

تعیین زاویه پاشش سوخت بهینه برای یک موتور اشتعال جرقه‌ای پاشش مستقیم (GDI) با شبیه‌سازی عددی

علی میرمحمدی*
 شعبان علیاری شوره دلی
 سیدعبداله موسوی
 هادی بنایی‌بروجنی

استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک
 استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک
 کارشناس ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک
 کارشناس ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی مکانیک

چکیده

مجموعه پاشش مستقیم سوخت به اتاق احتراق به جای پاشش در راهگاه ورودی یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش مصرف سوخت و گازهای آلاینده خروجی موتور است. با این راهبرد در حالی که مصرف سوخت موتور کاهش چشمگیری می‌یابد قدرت موتور نیز حفظ می‌شود. هدف این پژوهش تعیین زاویه مناسب افشانه سوخت برای یک موتور پاشش مستقیم سوخت در حالت بار چینه‌ای است. به همین منظور ابتدا موتور EF7 (موتور ملی) به صورت پاشش در راهگاه ورودی به صورت عددی در نرم افزار کیوا شبیه‌سازی شد. پس از مقایسه نتایج این شبیه‌سازی با نتایج تجربی و صحت‌گذاری داده‌های شبیه‌سازی، راهبرد پاشش مستقیم جایگزین سیستم پاشش در راهگاه ورودی شد. سپس زاویه مناسب پاشش سوخت برای کارکرد موتور در حالت پاشش مستقیم و بار چینه‌ای تعیین گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پاشش مستقیم سوخت در داخل سیلندر باعث توسعه و ایجاد بردارهای سرعت جریان با اندازه بزرگتر در تمام اتاق احتراق می‌شود. این امر باعث اختلاط، تبخیر و احتراق بهتر خواهد شد. زاویه پاشش ۹۰ درجه بهترین زاویه پاشش سوخت در شرایط کاری تعیین شده موتور EF7 است. در این حالت سوخت و هوا بهتر مخلوط می‌شود. فشار داخل سیلندر و کار حاصل چرخه در این زاویه پاشش در مقایسه با زوایای دیگر افزایش یافت. همچنین مقدار تولید هیدروکربن نسوخته، مونوکسیدکربن و اکسیدنیترژن، کمتر از زاویه‌های پاشش دیگر است.

واژه‌های کلیدی: موتور بنزینی پاشش مستقیم، بار چینه‌ای، شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار کیوا

Appointment of Optimum Fuel Injection Characteristics for a Direct Injection Spark Ignition Engine Using Numerical Simulation

A. Mirmohammadi Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University
 Sh. Alyary Shorehdeli Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University
 S. A. Mousavi MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University
 H. Banaei Boroujeni MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

Abstract

Replacement of port fuel injection strategy with direct fuel injection to the combustion chamber is one of the effective methods for fuel consumption and emission reduction. With this strategy the engine would have diesel engines low fuel consumption. Also it would have gasoline engines power. Determination of optimum fuel injection angle in a direct fuel injection stratified charge engine is the object of this research. In this view Iranian nation engine first simulated numerically as port fuel injection using KIVA-3V code. Inlet port injection strategy was replaced with direct injection one hereinafter simulation results was calibrated using experimental data. Then optimum fuel injection was determined for direct injection stratified charge engine. Simulation results show that flow velocity vectors are bigger because of fuel direct injection to the cylinder. Ninety degree is the best fuel injection angle for determined engine condition. In this way air fuel is mixed better. With this fuel injection angle in cylinder pressure and cycle work increased in comparison to other fuel injection angles. Also, unburned hydrocarbons, carbon monoxide and nitrogen oxide emissions reduced in comparison to other fuel injection angles.

Keywords: Gasoline direct injection, Stratified charge, Numerical simulation, KIVA-3V code

۱- مقدمه

امروزه وضع قوانین سخت‌گیرانه حفاظت از محیط زیست برای کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و همچنین افزایش قیمت سوخت، طراحان را به سوی طراحی مناسب برای کاهش مصرف سوخت و آلایندگی‌های هوا سوق داده است. به همین دلایل مجموعه پاشش سوخت در راهگاه ورودی^۱ جایگزین سوخت آما^۲ شد. در حال حاضر بسیاری از موتورها به صورت پاشش سوخت در راهگاه ورودی تولید می‌شوند. فناوری طراحی این موتورها بسیار توسعه یافته است و در چند دهه گذشته تمرکز بیشتر طراحان بر روی بهسازی مجموعه پاشش سوخت و پایش الکترونیکی آنها بوده است. انواع راهکارها برای بهینه‌ترین حالت مصرف سوخت و آلایندگی در شرایط کاری مختلف این موتورها استفاده شده است و جای کار بیشتر برای بهبود عملکرد این موتورها نیست. با این وجود در حال حاضر نیز طراحان به دنبال کاهش هرچه بیشتر مصرف سوخت و آلایندگی‌ها هستند. یکی از راهکارهای نیل به این هدف استفاده از موتورهای بنزینی پاشش مستقیم^۳ است. موتورهای پاشش مستقیم سوخت دارای ظرفیت خوبی برای کاهش مصرف سوخت و آلایندگی گازهای خروجی در حد استانداردهای بین‌المللی جدید هستند. بسیاری از شرکت‌های خودروسازی در مدل‌های جدید خود از موتورهای بنزینی با پاشش مستقیم سوخت در داخل سیلندر استفاده می‌کنند. این موتورها در توسعه موتورهای بنزینی و در شرایطی طراحی شده‌اند که مزایای موتورهای دیزلی و بنزینی را داشته باشند. با انتقال افشانه سوخت به درون سیلندر می‌توان در بارهای جزئی موتور بار چینه‌ای^۴ به صورت منطقه غنی در اطراف شمع برای شروع احتراق و منطقه رقیق چینه‌ای در ناحیه دورتر از شمع ایجاد کرد و بدین ترتیب نظیر موتورهای دیزلی از مخلوط کلی رقیق‌تر سوخت و هوا که بازده گرمایی بیشتر و آلایندگی کمتری دارد، بهره جست. تحقیقات نشان داده است که برای کاهش مصرف سوخت و تولید آلایندگی‌های خروجی استفاده از موتور بنزینی تزریق مستقیم اشتعال جرقه‌ای چهار زمانه بسیار مناسب است [۱]. مدت زمان کوتاه پاشش و نحوه پخش شدن سوخت درون سیلندر و همچنین فرایند اختلاط سوخت و هوا درگستره وسیعی از سرعت و بارگذاری‌های مختلف، باعث به وجود آمدن تفاوت اساسی در نوع احتراق و شکل‌گیری مخلوط سوخت و هوا نسبت به موتورهای تزریق سوخت در راهگاه ورودی می‌شود. با توجه به زمان پاشش سوخت در این نوع موتورها می‌توان دو نوع مخلوط چینه‌ای یا همگن^۵ ایجاد کرد.

هنگامی که موتور در محدوده بار کم و متوسط کار می‌کند، سوخت لحظاتی پیش از جرقه شمع به داخل سیلندر تزریق می‌شود که در این حالت، مخلوط چینه‌ای تشکیل می‌گردد. مهمترین مزیت این روش این است که مصرف سوخت و مقدار آلایندگی‌های هیدروکربن نسوخته و منوکسیدکربن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به این نوع راهبرد، راهبرد بار چینه‌ای گفته می‌شود. اما زمانی که موتور در حالت تمام بار کار می‌کند، زمان پاشش به مرحله مکش انتقال می‌یابد. به این ترتیب مخلوطی تقریباً همگن قبل از شروع اشتعال ایجاد می‌شود. البته برای توان بیشینه، مخلوط همگن اندکی غنی است و در بارهای کمتر این مخلوط رقیق‌تر است [۲].

آلکیداس و آل تری گزارش کرده‌اند که موتورهای با پاشش مستقیم بنزین تا ۱۵ درصد نسبت به موتورهای پاشش سوخت در راهگاه ورودی مصرف سوخت کمتری دارند. همچنین آنها گزارش کرده‌اند که در این موتورها تلفات تلمبه‌ای و تلفات گرمایی نسبت به موتورهای پاشش در راهگاه ورودی کمتر است. این نوع موتورها امکان کار با مخلوط‌های رقیق و چینه‌ای را دارا هستند و در آنها می‌توان از نسبت تراکم بیشتری استفاده کرد. تزریق سوخت بنزین در سیلندر موتور مقاومت موتور در برابر ضربه احتراق^۶ را بیشتر می‌کند [۳].

