

بررسی صحت روش عددی تعقیب ذرات برای مطالعه توزیع گازهای تزریق شده به مانیفولد ورودی به کمک آزمایش

پیمان باشی شهابی
حمید نیازمند
سیدمحمد رضا مدرس رضوی
دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد
دانشیار، بخش مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
استاد، بخش مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این تحقیق صحت و همچنین دقت روش تعقیب ذرات برای تخمین توزیع گازهای تزریق شده (بازگردانده شده) به مانیفولد ورودی در بین راهگاهها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور آزمایشهای متعددی در شرایط کاری مختلف و با تزریق گاز با نرخهای متفاوت بر روی موتور EF7-TC انجام شده است. روش آزمایشگاهی بر اساس تزریق گاز LPG و تاثیر آن بر مقدار λ محصولات احتراق هر سیلندر طراحی گردیده است. میزان سهم هر سیلندر از گازهای تزریق شده با انجام محاسباتی ساده و به کمک مقادیر اندازه گیری شده از آزمایش تعیین شده و نتایج عددی نیز به کمک شرایط مرزی حاصل از مدل یک بعدی کالیبره شده با موتور نمونه بدست آمده است. به منظور مقایسه و ارزیابی بهتر نتایج، بر اساس تجربیات حاصل از تحقیقات قبلی چهار نقطه تزریق متفاوت بر روی مانیفولد ورودی در نظر گرفته شد. با مقایسه نتایج مشخص گردید که روش تعقیب ذرات می تواند نحوه توزیع گازهای تزریق شده به مانیفولد ورودی را در بین راهگاههای مانیفولد از نظر کیفی بخوبی پیش بینی کند. در بین نتایج تنها یک مورد اختلاف کیفی در نتایج بدست آمده از آزمایش و روش عددی مشاهده شد. همچنین مشخص گردید که مطابق انتظار با کاهش نرخ تزریق گازهای بازگردانده شده به مانیفولد ورودی بر دقت روش تعقیب ذرات افزوده شده و اختلاف کمی نتایج عددی و آزمایشگاهی کمتر می شود. بعلاوه با مقایسه نتایج حاصل از نقاط تزریق مختلف مشاهده گردید که دقت روش تعقیب ذرات برای نقاطی که توزیع یکنواخت تری را بدست می دهند بیشتر است. کلمات کلیدی: گازهای بازگردانده شده، نقطه تزریق، روش تعقیب ذرات، نرخ تزریق، دور موتور

Validation of Particle Tracking Based Method to Study the Distribution of Gases Injected into the Intake Manifold

P. B. Shahabi Ph. D. student of Mech. Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
H. Niazmand Associate professor of Mech. Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, Mashhad
M. R. Razavi Professor of Mech. Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Engineering, Mashhad

Abstract

In this study, validity and accuracy of the particle tracking method for estimating the distribution of recirculated gases between intake manifold runners have been investigated. For this purpose, several experiments have been performed on EF7-TC engine on various working conditions and with different rates of recirculated gas injection. The experimental method is designed based on the LPG gas injection and its effect on the amount of λ of each cylinder exhaust gases. Contribution of each cylinder of the injected gas is determined by performing a simple calculation on the measured values obtained from experiments. In addition the numerical results are calculated by using the boundary conditions derived from 1-D model which is calibrated with the EF7-TC engine. In order to better compare and evaluate the results, based on experiences of previous researches, four different injection points on the intake manifold was considered. Results comparison showed the particle tracking method can qualitatively predict the distribution of recirculated gases between the intake manifold runners with a high confidence level. Only one qualitative difference between experimental and numerical results is observed. Besides, it is revealed that with decreasing the recirculated gas rate the accuracy of particle tracking method is enhanced and differences between experimental and numerical results are decreased. In addition, by comparing the results of four injection points it was showed that the particle tracking method is more accurate for injection points which distribute recirculated gases more uniformly.

