملکرد موتور است، منحنی فشار بر حسب زاویه لنگ ($P - \theta$) است. در شکل ۴ منحنی فشار بر حسب زاویه لنگ با نتایج تجربی مقایسه شده است. در این نمودار تغییرات فشار داخل سیلندر از لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی تا لحظه باز شدن سوپاپ خروجی ارائه شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی تطابق رضایت بخشی با نتایج تجربی دارد.

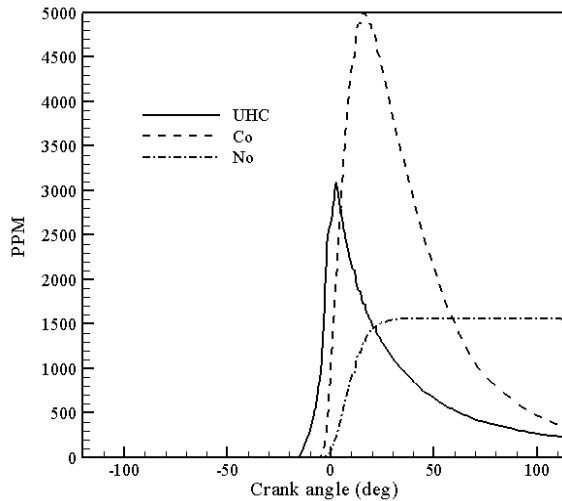


شکل (۴): منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ [۲۱].

در شکل ۵، نمودار تغییرات دمای گازهای داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ موتور ارائه شده است.



شکل (۵): منحنی تغییرات دمای گازهای داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ.



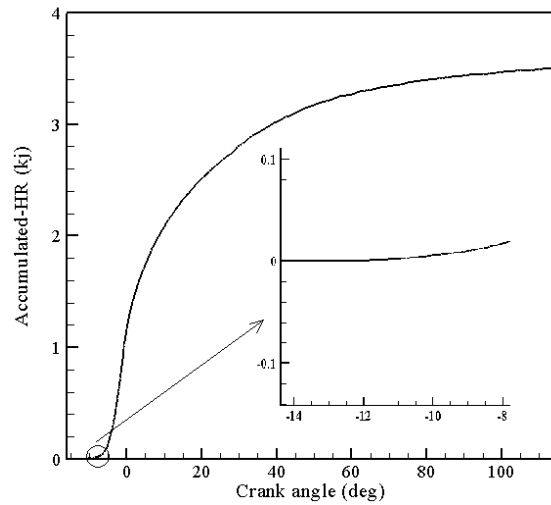
شکل (۸): منحنی تغییرات غلظت آلودگی اکسید نیتروژن (NO) و مونواکسید کربن (CO) و هیدروکربن نسوخته (UHC) در زوایه لنگ‌های مختلف.

جدول (۴): عوامل عملکردی موتور در حالت بار کامل [۲۱].

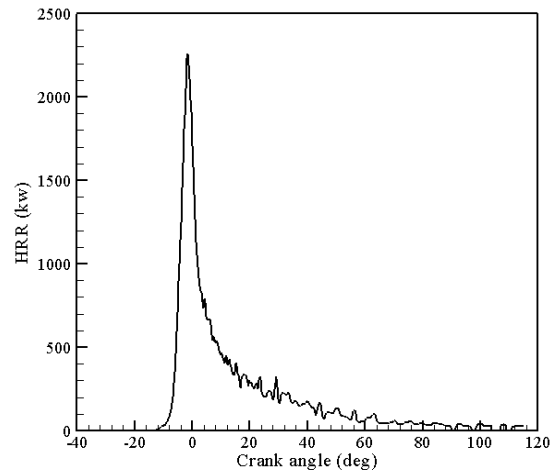
روش	شاخص آلودگی‌ها (g/kw-hr)		
	NO	CO	UHC
تجربی	7.672	3.897	-
شبیه‌سازی	8.561	1.763	8.242