در طراحی و بهینه‌سازی موتورهای درونسوز بیشتر از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. هدف از شبیه‌سازی موتور به دست آوردن مشخصات عملکردی آن در زمان طراحی، قبل از ساخت و یا تحت شرایط عملکردی جدید یا بحرانی است که اجرای عملی آن پرهزینه یا غیر ممکن می‌باشد. به طور کلی روش‌های الگوسازی و شبیه‌سازی مصرف سوخت و آلایندگی‌های خودرو با استفاده از دو راهکار قابل اجرا است. روش اول استفاده از جدول داده‌ها است که بر اساس منحنی‌های عملکردی هر یک از اجزا به دست می‌آید و به الگوهای ایستایی نیز معروف می‌باشند. روش دوم استفاده از الگوی پویایی است که بتواند عملکرد اجزا خودرو را در حد مورد نیاز شبیه‌سازی نماید [۴].

صنایع و همکارانش شبیه‌سازی ترمودینامیکی موتورهای اشتعال جرقه‌ای و پیش‌بینی عامل‌های عملکردی موتور و آلایندگی‌های حاصل از آن را ارائه کرده‌اند. شبیه‌سازی فرآیندهای مکش و تخلیه به روش پر و خالی شدن و فرآیند احتراق به صورت شبه دومتبقه‌ای (منطقه سوخته و نسوخته) صورت گرفته است. آنها نتیجه گرفتند اگر زمان جرقه خیلی زودتر از نقطه مرگ بالا باشد تبعاً کار برای تراکم گازها در مرحله تراکم افزایش می‌یابد. از طرف دیگر اگر جرقه با تاخیر زده شود فشار بیشینه گازهای داخل سیلندر دیرتر رخ می‌دهد و در نتیجه کار

¹ Port fuel injection

² Carburetor

³ Gasoline Direct Injection

⁴ Stratified Charge

⁵ Homogeneous Charge

⁶ Knock

حاصل از مرحله انبساط کاهش می‌یابد. زمان بهینه جرقه جایی است که بیشینه فشار داخل سیلندر در نزدیکی نقطه مرگ بالا قرار گیرد. این نحوه طراحی باعث می‌شود که در دراز مدت آسیب کمتری به قطعات موتور وارد شود [۵].

جینگ سان و همکارانش در پژوهشی به شبیه‌سازی یک موتور اشتعال جرقه‌ای پرداختند. آنها پس از صحنه گذاری مدل خود به بررسی سیستم کنترلی موتور برای یافتن مقدار بهینه عوامل مختلف در حالت بار چینه‌ای و رابطه میان عوامل مختلف پرداختند [۶].

در پژوهشی اتریچ و همکارانش یک موتور پاشش مستقیم سوخت را به صورت عددی در شرایط بار کم و مخلوط سوخت و هوای چینه‌ای شبیه‌سازی کردند. برای این منظور معادلات تغییر حجم، اختلاط سوخت و هوا، انتقال گرما، افشانه سوخت، پیشروی شعله و دیگر معادلات حل شده است. نتایج ارایه شده با نتایج تجربی یک موتور چهار سیلندر پاشش مستقیم سوخت صحنه‌گذاری شده است. ایشان زمان پاشش سوخت را تغییر و مقدار تولید گازهای آلاینده را بررسی کرده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که با کاهش مدت زمان پاشش سوخت، مقدار آلاینده مونوکسیدکربن افزایش می‌یابد. همچنین این تغییر باعث ایجاد احتراق ناقص در محفظه احتراق می‌شود که نتیجه آن کاهش دمای احتراق و در نتیجه کاهش تولید آلاینده NO_x می‌شود [۷].

جزایری و همکارانش در پژوهشی روشی برای الگوسازی شکل‌گیری مخلوط سوخت و هوا با ترکیب کردن مولفه‌های شکل‌گیری مخلوط نظیر فشار سوخت، زمان شروع پاشش، سرعت پاشش و محل قرارگیری افشانه ارائه کرده‌اند. برای انجام این کار تشکیل مخلوط سوخت و هوا با استفاده از نرم افزار فلوئنت^۱، از لحظه شروع پاشش سوخت تا نقطه مرگ بالا در مرحله تراکم شبیه‌سازی شده است. آنها در شبیه‌سازی از افشانه سوخت چرخشی استفاده کرده‌اند و شمع و افشانه هر دو در مرکز سرسیلندر قرار داده شده است. نتایج نشان داده است که هرچه فشار پاشش سوخت بیشتر باشد، غلظت مخلوط در اطراف شمع و همچنین قدرت نفوذ افشانه بیشتر می‌شود. هرچه سوخت در حالت بار چینه‌ای دیرتر پاشش شود، غلظت مخلوط در اطراف شمع و در راستای محور سیلندر بیشتر می‌شود. این مسئله کمک شایانی به پایداری احتراق می‌نماید. همچنین هرچه سطح کاسه روی پیستون بیشتر باشد، سوخت بیشتر روی دیواره پیستون پخش می‌شود در صورتی که اگر سطح کاسه کمتر باشد، تمرکز غلظت مخلوط به سمت شمع هدایت می‌شود [۲].

در پژوهشی دیگر نحوه شکل‌گیری مخلوط سوخت و هوا برای سوخت پاشش شده توسط افشانک دارای ۲ افشانه در یک موتور

GDI بررسی شده است. برای این منظور کیا نیشیدا و همکارانش ویژگی‌های جرم سوخت مایع و بخار، نفوذ افشانه سوخت و زاویه پاشش سوخت را توسط شبیه‌سازی سه‌بعدی و تصویر برداری لیزری مورد بررسی و صحنه‌گذاری قرار داده‌اند. آنها سپس داده‌های ورودی شبیه‌سازی را تغییر داده‌اند. نتایج حاصل نشان داده است که کاهش زاویه افشانه‌ها با محور سیلندر، باعث افزایش برخورد قطرات با یکدیگر و تبخیر آنها و به این ترتیب افزایش جرم سوخت بخار شده می‌شود. همچنین زمانی که زاویه افشانه‌ها با محور سیلندر ۱۰ درجه باشد، بیشترین و زمانی که ۱۵ درجه باشد، کمترین مقدار نفوذ افشانه مشاهده می‌شود. آنها دریافتند که افزایش فشار پاشش سوخت از ۱۰۰ بار به ۱۵۰ بار مقدار تبخیر سوخت و طول نفوذ افشانه را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد اما افزایش فشار از ۱۵۰ بار به ۲۰۰ بار تأثیر چندانی در مقدار تبخیر سوخت و طول نفوذ افشانه ندارد [۸].

نینگ دینگ و همکارانش ویژگی‌های افشانه سوخت یک موتور GDI را در حالت همگن توسط نرم‌افزار STAR-CD شبیه‌سازی کرده‌اند. آنها برای دماها و فشارهای مختلف هوا و همچنین دماها و فشارهای مختلف سوخت، عملکرد موتور را بررسی و مقدار پیشروی افشانه سوخت، مقدار ذرات بخار شده و قطر میانگین ذرات نسبت به زمان را برای حالت‌های مختلف به دست آورده‌اند. مقایسه نتایج نشان داد که دمای هوای زیاد و فشار پاشش سوخت تأثیر مطلوب و قابل توجهی بر بخار شدن سوخت و اختلاط مناسب سوخت و هوا دارد [۹].

یانگ ایکسیالونگ و همکارانش در پژوهشی تأثیر محل قرارگیری سوخت پاش را بر عملکرد همگن یک موتور GDI به وسیله شبیه‌سازی عددی بررسی کرده‌اند. آنها دریافتند که محل قرارگیری سوخت پاش در نحوه عملکرد موتور GDI تأثیر قابل توجهی دارد. بهینه‌سازی محل قرارگیری سوخت پاش، تأثیر آن بر اتمیزه شدن سوخت و ایجاد مخلوط سوخت و هوای مناسب برای احتراق بهتر از اهداف این پژوهش بوده است [۱۰].