Keywords: Recirculated, Gases, Injection Point, Particle Tracking Method, Injection Rate, Engine Speed

۱- مقدمه

سالانه میلیونها نفر در اثر آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند که ۹۰ درصد آنان در کشورهای توسعه یافته هستند. در بعضی کشورها تعداد افرادی که در اثر همین عامل جان خود را از دست می‌دهند بیشتر از قربانیان سوانح رانندگی است. بهترین شیوه مهار آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای ازت (NO_x) و هیدروکربن‌ها (HC) در پیش گرفتن اقدامات مهارکننده در مورد اتومبیل‌ها است.

از سالها قبل استفاده از روش بازگردانی دود (EGR) به منظور کنترل و کاهش اکسیدهای ازت در موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار گرفته که کاملاً اثر بخش و موثر بوده است [۱-۶]. در این روش درصدی از محصولات احتراق از سیستم خروجی به منیفولد ورودی هدایت می‌شود که باعث کاهش دمای احتراق می‌گردد. چون دمای بالا مهمترین عامل تولید اکسیدهای ازت در موتور خودروها است به کمک این روش می‌توان تولید اکسیدهای ازت را کنترل کرد.

از سوی دیگر، سوخت نسوخته خودروهایی که بنزین مصرف می‌کنند منبع اصلی انتشار هیدروکربن‌ها است. تخلیه بخار بنزین از منبع سوخت و همچنین گازهای رخنه‌ای از محفظه روغن در خودروها از عوامل اصلی انتشار هیدروکربن‌ها در محیط هستند. گازهای رخنه‌ای (blowby) حاصل نفوذ مخلوط سوخت و هوا و همچنین مقدار کمی محصولات احتراق به محفظه روغن موتور است. قوانین آلاینده‌گی موجود به تولید کنندگان موتور اجازه نمی‌دهد که گازهای رخنه‌ای تولید شده را به محیط تخلیه کنند. امروزه راهکار مورد استفاده برای جلوگیری از آلاینده‌گی حاصل از گازهای رخنه‌ای و بخارات بنزین، بازگرداندن این گازها به محفظه احتراق و سوزاندن آنها است [۷].

هر دو روش بازگردانی دود و گازهای رخنه‌ای از این نظر که با به خدمت گرفتن سیستمی که گازهای مورد نظر را به منیفولد ورودی باز می‌گرداند کار می‌کنند به یکدیگر شبیه هستند. همچنین اگر روش بازگردانی این گازها به درستی و با دقت به خدمت گرفته نشود، به کاهش قابل ملاحظه توان و افزایش سایر آلاینده‌های موتور منجر خواهد شد. یکی از دلایل بروز این مشکلات عدم توزیع یکنواخت دود یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده در راهگاههای ورودی برای هر سیلندر است [۸-۱۲]. بنابراین به کار گرفتن سیستمی که دود یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده را بطور یکنواخت بین راهگاههای ورودی سیلندر توزیع نماید اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. در تحقیقات قبلی [۱۳-۱۵] نشان داده شده است که موقعیت و تعداد نقاط تزریق دود بازگردانده شده یا گازهای رخنه‌ای تأثیر

بسیاری در توزیع یکنواخت آنها بین سیلندرها دارند. روشهایی که تا کنون برای مطالعه توزیع دود یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده به منیفولد ورودی بکار گرفته شده محدود به دو روش تزریق CO_2 و روش حرارتی بوده است. اخیراً نویسندگان مقاله روش تعقیب ذرات را برای بررسی نحوه توزیع گازهای رخنه‌ای یا دود بازگردانده شده به منیفولد معرفی و مزایای آنرا نسبت به دو روش قبلی تشریح کرده‌اند [۱۳] و [۱۴]. با توجه به مزایای روش تعقیب ذرات به کمک این روش بخوبی می‌توان نقش عوامل مختلف را در چگونگی توزیع گازهای تزریق شده به منیفولد مورد بررسی قرار داد.