با مقایسه غلظت آلودگی‌ها ملاحظه می‌شود که غلظت اکسید نیتروژن (NO) به خوبی توسط شبیه‌سازی پیش‌بینی شده است، اما در مورد آلودگی مونواکسید کربن (CO) اختلاف چشمگیری وجود دارد که علت این اختلاف این است که تشکیل آلودگی مونواکسید کربن در شبیه‌سازی بر پایه احتراق تعادلی در نظر گرفته شده است، در صورتی که تشکیل اکسید نیتروژن به صورت سینتیکی با مکانیزم زلدویچ است و ممکن است دقیق‌تر باشد. این نتیجه می‌تواند تأییدی بر نظر برخی محققان در مورد ضرورت تعیین غلظت CO به روش سینتیکی باشد. در عمل عوامل مختلفی بر آلودگی خروجی موتور مؤثرند که شبیه‌سازی همه آنها سبب پیچیده‌تر شدن مدل‌سازی می‌گردد، اما می‌توان گفت که این مدل رفتار تغییرات غلظت آلودگی‌ها را به طور مناسب و نزدیک به واقعیت پیش‌بینی می‌کند.

سوخته می‌شود و مابقی آن با حرکت پیستون به سمت نقطه مرگ پایین به صورت دیفیوژنی مصرف می‌شود.



شکل (۶): منحنی گرمای انباشته شده داخل سیلندر.



شکل (۷): منحنی نرخ گرمای آزاد شده داخل سیلندر.

از دیگر نتایج مهم شبیه‌سازی پیش‌بینی آلاینده‌گی‌های خروجی موتور است که در شکل ۸ غلظت آلاینده‌گی اکسید نیتروژن (NO)، مونواکسید کربن (CO) و هیدروکربن نسوخته (UHC) ارائه شده است.

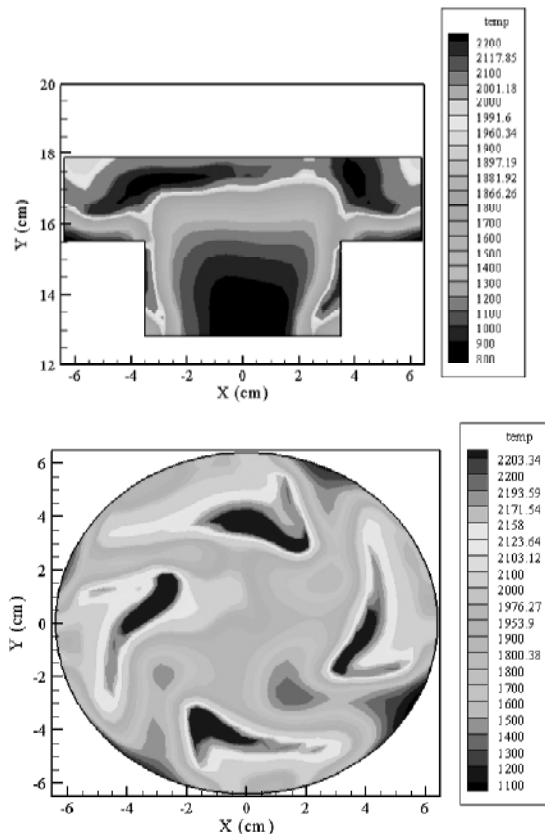
غلظت آلاینده‌های پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی کاملاً منطبق با نحوه تشکیل آلاینده‌ها در موتورهای دیزلی است [۲۲]. اما به منظور مقایسه نتایج، میزان آلودگی‌های خروجی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی و نتایج آزمایش موتور در شرایط یکسان در جدول ۴ ارائه شده است.