پورقاسمی و همکارانش در پژوهشی به بررسی نحوه کاهش آلاینده‌های دوده و NO_x در پاشش دو مرحله‌ای سوخت در موتورهای دیزل پاشش مستقیم با استفاده از شبیه‌سازی پرداختند. آنها در پژوهش خود به دنبال حالت بهینه پاشش دو مرحله‌ای سوخت به عنوان یک روش مفید و مؤثر برای کاهش همزمان آلاینده‌های دوده و NO_x بوده‌اند. شبیه‌سازی با نرم‌افزار کیوا انجام شده است. نتایج به دست آمده از تحقیق نشان داد که راهکار پاشش دو مرحله‌ای با فاصله زمانی مناسب بین مراحل پاشش می‌تواند در کاهش همزمان آلاینده‌های مذکور مؤثر باشد. با استفاده از راهکار پاشش دو مرحله‌ای مقدار دوده و NO_x در گازهای خروجی به ترتیب ۳۳ و ۱۱ درصد کاهش یافت [۱۱].

¹ Fluent

با توجه به موارد ذکر شده در بالا پیش‌بینی می‌شود که در آینده بیشتر موتورهای درون‌سوز بنزینی به صورت تزریق مستقیم در اتاق احتراق، طراحی و تولید شوند. برای شبیه‌سازی موتور نرم افزارهای مختلف دینامیک سیالات محاسباتی^۱ به کار برده می‌شود. یکی از این نرم‌افزارها که کاربرد زیادی در شبیه‌سازی جریان و احتراق و عملکرد دارد، نرم‌افزار شبیه‌سازی عددی KIVA-3V می‌باشد.

محققان زیادی برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف داخل موتور کارهای تحقیقاتی انجام داده‌اند که نتایج آنها را می‌توان در آخرین نسخه برنامه کیوا یافت. این برنامه حاصل سال‌ها تلاش محققان آزمایشگاه لوس آلاموس^۲ می‌باشد و بسیاری از دانشمندان برای بهبود و توسعه قابلیت‌های این برنامه تلاش کرده‌اند. امروزه برنامه کیوا ابزاری بسیار سودمند در زمینه شبیه‌سازی موتور می‌باشد. کیوا یک برنامه کامپیوتری به زبان برنامه نویسی فرترن^۳ می‌باشد. با استفاده از این برنامه می‌توان مسائل دوبعدی و سه بعدی جریان سیالات همراه با واکنش شیمیایی و افشانه سوخت را حل کرد. در حالی که این برنامه بیشتر برای کاربرد در موتورهای احتراق داخلی توسعه یافته است، از آن می‌توان برای حل جریان‌های آشفته، آرام، مادون صوت، مافوق صوت، تک فازی و دو فازی استفاده کرد. نسخه KIVA-3V قابلیت شبیه‌سازی سوپاپ‌های متحرک را دارا می‌باشد و به کمک آن می‌توان یک چرخه کامل موتور را از مرحله مکش تا مرحله تخلیه شبیه‌سازی کرد. با توجه به قابلیت شبیه‌سازی مرزهای متحرک، وجود مدل‌های آلایندگی و افشانه مختلف برای موتورهای احتراقی و دقت زیاد برنامه، امروزه بسیاری از محققان از این برنامه استفاده می‌نمایند [۱۲].

نصیری طوسی و همکارانش در پژوهشی به شبیه‌سازی عددی احتراق گاز طبیعی به کمک برنامه کیوا پرداخته‌اند. آنها پس از شبکه‌بندی حجم محاسباتی یک موتور به صورت منظم به کمک نرم افزار ICEM-CFD ANSYS تغییرات مقدار آلاینده‌ها را بررسی کرده‌اند. سپس نسبت هم ارزی سوخت به هوا و بازخورانی گازهای خروجی^۴ و اثرات هر کدام از آنها بر توان و آلایندگی موتور را بررسی کرده و برای هر کدام یک مقدار بهینه در هر یک از حالات کارکرد موتور انتخاب کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده است که بین کاهش مقدار آلاینده NO_x و افزایش درصد EGR رابطه غیر خطی برقرار است به طوری که نرخ کاهش NO_x در ابتدا بیشتر است. از طرف دیگر با افزایش درصد EGR مدت زمان احتراق افزایش می‌یابد. با زیاده‌تر از حد مجاز شدن درصد EGR احتراق ناقص می‌شود که

نتیجه آن افزایش تولید آلاینده هیدروکربن نسوخته و کاهش توان تولیدی موتور می‌باشد [۱۳].

میرمحمدی در پژوهشی یک موتور پاشش مستقیم گاز طبیعی با بار چینه‌ای را شبیه‌سازی کرده است. برای این منظور برنامه KIVA-3V اصلی برای پاشش سوخت گاز طبیعی اصلاح شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به خوبی عملکرد موتور را پیش‌بینی کرده است. اختلاف نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی فشار داخل اتاق احتراق موتور خیلی کم و برابر ۱٫۶۲ درصد بوده است. همچنین مقدار NO تولیدی موتور با ۳٫۶ درصد اختلاف با نتایج تجربی به خوبی پیش‌بینی شده است [۱۴].

امی و همکارانش با استفاده از برنامه KIVA-3V به بررسی اثر زاویه و زمان پاشش سوخت بر نرخ تبخیر و میزان آلایندگی موتور EF7 پرداخته‌اند. نتایج ایشان نشان داد که نرخ تبخیر سوخت با پاشش دیر هنگام سوخت کاهش یافته و با تغییر جهت پاشش به سمت نقاط داغ‌تر نظیر سطح بالایی دریچه افزایش می‌یابد. ایشان نتیجه گرفتند که زاویه پاشش ۵۷ درجه موجب پاشش سوخت به سمت نقاط داغ‌تر شده و با افزایش نرخ تبخیر سوخت مخلوط با کیفیت بهتر و احتراق بهتری به دست می‌آید. در نتیجه آلاینده‌های هیدروکربن و مونوکسیدکربن کاهش و آلاینده NO_x اندکی افزایش می‌یابد [۱۵].

بوهاس و آسانیس نیز با استفاده از نرم افزار KIVA-3V تاثیرات زمان‌بندی دریچه دود را بر کارایی و آلایندگی یک موتور بنزینی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که زمان‌بندی مناسب باز و بسته شدن دریچه‌ها می‌تواند به مقدار قابل ملاحظه‌ای مقدار مونوکسیدکربن را کاهش دهد [۱۶].

روتوندی نحوه شکل‌گیری مخلوط سوخت و هوا و احتراق در یک موتور ۴ سیلندر پاشش مستقیم سوخت دارای انژکتور چرخشی را مورد بررسی قرار داده است. او در این پژوهش پاشش سوخت در حالت‌های همگن (بارهای کامل) و لایه‌ای (بارهای جزئی) را شبیه‌سازی و صحت‌گذاری کرده است و برای دوره‌های مختلف موتور و نسبت‌های مختلف EGR به بررسی و مقایسه نتایج پرداخته است. نتایج نشان داده است که اگر جریان پاشش سوخت با جریان داخل سیلندر هماهنگ نباشد، باعث بروز احتراق ناقص و همچنین افزایش مقدار گازهای آلاینده خروجی موتور می‌شود [۱۷].

هدف این پژوهش تعیین زاویه مناسب برای افشانه سوخت طرح پاشش مستقیم موتور EF7 در حالت بار چینه‌ای است. حجم محاسباتی موتور به کمک نرم افزار ICEM-CFD ANSYS شبکه‌بندی و عملکرد موتور به وسیله برنامه کیوا شبیه‌سازی شد. با انتقال محل افشانه به داخل محفظه احتراق،

¹ Computational Fluid Dynamics

² Los Alamos

³ Fortran

⁴ Exhaust Gas Recycle (EGR)

زوایای مختلف افشانه مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به کار حاصل از احتراق و میزان آلاینده های خروجی بهترین زاویه برای افشانه انتخاب شد.