۴-۳- بررسی اثر افزودن شرط قدم زمانی

با توجه به این که در کد KIVA عبارات دیفیوژنی معادلات حاکم به صورت ضمنی گسسته می‌شوند و عبارات کنوکسیونی در زیر قدم‌ها محاسبه می‌گردند، محدودیتی به دلیل پایداری روی قدم زمانی اعمال نمی‌شود. اما برای دقت شرایط مختلفی مطرح می‌شود. البته اندازه قدم زمانی کنوکسیون باید شرط کورانت را برای پایداری ارضا نماید. برای دقت بر حسب نوع مسأله شرایط گوناگونی وجود دارد و تحلیل گران عددی بر حسب تجربه خود شرط یا شرایطی را در مسأله مورد نظر رعایت می‌کنند. به عنوان ورودی به کد KIVA مقادیر حداقل و حداکثر گام زمانی تعریف می‌شود و کد بر اساس شرایطی از قبیل تناسب گام زمانی با شبکه، تغییر فرم سلول در اثر حرکت شبکه در فاز لاگرانژی و توأم کردن میدان جریان و عبارات چشمه ناشی از آزاد سازی گرمای شیمیایی و تبادل جرم و انرژی با اسپری، قدم زمانی را در هر لحظه از محاسبات مابین مقادیر حداقل و حداکثر انتخاب می‌کند. در این تحقیق علاوه بر شرایط دقت پیش فرض کد KIVA، شرط دیگری نیز به کد اضافه شده است. اساس این شرط بر این واقعیت استوار است که در مراحل مختلف کاری موتور می‌توان قدم زمانی را متغیر انتخاب نمود. به این ترتیب که با شروع پاشش سوخت دیزل و در دوره احتراق که معادلات اسپری و احتراق تحلیل می‌شوند، قدم زمانی بسیار کوچک انتخاب می‌گردد و در سایر مراحل که فقط معادلات مربوط به فاز گاز تحلیل می‌شود، گام زمانی بزرگ انتخاب می‌شود. برای نشان دادن اثر این تغییر، از دو دیدگاه دقت و سرعت روی نتایج شبیه‌سازی بحث می‌شود.

از دیدگاه دقت، ابتدا حداقل و حداکثر قدم زمانی به طور یکسان برای کد KIVA مبنا (اصلی) و کد تغییر یافته با افزودن شرط گام زمانی تعریف می‌شود. به منظور مقایسه نمودار $(P - \theta)$ که توسط این کدها پیش‌بینی شده با نمودار حاصل از اندازه‌گیری تجربی، شکل ۱۰ ارائه شده است.

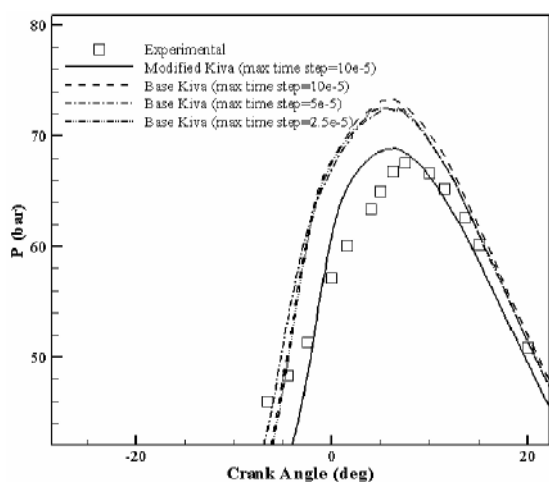
همچنین می‌توان با استفاده از توزیع دمای گازهای داخل سیلندر موقعیت شعله را داخل سیلندر شناسایی کرد. در شکل ۹ خطوط هم‌تراز دما که مشخص کننده جبهه شعله هستند، بر صفحات برش طولی و عرضی از موتور در لحظه‌ای که پیستون به سمت نقطه مرگ پایین در حرکت است، ارائه شده است.



شکل (۹): توزیع دما داخل سیلندر در زاویه لنگ 20ATDC

با توجه به شکل ۹ دیده می‌شود که متناسب با هر یک از نازل‌های انژکتور، یک شعله مجزا تشکیل شده و چهار شعله در شکل ۹ دیده می‌شود. با توجه به این که، این شبیه‌سازی به صورت سه بعدی انجام شده، بنابراین بهینه شکل کاسه پیستون و هندسه محفظه احتراق برای بهبود عملکرد با استفاده از نتایج این شبیه‌سازی امکان‌پذیر است.

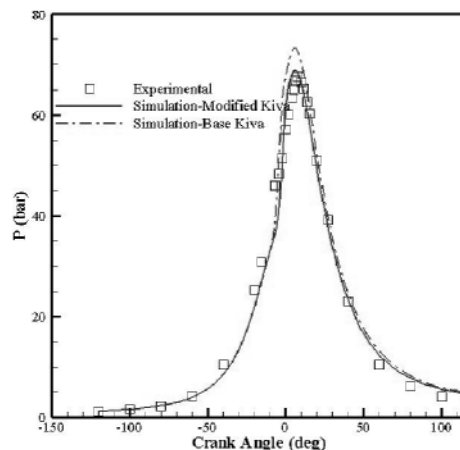
اکنون این مسأله قابل طرح است که ممکن است با ریز کردن گام زمانی، امکان بهبود دقت نتایج در حالت شبیه‌سازی با کد مبنا وجود داشته باشد. برای بررسی این موضوع کد KIVA مبنا (بدون اعمال تغییرات) در سه حالت دیگر، اول با انتخاب حداکثر گام زمانی یکسان با کد تغییر یافته، دوم نصف حالت اول و سوم با یک چهارم حداکثر گام زمانی حالت اول برای شبیه‌سازی به کار گرفته شد. برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی، نمودار $(P - \theta)$ کلیه حالت‌های شبیه‌سازی همراه با نتایج آزمایش در شکل ۱۲ ارائه شده است.



شکل (۱۲): منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ در محدوده شروع پاشش و دوره احتراق.

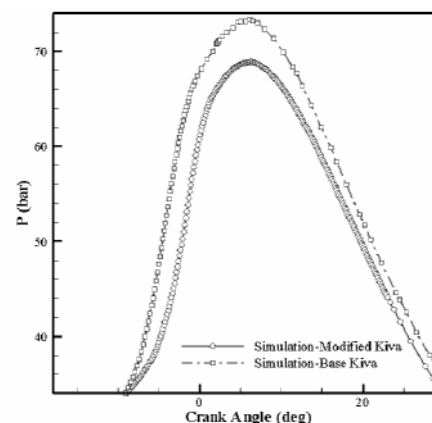
همان‌طور که از نمودارهای شکل ۱۲ آشکار است با وجود ریز کردن گام زمانی کد مبنا باز هم نتایج شبیه‌سازی با کد KIVA بهبود یافته، که شرط قدم زمانی به آن اضافه شده، به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. ارزش این تغییر در کد وقتی بهتر آشکار می‌شود که زمان اجرای شبیه‌سازی در هر یک از حالت‌ها با هم مقایسه شود. در جدول ۵ مدت زمان کلی اجرای کد مبنا در حالت‌های مذکور در بالا با کد تغییر یافته مقایسه شده است.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که ریز کردن گام زمانی در حالت شبیه‌سازی با کد مبنا، سبب افزایش زمان اجرای برنامه می‌گردد، در صورتی که طبق شکل ۱۲ دقت محاسبات فقط اندکی افزایش می‌یابد. در مقایسه با حالت سوم اجرای کد مبنا که دقت بیشتری نسبت به دو حالت



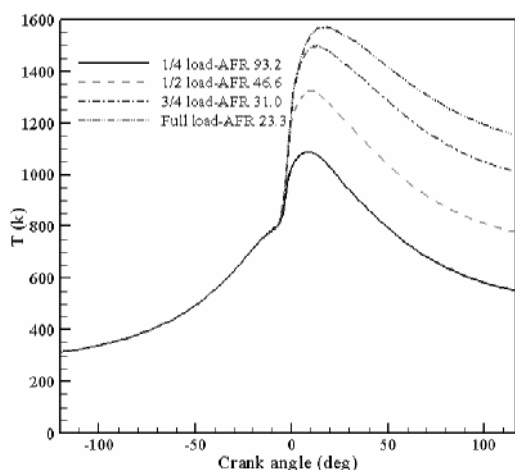
شکل (۱۰): منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ (تجربی، کد KIVA مبنا و کد تغییر یافته) [۲۱].

با توجه به شکل ۱۰ دیده می‌شود که نتایج کد KIVA تغییر یافته مطابقت بهتری با نتایج تجربی دارد. برای نشان دادن اثر شرط اضافه شده به کد روی انتخاب گام زمانی برای محاسبات، نمودار فشار بر حسب زاویه لنگ همراه با نشانه (سیمبل) برای کد مبنا و کد تغییر یافته در محدوده شروع پاشش (16BTDC) و دوره احتراق در شکل ۱۱ ارائه شده است.



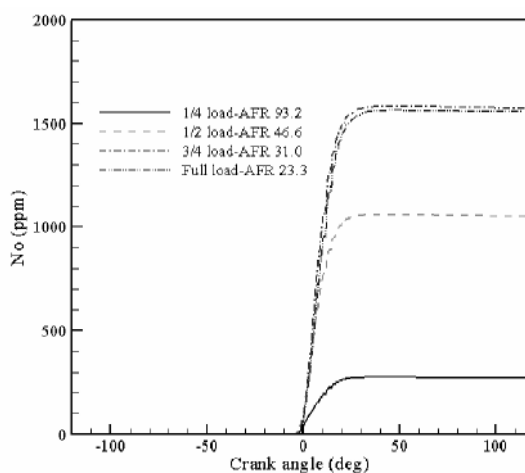
شکل (۱۱): منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ در محدوده شروع پاشش و دوره احتراق.