جدول ۱- مشخصات موتور ملی (EF7)

تعداد سیلندر	۴ عدد
تعداد دریچه	۱۶ عدد
شعاع سیلندر	۳۹٫۳ میلیمتر
کورس پیستون	۸۵ میلیمتر
طول شاتون	۱۴۵ میلیمتر
حجم جابه جایی هر سیلندر	۴۳۰ سی سی
نسبت تراکم	۱۰٫۸
زاویه باز شدن دریچه ورودی	۸ درجه زاویه لنگ قبل از نقطه مرگ بالا
زاویه بسته شدن دریچه ورودی	۵۶ درجه زاویه لنگ بعد از نقطه مرگ پایین
زاویه باز شدن دریچه خروجی	۲۹٫۵ درجه زاویه لنگ قبل از نقطه مرگ پایین
زاویه بسته شدن دریچه خروجی	۲۴٫۵ درجه زاویه لنگ بعد از نقطه مرگ بالا
زاویه شروع پاشش سوخت	۲۹۰ درجه زاویه لنگ قبل از باز شدن دریچه ورودی
مدت زمان پاشش سوخت	۲۸۸ درجه زاویه لنگ
زاویه شروع جرقه	۱۲ درجه زاویه لنگ قبل از نقطه مرگ بالا

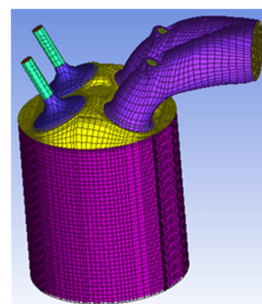
این پژوهش موتور در حالت بنزین سوز به صورت چرخه باز شبیه سازی شده است. مشخصات موتور در جدول شماره ۱ آمده است. همچنین شبکه محاسباتی تولید شده در نرم افزار ICEM-CFD ANSYS در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

برای ایجاد شبکه ابتدا هندسه مورد نظر بلوک بندی شد. سپس تعداد سلول های محاسباتی هر بلوک توسط کاربر مشخص و شبکه پیش فرض ایجاد شد. در نرم افزار ICEM-CFD ANSYS شبکه به دو صورت سازمان یافته و غیر سازمان یافته قابل تعریف می باشد که برای برنامه KIVA-3V از شبکه محاسباتی سازمان یافته استفاده می شود. در پایان اجزای موتور و ناحیه های مختلف و ارتباط میان آنها تعریف شد. به این ترتیب با انتخاب گزینه ایجاد فایل خروجی، فایل itape17 ایجاد می شود. این فایل به عنوان شبکه محاسباتی ورودی ورودی برنامه کیوا استفاده شد.

برای بررسی تعداد مناسب سلول های محاسباتی، چندین بار اندازه سلول های شبکه تغییر داده شده و کوچک شد. سپس برنامه برای هر یک از این شبکه ها اجرا شد. برنامه برای شبکه های محاسباتی که دارای ۷۰، ۸۵، ۹۳ و ۱۰۳ هزار سلول بودند اجرا شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد سلول های محاسباتی از ۹۳ هزار سلول به ۱۰۳ هزار سلول، فشار داخل سیلندر به اندازه کمتر از ۲ درصد تغییر کرد. در صورتی که زمان لازم برای اجرای نرم افزار به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافت. به همین دلیل شبکه محاسباتی دارای ۹۳ هزار سلول برای شبیه سازی انتخاب شد.

۳- معادلات حاکم در KIVA-3V

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، معادلات مقدار حرکت، معادلات انرژی، معادلات بقای اجزای شیمیایی، معادلات آشفستگی و معادلات حالت می باشد. با توجه به این که تعداد معادلات در جریان دوفازی برای فازهای گاز و مایع زیاد می باشد، ذکر همه معادلات در این مقاله ممکن نیست. برنامه KIVA-3V حل جریان های سه بعدی ناپایا، تراکم پذیر، متلاطم و واکنشی را به روش حجم محدود انجام می دهد که در شبیه سازی عملکرد موتورهای درونسوز کاربرد فراوانی دارد. زیر برنامه های اصلی به کار رفته در برنامه مذکور عبارتند از: مدل آشفستگی K-ε برای جریان متلاطم درون محفظه سیلندر، مدل TAB برای شکست قطره، معادله فروسلینگ برای تبخیر، احتراق ماگنوسن-هجرتاگر و آرنیوس و مدل زلدویچ توسعه یافته برای محاسبه NO_x. همچنین محاسبه آلاینده های HC و CO از طریق واکنش های تعادلی می باشد. تمامی معادلات حاکم در مراجع [۱۸، ۱۹ و ۲۰] آمده است.



شکل ۱- شبکه محاسباتی تولید شده در نرم افزار ANSYS ICEM-CFD

۲- الگو سازی و ایجاد شبکه

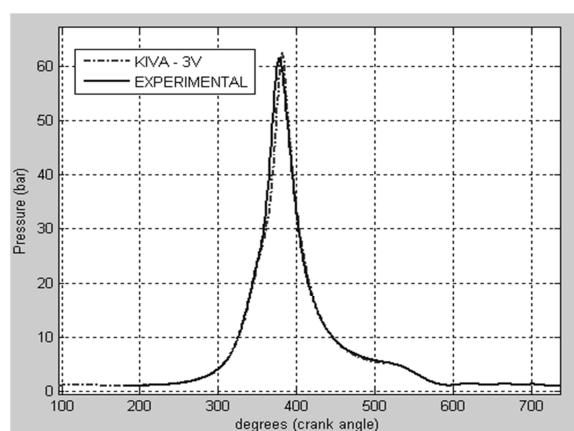
موتور مورد بررسی موتور ملی (EF7) است، که دارای چهار سیلندر بوده و امکان استفاده از بنزین و گاز طبیعی با پایه گازسوز را دارا می باشد. این موتور، ۱٫۷ لیتری و دارای ۱۶ دریچه است که با دو میل بادامک باز و بسته می شوند و میل بادامک دریچه های ورودی مجهز به سامانه زمان بندی متغیر می باشد. در

۴- صحنه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی

در این پژوهش ابتدا برنامه KIVA-3V برای حالت پایه موتور به صورت پاشش در راهگاه ورودی اجرا شد. برای این کار موتور از ۲۹۷ درجه زاویه لنگ زودتر از باز شدن دریچه ورودی یا ۷ درجه زاویه لنگ قبل از شروع پاشش سوخت تا ۱۴/۵ درجه زاویه لنگ بعد از باز شدن دریچه خروجی شبیه‌سازی شد. همچنین از موتور واقعی در شرایط موتور گرم و دور موتور RPM ۳۰۰۰ داده‌برداری انجام شد. سپس صحنه‌گذاری بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی انجام شد. عمل صحنه‌گذاری بر اساس فشار درون سیلندر بر حسب زاویه لنگ انجام گردید که نتایج مربوطه در شکل شماره ۲ آمده است. با توجه به شکل شماره ۲ نتایج شبیه‌سازی و تجربی انطباق قابل قبولی دارند. فقط از ابتدای مرحله احتراق تا رسیدن به حداکثر فشار، اختلاف فشار اندکی بین نتایج شبیه‌سازی با مقادیر تجربی مشاهده می‌شود. از مهم‌ترین عوامل بروز این اختلاف جزئی می‌توان به چشم‌پوشی از اصطکاک میان دیواره سیلندر و پیستون در شبیه‌سازی اشاره کرد. همچنین احتمال وجود ناخالصی در سوخت نسبت به بنزین استاندارد، در هنگام کار آزمایشگاهی از دیگر عوامل بروز اختلاف میان نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌باشد.

انطباق بین داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان از دقت بالای شبیه‌سازی یک سیلندر دارد که با هر یک از سیلندرهایی موتور واقعی قابل مقایسه می‌باشد. به همین جهت با شبیه‌سازی یک سیلندر می‌توان نتایج را به هر ۴ سیلندر موتور ملی تعمیم داد.

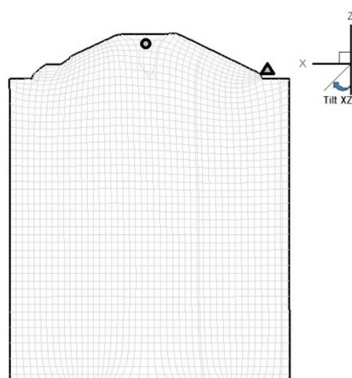
داده‌های آزمایشگاهی در شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) داده‌برداری شده است.



شکل ۲- نمودار فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ

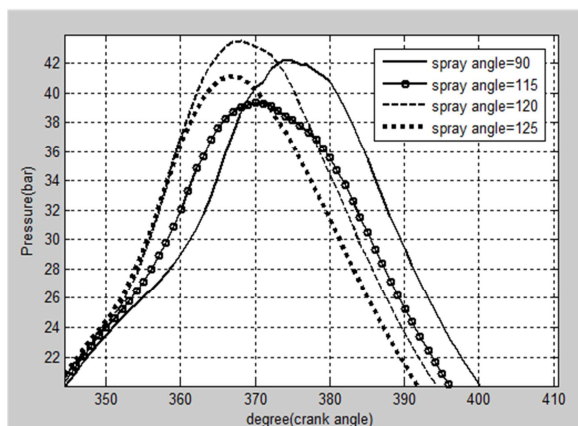
۵- تغییر الگوی پاشش

در موتورهای GDI در حالت کار با بار چینه‌ای مقدار سوخت کمتری نسبت به شرایط استوکیومتری پاشش می‌شود. با این وجود غلظت سوخت در اطراف شمع زیادتر از سایر نواحی می‌باشد و به همین دلیل احتراق به نحو مطلوبی صورت می‌گیرد. برای دستیابی به این حالت، راهکارهای مختلفی وجود دارد. هدایت فواره سوخت به سمت شمع به کمک طرح تاج پیستون، هدایت فواره سوخت با جریان هوای ورودی به سیلندر و هدایت فواره سوخت با نازل از راهکارهای مختلف مورد استفاده می‌باشند. البته می‌توان هم زمان از هر سه روش نیز استفاده کرد [۲۱]. محل قرارگیری سوخت‌پاش محدوده خاصی ندارد، فقط نباید در نزدیکی سوپاپ دود باشد. زیرا قرارگیری سوخت‌پاش نزدیک سوپاپ دود سبب خودسوزی می‌شود. در این پژوهش طبق داده‌هایی که از مراجع [۲۱] و [۲۲] استخراج شده است، سوخت‌پاش میان دریچه‌های هوا قرار گرفته و دور موتور RPM ۱۰۰۰ است. همچنین سوخت با فشار ۳۰ بار به داخل محفظه احتراق پاشش می‌شود. زمان شروع پاشش در مرحله تراکم و ۵۸ درجه زاویه لنگ قبل از شروع جرقه انتخاب شده است. مدت زمان پاشش سوخت ۴/۸ درجه زاویه لنگ انتخاب شده است که علت انتخاب این مدت زمان بسیار کوتاه، فشار زیاد پاشش سوخت می‌باشد. پاشش سوخت به صورت بار چینه‌ای و نسبت سوخت به هوا برابر ۱ به ۲۸ است. تعداد نازل‌های سوخت ۶ عدد است که با زاویه ۸/۵ و ۱۷ درجه در صفحه قائم و در راستای میل‌لنگ (XY) مطابق شکل ۳ و زاویه مخروط پاشش سوخت ۳۰ درجه و تغییرات زاویه مخروط پاشش ۲۵ درجه سوخت را تزریق می‌کنند.



شکل ۳- محل قرارگیری شمع (علامت دایره) و سوخت پاش (علامت مثلث) و زاویه پاشش سوخت (Tilt xz) در صفحه xz و $y=0$ در زاویه لنگ ۱۸۰ درجه

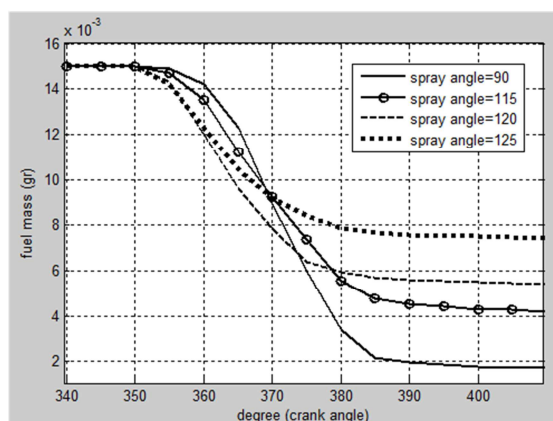
با ثابت نگه داشتن این داده‌ها، زاویه پاشش سوخت در صفحه عمود بر راستای میل‌لنگ (XZ) از ۳۵ تا ۱۳۰ درجه با فاصله ۵ درجه تغییر داده شد. سپس نتایج شبیه‌سازی با یکدیگر



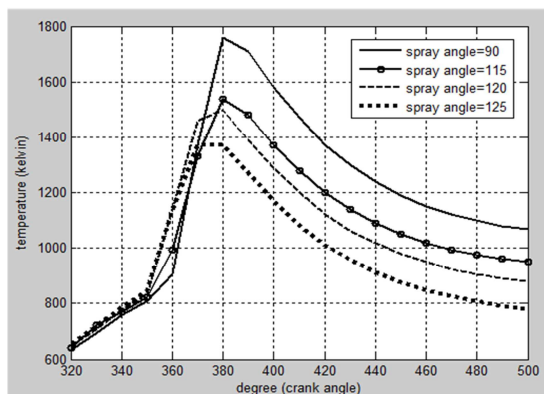
شکل ۴- فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ برای زوایای پاشش ۹۰، ۱۱۵، ۱۲۰ و ۱۲۵ درجه

با زاویه پاشش ۹۰ درجه در زمان خاموشی شعله کمتر از ۰/۰۰۲ گرم سوخت باقی مانده است در صورتی که در زوایای دیگر این مقدار بیشتر است و می‌تواند آلاینده‌گی را به شدت افزایش دهد.

مقدار دمای میانگین بر حسب زاویه لنگ در شکل شماره ۶ نیز این را نشان می‌دهند.



شکل ۵- مقدار کل سوخت داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ



شکل ۶- مقدار دمای میانگین بر حسب زاویه لنگ

مقایسه گردید. شبکه محاسباتی تولید شده برای سیلندر در صفحه xz و $y=0$ در زاویه لنگ ۱۸۰ درجه و محل قرارگیری شمع و سوخت پاش و زاویه پاشش سوخت ($Tilt\ xz$) در شکل ۳ نشان داده شده است.

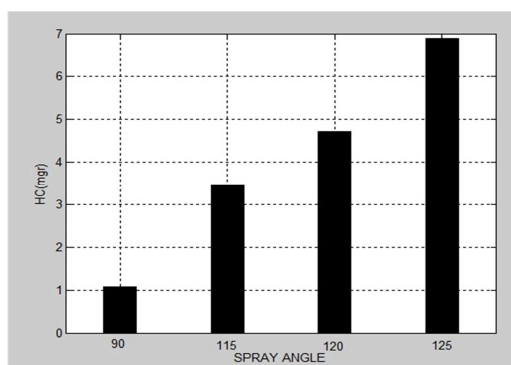
۶- بررسی نتایج

۶-۱- بررسی نتایج فشار داخل سیلندر

زمانی که سوخت بازوایه‌های ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۶۵، ۷۰، ۷۵ و ۸۰ درجه در صفحه xz پاشش شد، سوخت پاشش شده محترق نشد ولی در زوایای دیگر احتراق انجام شد. بهترین نتایج در زوایه‌های پاشش ۹۰، ۱۱۵، ۱۲۰ و ۱۲۵ درجه به دست آمد. فرآیند احتراق در موتورهای درونسوز می‌تواند به سه بخش اشتعال، پیشروی و انتشار شعله و خاموشی شعله تقسیم شود. اشتعال شعله با ایجاد جرقه شروع می‌شود و معمولاً ۵ تا ۱۰ درصد سوخت در این مرحله محترق می‌شود و افزایش فشار اندکی به دست می‌آید. در مرحله بعد حدود ۸۰ درصد سوخت در مرحله پیشروی شعله محترق می‌شود و فشار داخل سیلندر به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در آخر با شروع مرحله خاموشی شعله فشار به سرعت کاهش می‌یابد و مقداری از سوخت محترق و بقیه سوخت به صورت نسوخته در سیلندر باقی می‌ماند. افزایش فشار قبل از نقطه مرگ بالا کار مرحله تراکم را افزایش می‌دهد که این امر تلفات موتور را افزایش می‌دهد. با توجه به این نکته سه بخش فرآیند احتراق در موتور باید به گونه‌ای طراحی شود که کمترین مقدار فشار در قبل از نقطه مرگ بالا و بیشترین مقدار فشار بعد از نقطه مرگ بالا بدست آید.