در شکل ۱۱ فشردگی نقاط در نمودار مربوط به کد تغییر یافته در مقایسه با کد مبنا حاکی از اثر کردن شرط اندازه قدم در شروع پاشش بوده و مطابق شکل ۱۰ سبب بهبود در دقت نتایج عددی می‌گردد.



شکل (۱۴): منحنی تغییرات دمای گازهای داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ با میزان بارهای مختلف.

در شکل‌های ۱۷-۱۵ به ترتیب نمودار تغییرات غلظت آلودگی‌های اکسید نیتروژن، مونواکسید کربن و هیدروکربن نسوخته در میزان بار ورودی مختلف ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با کاهش مقدار سوخت، سطح آلودگی خروجی موتور نیز کاهش می‌یابد.



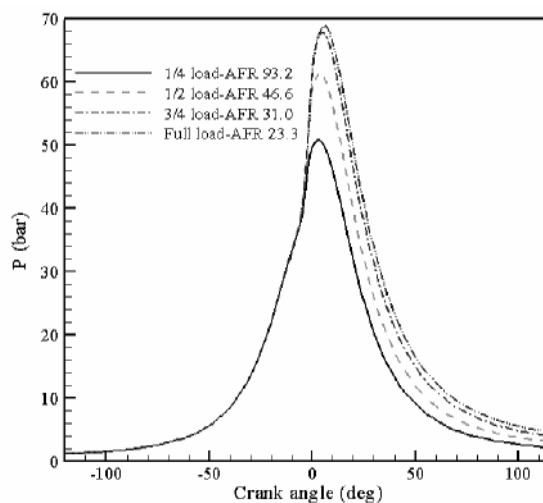
شکل (۱۵): منحنی تغییرات غلظت آلودگی اکسید نیتروژن (NO) در زاویه لنگ‌های مختلف با مقادیر مختلف بار.

با توجه به شکل ۱۵ غلظت آلودگی اکسید نیتروژن با رقیق‌تر شدن مخلوط، کاهش یافته، زیرا با کاهش مقدار سوخت، دمای داخل سیلندر کاهش می‌یابد و غلظت آلودگی NO متناسب با کاهش دمای گازهای داخل سیلندر کاهش می‌یابد.

دیگر دارد کد تغییر یافته دقت بهتری دارد، در حالی که مدت زمان اجرای آن نیز کوتاهتر است. نتایج این بخش به طور کلی نشان داد که افزودن شرط قدم زمانی به کد KIVA اثر قابل توجهی در راستای بهبود دقت و افزایش سرعت به شبیه‌سازی عددی می‌بخشد.

۴-۴- بررسی آثار میزان بار ورودی

در این بخش اثر میزان بار ورودی بر عملکرد و آلودگی موتور بررسی می‌شود، برای این منظور در دور ثابت با کاهش مقدار سوخت پاشیده شده به داخل موتور و ثابت نگه داشتن مقدار هوای داخل سیلندر در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی انجام شده و نتایج ارائه می‌شود. در شکل‌های ۱۴-۱۳ نمودار تغییرات فشار و دمای داخل سیلندر در میزان بار ورودی مختلف ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که با کاهش مقدار سوخت فشار و دمای داخل سیلندر کاهش می‌یابد.



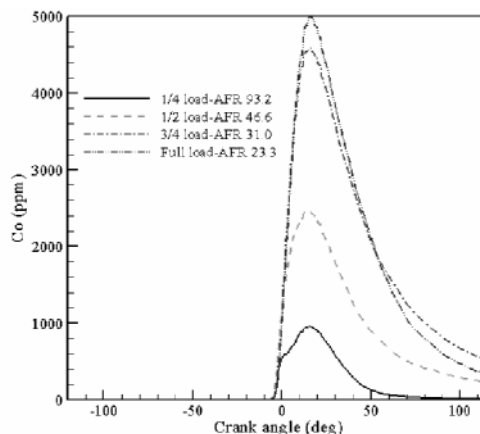
شکل (۱۳): منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ با میزان بارهای مختلف.