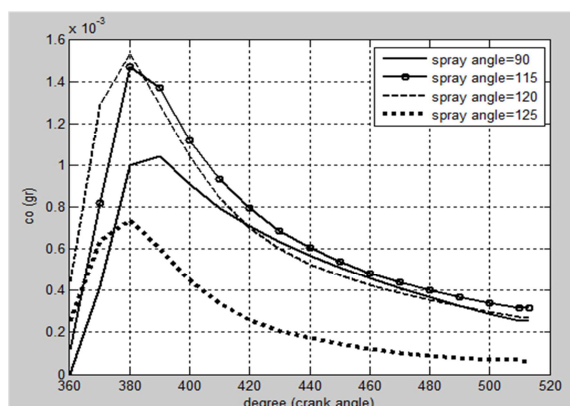
نتایج حل برای فشار بر حسب زاویه لنگ موتور پاشش مستقیم با زوایای پاشش مختلف برای مقایسه در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. بیشترین فشار در زاویه پاشش ۱۲۰ درجه به دست آمده است که مقدار آن برابر ۴۳/۵ بار و در ۲۰ درجه زاویه لنگ بعد از شروع جرقه ایجاد شده است. در زاویه ۹۰ درجه بیشترین فشار برابر ۴۲/۲ بار و در ۲۶ درجه زاویه لنگ بعد از شروع جرقه به دست آمده است. مقدار فشار با زاویه پاشش ۱۲۰ درجه در نقطه مرگ بالا بیشتر از زاویه پاشش ۹۰ درجه است و می‌توان نتیجه گرفت انتشار شعله در ۱۲۰ درجه سریعتر از ۹۰ درجه بوده و کار منفی این حالت بیشتر است. این نتیجه از روی داده‌های مقدار سوخت داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ در شکل شماره ۵ مشخص است. در زاویه پاشش ۹۰ درجه سرعت سوختن آرام‌تر بوده و سوخت به خوبی محترق می‌شود. خاموشی شعله در این زاویه تقریباً در ۵۲ درجه زاویه لنگ بعد از شروع جرقه اتفاق می‌افتد.

هیدروکربن نسوخته موجود در داخل سیلندر در هنگام باز شدن دریچه‌های خروجی برای زوایای پاشش با زوایای ۹۰، ۱۱۵، ۱۲۰ و ۱۲۵ درجه در شکل شماره ۹ نشان داده شده است. این مقدار برای زاویه پاشش ۹۰ درجه دارای کمترین مقدار و برابر ۱/۰۷ میلی گرم است.



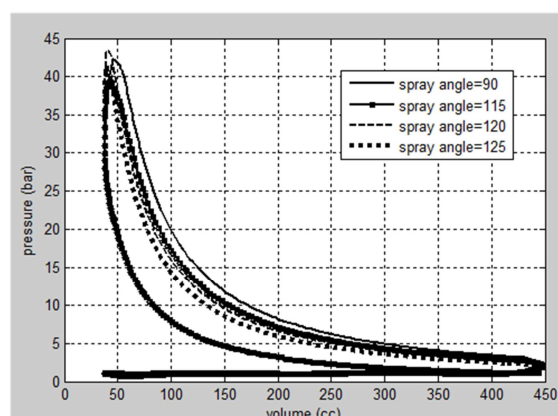
شکل ۹- مقدار هیدروکربن نسوخته موجود در داخل سیلندر در هنگام باز شدن دریچه‌های خروجی

مونوکسیدکربن یکی از آلاینده‌هایی است که با شروع احتراق سوخت تولید می‌شود. مونوکسیدکربن در تبدیل به دی‌اکسیدکربن مقداری انرژی آزاد می‌کند. در حالت بار چینه‌ای اکسیژن کافی برای تبدیل مونوکسیدکربن به دی‌اکسیدکربن وجود دارد. با توجه به این که شیب‌سازی در حالت بار چینه‌ای انجام شده است، مخلوط خیلی فقیر بوده است که همین باعث باقی ماندن مقدار بسیار کمی مونوکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته در هنگام باز شدن دریچه خروجی است. مقدار مونوکسیدکربن موجود در داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده است. مقدار مونوکسیدکربن موجود در هنگام باز شدن دریچه‌های خروجی در زاویه پاشش ۱۲۵ درجه کمتر از سایر موارد است.

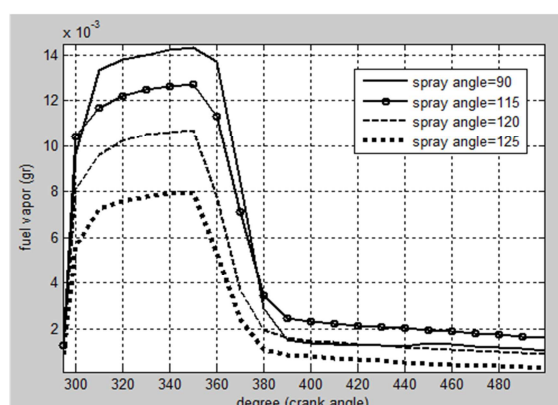


شکل ۱۰- مقدار مونوکسیدکربن موجود در داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ

مقدار مساحت داخل نمودار P-V نشان دهنده مقدار کار است. با توجه به شکل شماره ۷ مشخص است که بیشترین مقدار مساحت داخل شکل در زاویه پاشش ۹۰ درجه به دست می‌آید. در شکل شماره ۸ مقدار کل سوخت بخار شده داخل سیلندر بر حسب زاویه لنگ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در زاویه پاشش سوخت ۹۰ درجه سوخت بهتر تبخیر می‌شود. منحنی نزولی مقدار سوخت تبخیر شده بعد از زمان شروع جرقه نیز گویای اختلاط بهتر سوخت و هوا و احتراق بهتر سوخت است. در زوایای بیشتر پاشش، به دلیل کاهش طول افشانه سوخت و برخورد سوخت به دیواره محفظه احتراق، تبخیر سوخت و اختلاط سوخت و هوا ضعیف‌تر می‌شود. کاهش طول افشانه سوخت باعث کاهش پیشروی سوخت در هوا و کاهش چشمگیر مقدار اختلاط سوخت و هوا می‌شود. با افزایش ۵ درجه‌ای زاویه پاشش سوخت از ۱۱۵ درجه تأثیر این تغییر بر کاهش مقدار تبخیر سوخت کاملاً مشخص است.



شکل ۷- فشار داخل سیلندر بر حسب حجم سیلندر



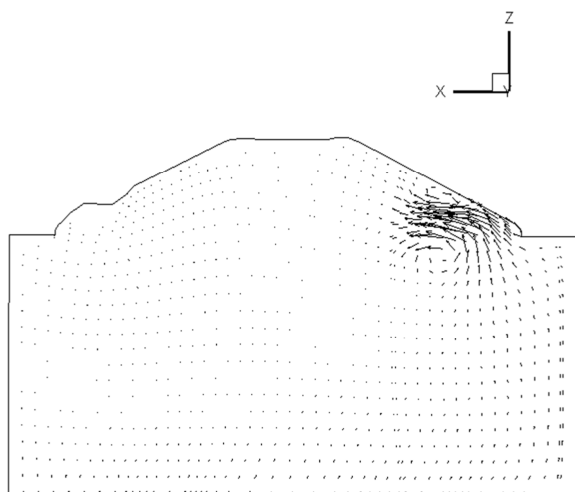
شکل ۸- مقدار کل سوخت بخار شده در سیلندر بر حسب زاویه لنگ

۲-۶- بررسی نتایج آلاینده‌گی

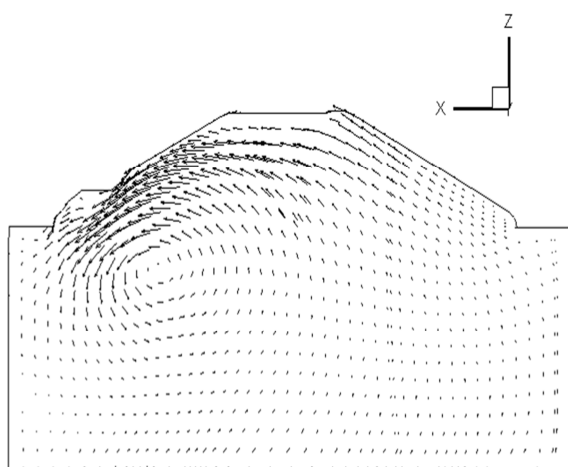
در زاویه پاشش ۱۲۵ درجه سوخت به صورت کامل محترق نمی‌شود و مقدار هیدروکربن نسوخته زیاد است. مقدار

۶-۳- بررسی کیفی نتایج

در این قسمت نتایج به صورت کیفی برای زاویه‌های مختلف بررسی می‌شوند. با توجه به این که پاشش مستقیم سوخت در اتاق احتراق باعث تغییر جریان‌های داخل سیلندر می‌شود، ابتدا تعامل افشانه سوخت با گاز فشرده داخل سیلندر ترسیم شده است. بردارهای سرعت در صفحه xz و $y=0$ در 1° و 10° درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت برای افشانه با زاویه پاشش 90° درجه در شکل‌های شماره ۱۳ و ۱۴ و در 10° درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت برای افشانه با زاویه پاشش 120° درجه در شکل شماره ۱۵ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پیشروی افشانه سوخت باعث توسعه و ایجاد بردارهای سرعت با اندازه‌های بزرگتر در تمام اتاق احتراق می‌شود. این امر باعث تبخیر و احتراق بهتر می‌شود.



شکل ۱۳- بردارهای سرعت در صفحه xz و $y=0$ با زاویه پاشش 90° درجه در 1° درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت

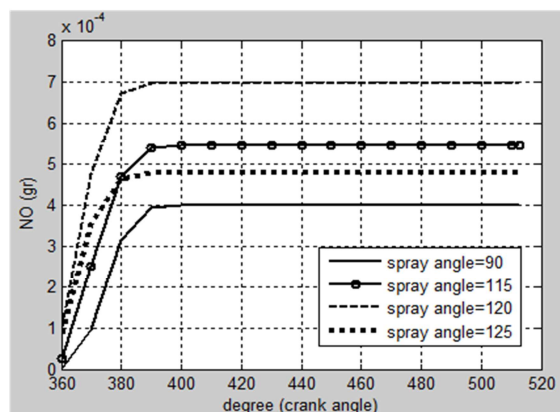


شکل ۱۴- بردارهای سرعت در صفحه xz و $y=0$ با زاویه پاشش 90° درجه در 10° درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت

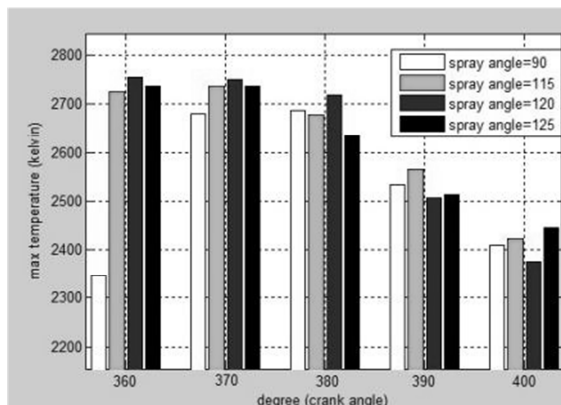
دلیل این امر عدم احتراق مقدار زیادی از سوخت است. ولی در موارد دیگر این مقدار تقریباً برابر است.

مقدار تولید اکسید نیتروژن به شدت به دما وابسته است و ثابت تعادل در معادله تولید آن با افزایش دما افزایش می‌یابد. با شروع احتراق دما افزایش می‌یابد و تولید اکسید نیتروژن نیز شروع می‌شود. با خاتمه احتراق تولید اکسید نیتروژن قطع و مقدار آن در داخل سیلندر ثابت می‌ماند. کاهش دمای داخل سیلندر که به علت احتراق خیلی فقیر می‌باشد، باعث کاهش تولید اکسید نیتروژن شده است.

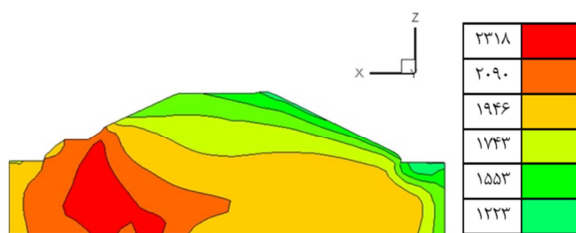
مقدار تولید اکسید نیتروژن بر حسب زاویه لنگ در شکل شماره ۱۱ نشان داده شده است. بیشترین مقدار تولید اکسید نیتروژن در زاویه پاشش 120° درجه و کمترین مقدار در 90° درجه به دست می‌آید. در شکل شماره ۱۲ مقدار بیشترین دمای داخل سیلندر در 12° ، 22° ، 32° ، 42° و 52° درجه زاویه لنگ بعد از شروع جرقه نشان داده شده است. مقدار تولید اکسید نیتروژن رابطه مستقیم با مقدار بیشترین دمای داخل سیلندر دارد. از 42° درجه زاویه لنگ بعد از شروع جرقه به بعد با کاهش دما تولید اکسید نیتروژن قطع می‌شود.



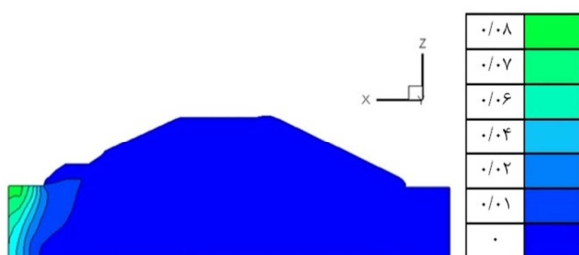
شکل ۱۱- مقدار تولید اکسید نیتروژن بر حسب زاویه لنگ



شکل ۱۲- حداکثر دمای داخل سیلندر در 12° ، 22° ، 32° ، 42° و 52° درجه زاویه لنگ بعد از شروع جرقه



شکل ۱۸- مقادیر هم مرتبه دما در صفحه XZ و $y=0$ با زاویه پاشش ۹۰ درجه برای افشانه با زاویه پاشش ۹۰ درجه در ۱۱۰ درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت



شکل ۱۹- مقادیر هم مرتبه جز جرمی سوخت در صفحه XZ و $y=0$ برای افشانه با زاویه پاشش ۹۰ درجه در ۱۱۰ درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت

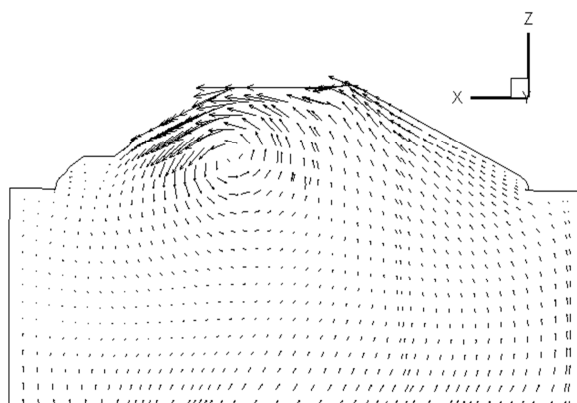
در جدول‌های شماره ۲ و ۳ نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف در زاویه‌های پاشش ۹۰، ۱۱۵، ۱۲۰ و ۱۲۵ درجه آمده است.

جدول ۲- مقدار بیشترین فشار داخل سیلندر، مقدار کار، مقدار دمای میانگین و بیشترین دمای سیلندر در زوایای پاشش مختلف

بیشترین دمای سیلندر (کلوین)	مقدار میانگین دمای سیلندر (کلوین)	مقدار کار (ژول)	بیشترین فشار داخل سیلندر (بار)	زاویه پاشش در صفحه XZ
۲۶۸۶	۱۵۸۴	۲۵۲٫۸۶	۴۲٫۲	۹۰ درجه
۲۷۳۶	۱۳۷۳٫۲	۱۹۸٫۰۵	۳۹٫۳	۱۱۵ درجه
۲۷۵۶	۱۲۸۵٫۶	۱۷۹٫۰۶	۴۳٫۵	۱۲۰ درجه
۲۷۳۷	۱۱۶۷	۱۴۲٫۳۷	۴۱٫۱	۱۲۵ درجه

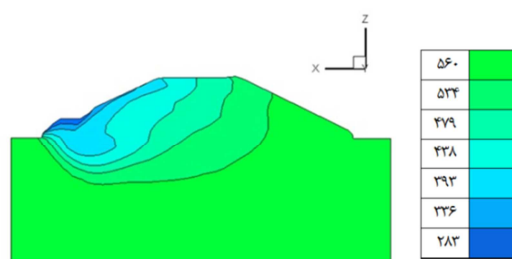
۷- نتیجه‌گیری

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها، زاویه پاشش ۹۰ درجه به عنوان بهترین زاویه پاشش سوخت در شرایط کاری تعیین شده برای موتور ملی پیشنهاد می‌شود. در این حالت سوخت و هوا بهتر مخلوط می‌شود. فشار داخل سیلندر در این زاویه پاشش به خوبی افزایش می‌یابد و کار حاصل در این زاویه پاشش از زوایای دیگر بیشتر است. همچنین مقدار هیدروکربن نسوخته و تولید اکسید نیتروژن به طور چشمگیری کمتر از موارد دیگر است.