جدول (۵): مقایسه زمان اجرای شبیه‌سازی.

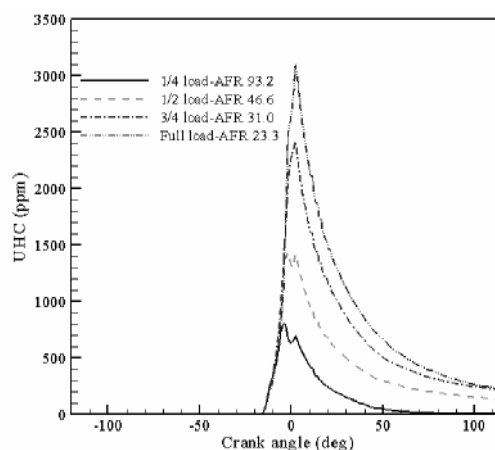
Run Time of (sec)	Time step (sec)	case
11146	0.00001	Modified KIVA
9807	0.00001	Base KIVA
10587	0.000005	Base KIVA
12249	0.0000025	Base KIVA

بهبود شبیه‌سازی، ارائه شد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی تأثیر میزان بار ورودی بر عملکرد موتور بررسی گردید. می‌توان نتایج و دستاوردهای این تحقیق را به صورت زیر جمع‌بندی نمود:

- ۱- منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل عملکردی موتور تطابق رضایت‌بخشی با نتایج تجربی دارد،
- ۲- اعمال تغییرات در کد برای کوچک کردن اندازه قدم محاسباتی در زمان شروع پاشش تأثیر خوبی در دقت، سرعت و همگرایی شبیه‌سازی دارد،
- ۳- نتایج مربوط به آلاینده‌ها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی انجام شده پیش‌بینی خوبی از میزان آلاینده‌ها بویژه برای آلاینده‌گی اکسید نیتروژن ارائه می‌دهد،
- ۴- شبیه‌سازی به خوبی رفتار فیزیکی تثبیت شدن سطح آلاینده‌گی اکسید نیتروژن (NO) را در پایان احتراق پیش‌آمیخته نشان می‌دهد،
- ۵- منحنی نرخ گرمای آزاد شده و گرمای انباشته شده در سیلندر به خوبی شبیه‌سازی شده و زمان تأخیر در اشتعال روی این منحنی‌ها قابل تشخیص است. رفتار کلی این منحنی‌ها مطابقت خوبی با رفتار مرسوم برای موتورهای دیزلی دارد،
- ۶- نتایج نشان می‌دهد که بیشتر سوخت به صورت پیش‌آمیخته سوخته می‌شود و مقدار کمی از آن با حرکت پیستون به سمت نقطه مرگ پایین به صورت دیفیوژنی مصرف می‌شود،
- ۷- با کاهش میزان بار ورودی، فشار و دمای داخل سیلندر کاهش می‌یابد، که بیانگر عمومی بودن نتایج مدل عددی در سایر شرایط است،
- ۸- با کاهش میزان بار ورودی، سطح کلیه آلاینده‌های خروجی موتور کاهش یافت، که کاملاً منطقی است با رقیق نمودن مخلوط، آلودگی کاهش یابد و
- ۹- نتایج حاصل شده از این تحقیق نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی ابزاری بسیار قوی برای پیشگویی عملکرد و آلاینده‌گی موتور است و می‌تواند برای بهینه‌سازی و طراحی موتورهای دیزلی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۱۶): منحنی تغییرات غلظت آلودگی مونواکسید کربن (CO) در زوایه لنگ‌های مختلف با مقادیر مختلف بار.



شکل (۱۷): منحنی تغییرات غلظت آلودگی هیدروکربن نسوخته (UHC) در زوایه لنگ‌های مختلف با مقادیر مختلف بار.

با توجه با شکل‌های ۱۶-۱۷ با کاهش میزان سوخت، غلظت آلودگی‌های مونواکسید کربن و هیدروکربن نسوخته کاهش یافته است. طبیعی است با رقیق‌تر شدن مخلوط اکسیژن کافی برای اکسیداسیون کامل سوخت در دسترس خواهد بود و کاهش سطح این آلودگی‌ها قابل پیش‌بینی است.