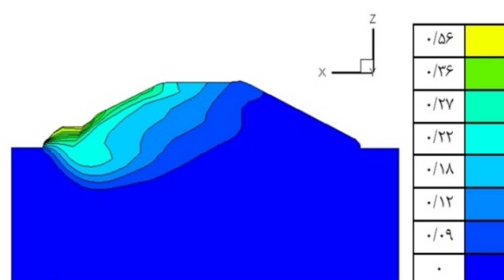


شکل ۱۵- بردارهای سرعت در صفحه XZ و $y=0$ با زاویه پاشش ۱۲۰ درجه در ۱۰ درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت

مقادیر هم مرتبه دما و جز جرمی سوخت در صفحه XZ و $y=0$ برای افشانه با زاویه پاشش ۹۰ درجه در ۱۰ و ۱۱۰ درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت در شکل‌های شماره ۱۶ تا ۱۹ ترسیم شده است.



شکل ۱۶- مقادیر هم مرتبه دما در صفحه XZ و $y=0$ برای افشانه با زاویه پاشش ۹۰ درجه در ۱۰ درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت



شکل ۱۷- مقادیر هم مرتبه جز جرمی سوخت در صفحه XZ و $y=0$ برای افشانه با زاویه پاشش ۹۰ درجه در ۱۰ درجه زاویه لنگ بعد از شروع پاشش سوخت

[5] Sanaye S., Mokhtarifard A., "Simulation of performance cycle and forecasting of performance parameters in spark ignition engines", The Journal of Engine Research, vol. 13, pp. 53-65, 2008.

[6] Sun, J., Kolmanovsky, L., Brehob, D., Cook, J., Buckland, J., and Haghgooe, M., "Modeling and control of gasoline direct injection stratified charge (DISC) engines", IEEE 0-7803-5446-X/99, 1999.

[7] Etheridge, J., Mosbach, S., Kraft, M., Wu, H., Collings, N., "Modelling soot formation in a DISI engine", Proceedings of the Combustion Institute 33 pp. 3159-3167, 2011.

[8] Nishida, K., Tian, J., Sumoto, Y., Long, W., Sato, K and Yamakawa, M., "An experimental and numerical study on sprays injected from two-hole nozzles for DISI engines", Contents Lists Available at ScienceDirect, Fuel 88, pp. 1634-1642.

[9] Ding, N., Weimin, G., Ming, C. and Xiao-mao, Z., "Spray Characteristics of New Generation Multi-hole Injector for Spark-ignition Gasoline Engines with Direct Fuel Injection", IEEE 978-0-7695-4080-1/10, 2010.

[10] Xiaolong, Y., Jia, Y. and Kaiyao, H., "The effect of injector position on the performance of a homogeneous direct injection gasoline engine", IEEE 978-1-4244-8039-5/11, 2011.

[11] Poorghasemi, k., Ommi, F., Esfahanian, V., Tanabi, H., "Investigation of the soot and NO emission reduction mechanism in DI diesel engines by means of split injection strategy", The Journal of Fuel and Combustion, vol 2, 2011.

[12] Ghafouri, J., Doustdar, M. M., Pirouzpanah, V., "Numerical simulation of a DI diesel engine in full and in partial loads", Aerospace Mechanics Journal, vol. 4, no. 2, pp. 57-70, 2011.

[13] Nasiry toosi, a., Sadeghy, h., "Analysis of the effect of air to fuel ratio and EGR in gas engine Performance and Emissions", 13th Annual International Conference on Mechanical Engineering, Isfahan University, 2005.

[14] Mirmohamadi, A., "Natural Gas Direct Injection Stratified Charge with Sparke Ignition Engines Modeling", ph.d thesis, Tarbiat Modares Univercity, September 2011.

[15] Ommi, F., Farajpor, M., Mirmohamadi, A., "Numerical study of injection timing and angle effect on rate of fuel evaporation and emissions of multi point injection gasoline engine", Aerospace Mechanics Journal, vol. 5, no. 1, pp. 51-62, 2009.

[16] Bohac, S. and Assanis, D., "Effect of exhaust valve timing on gasoline engine performance and hydrocarbon emissions", SAE Technical pp. 2004-01-3058, 2004.

[17] Rotondi, R., "Modeling mixture formation in a gasoline direct injection engine, Journal of Applied Mechanics", vol. 73, 2006.

[18] Amsden, A. A., OÖRourke, P. J., Butler, T. D., "KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays", Los Alamos National Laboratory, 1989.

جدول ۳- مقدار هیدروکربن نسوخته، مونوکسیدکربن و اکسید

نیتروژن موجود در زمان باز شدن دریچه های خروجی در زاویه پاشش ۹۰، ۱۱۵، ۱۲۰ و ۱۲۵ درجه

مقدار اکسید نیتروژن در زمان باز شدن دریچه های خروجی (میلی گرم)	مقدار مونوکسیدکربن در زمان باز شدن دریچه های خروجی (میلی گرم)	مقدار هیدروکربن نسوخته در زمان باز شدن دریچه های خروجی (میلی گرم)	زاویه پاشش در صفحه XZ
۰/۳۹۹	۰/۲۵۵	۱/۰۷	۹۰ درجه
۰/۵۴۵	۰/۳۱۵	۳/۴۶	۱۱۵ درجه
۰/۶۹۵	۰/۲۶۸	۴/۷۲	۱۲۰ درجه
۰/۴۷۷	۰/۰۵۵۷	۶/۸۹	۱۲۵ درجه

در زاویه های پاشش ۹۰ و ۱۲۰ درجه بیشترین مقدار فشار ایجاد می شود. مقدار بیشترین فشار در زاویه پاشش ۹۰ درجه ۲/۹ درصد نسبت به ۱۲۰ درجه کمتر است ولی مقدار کار انجام شده در یک چرخه ۲۹/۲ درصد بیشتر است. مقدار تولید آلاینده های هیدروکربن نسوخته و اکسید نیتروژن در زاویه پاشش ۹۰ درجه به ترتیب ۷۷ و ۴۲/۶ درصد و تولید مونوکسیدکربن ۴/۸ درصد کم تر از زاویه پاشش ۱۲۰ درجه است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) به دلیل در اختیار گذاشتن نتایج تجربی موتور شبیه سازی شده کمال تشکر و قدردانی خود را اعلام می دارند.

مراجع

- [1] Siano, d., "Fuel injection", Book, Published by Sciyo, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2010.
- [2] Jazayeri, S. A., Zia Basharhagh M., Bavandpor M., and Keshavarz M., "Analysis of air fuel mixture formation in gasoline direct injection SI engines", The Journal of Engine Research, vol. 13, pp. 45-52, 2008.
- [3] Alex, C., Alkidas, S., Tahry, E., "Contributors to the fuel economy advantage of DISI engines over PFI engines", SAE technical pp. 2003-01-3101, 2003.
- [4] Montazeri-Gh M., Naderpour A. "Simulation of fuel consumption and exhaust emissions in dual fuel samand vehicle and verification with NEDC modal test results", The Journal of Engine Research, vol. 15, pp. 11-16, 2009.

- [19] Amsden, A. A., "A KIVA program with Block-Structured mesh for complex geometries", Los Alamos National Naboratory.
- [20] Amsden, A. A., "Block-Structured KIVA program for engines with vertical or canted valves", Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [21] Ashgriz, N., "Handbook of atomization and sprays: theory and applications", springer, 2011.
- [22] Sementa P., Vaglieco B., Catapano F., "Thermodynamic and optical characterizations of a high performance GDI engine operating in homogeneous and stratified charge mixture conditions fueled with gasoline and bio-ethanol", Fuel 96 204–219, 2012.