۵- نتیجه‌گیری‌ها

در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی عملکرد موتور دیزلی پاشش مستقیم بر پایه استفاده از کد KIVA-3V که به صورت متن اصلی است و با اعمال برخی تغییرات برای

13. Christos, A. C., Assanis, D.N., Kook, S., and Bae, C. "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 Conf., April 5-7, 2005, Chicago, IL, USA.
14. Sangjin, H., Margaret, S.W., Hong, G.I., Assanis, D.N., and Pitsch, H. "Development and Application of a Comprehensive Soot Model for 3D CFD Reacting Flow Studies in a Diesel Engine" Combustion and Flame, Vol. 143, No.1, pp. 11-26, 2005.
15. Amsden, A.A., O'Rourke P.J., and Butler, T.D. "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays", Los Alamos National Laboratory Report LA-11560-MS (May 1989).
16. Amsden, A.A. "KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries", Los Alamos National Laboratory Report LA-12503-MS (March 1993).
17. Amsden, A.A. "KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves", Los Alamos National Laboratory Report LA-13313-MS (July 1997).
18. O'Rourke, P.J. "Collective Drop Effects in Vaporizing Liquid Sprays", PhD Dissertation, Mech. Eng Dep't., Princeton Univ., 1981.
19. Magnussen, B.F. and Hjertager, B.H. "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", The Sixteenth Int. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1977.
۲۰. مشخصات فنی موتور OM355، مطابق کاتالوگ سازنده، شرکت ایدم، تبریز.
21. Pirouzpanah, V. "Diesel Test Turbo charged", New Zealand, DieselGas Int. limited Co., Test No. 355012, November, 2002.
22. Ramos, J.I. "Internal Combustion Engine Modeling", Hemisphere Publishing Corporation 1989.

مراجع

1. Belardini, P., Bertoli, C., Cameretti, M.C., and Del Giacomo, N. "A coupled Diesel Combustion and Soot Formation Model for KIVA2 Code: Characteristics and Experimental Validation", Int. Symp. COMODIA 1994.
2. Patterson, M. A., Kong, S.C., Hampson, J.H., and Reitz, R.D. "Modeling the Effects of Fuel Injection Characteristics on Diesel Engine Soot and NOx Emissions", SAE Technical Paper 1994-01-0523.
3. Tetsuo, T. "Numerical Calculation of Spray Mixing Process in a D.I. Diesel Engine and Comparison with Experiments", SAE Technical Paper 1995-01-0853.
4. Tannr, F. X. and Boulouchos, K. "A Computational Investigation of the Spray-Induced Flow and its Influence on the Fuel Distribution for Continuous and Intermittent DI-Diesel Sprays" SAE Technical Paper 1996-01-0631.
5. Moses, E., Rao, K.K., and Winterbone, D.E. "3D Modeling and Photographic Investigation of Combustion in Hydra DI Diesel engine ", SAE Technical Paper 1996-01-0836.
6. Jonas, G. and Golovitchev, V. "3D Simulation of Multiple Injections in DI Diesel Engine", Chalmers University of Technology S-41296, Göteborg, Sweden.
7. Belardini, P. and Bertoli, C. "Multi-dimensional Modeling of Combustion and Pollutants Formation of New Technology Light Duty Diesel Engines", Oil & Gas Science and Tech. Đ Rev. IFP, Vol. 54, No. 2, pp. 251-257, 1999.
8. Golovitchev, V.I. Nordin, N., Jarnicki, R., and Chomiak, J. "3-D Diesel Spray Simulations, Using a New Detailed Chemistry Turbulent Combustion Model", CEC/SAE Int. Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, 19-22, June 2000, Paris, France.
9. Taskinen, P. "Modeling Medium Speed Diesel Engine Combustion, Soot and NOx-emission Formation", SAE Technical Paper 2000-01-1886.
10. Daniel Lee and Rutland, C.J. "Multi-dimensional Modeling of a Six-Mode Diesel Test Cycle Using a PDF Combustion Model", SAE Tech. Paper 2000-01-0585.
11. Taskinen, P. "Effect of Soot Radiation on Flame Temperature, NOx-emission and Wall Heat Transfer in a Medium Speed Diesel Engine", ICE Fall Technical Conf., Japan 2002.
12. Artto, D.R., Donateo, T., and Laforgia, D. "Optimization of combustion Chamber of Direct Injection Diesel Engines", SAE Technical Paper 2003-01-1064.