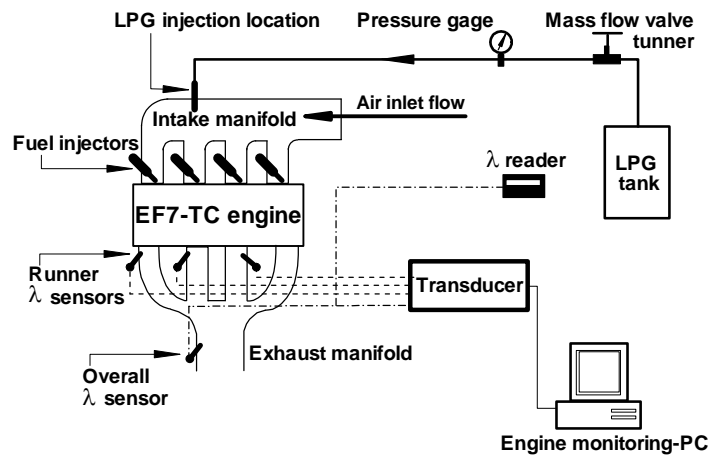
در این تحقیق با مطالعه و بررسی نتایج آزمایشگاهی تزریق گاز به منیفولد ورودی به بررسی صحت روش تعقیب ذرات پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه تحقیقات قبلی به صورت عددی و بر روی موتور EF7-TC انجام شده بود برای آزمایش نیز از موتور مذکور استفاده شده است.

۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش

در این تحقیق با توجه امکانات موجود از تزریق سوخت (گاز مایع) به منیفولد ورودی و تأثیر آن بر مقادیر λ هر یک از سیلندرها، استفاده شده است. از آنجایی که فرض می‌کنیم عواملی مانند دما یا چگالی گاز تأثیر قابل توجهی بر توزیع گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی نداشته باشند می‌توان در نظر گرفت که سوخت تزریق شده مشابه محصولات احتراق یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده به منیفولد ورودی در بین سیلندرها توزیع می‌شود. به این ترتیب با مقایسه مقادیر λ بدست آمده برای دو حالت بدون تزریق و با تزریق گاز مایع می‌توان نحوه توزیع و سهم هر سیلندر از گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی را محاسبه و تخمین زد. بنابراین در یک دور موتور مشخص، آزمایش ابتدا بدون تزریق گاز انجام خواهد گرفت و مقادیر مورد نظر اندازه‌گیری خواهند شد که برای اختصار این شرایط را حالت پایه می‌نامیم. آزمایشهای بعدی با ثابت نگه داشتن دور موتور و هوای ورودی به منیفولد، با تزریق گاز به میزان مورد نظر و از نقاط تزریق مطلوب انجام خواهد گرفت.

لازم به ذکر است که برای ثابت نگه داشتن شرایط کاری موتور، در این آزمایش باید از یک ECU باز که امکان تغییر و کنترل دستی پارامترهای آن وجود داشته باشد استفاده کرد. با توجه به تغییر مقدار λ و اندازه‌گیری آن در شرایطی که به منیفولد ورودی LPG تزریق می‌شود و محاسباتی که در ادامه

تشریح شده‌اند می‌توان سهم هر سیلندر از گازهای تزریق شده (که در اینجا همان LPG تزریق شده است) را تخمین زد و با نتایج بدست آمده از روش تعقیب ذرات مقایسه و صحت کارکرد این روش را مطالعه نمود. بر این اساس شکل ۱ طرحواره چیدمان تجهیزات آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره چیدمان تجهیزات نصب شده بر روی بستر تست موتور EF7 برای تعیین چگونگی توزیع گازهای تزریقی به منیفولد ورودی

انجام می‌گیرد. حال با ثابت نگه داشتن دبی هوا و تزریق گاز LPG از محل مورد نظر مقادیر λ با حالت قبل متفاوت خواهد بود چرا که توزیع گاز LPG تزریق شده مطمئناً در همه راهگاهها یکنواخت نیست. با توجه به ثابت بودن هوا و نسبت هوا-به-سوخت استوکیومتری و همچنین معین بودن دبی سوخت تزریق شده از طریق انژکتورها با انجام محاسباتی نه چندان پیچیده که در ادامه تشریح خواهند شد، می‌توان مقدار سهم هر سیلندر را از گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی تعیین کرد.

در جدول ۱ نوع و دقت تجهیزات مورد استفاده در آزمایش ارائه شده است. همچنین مشخصات موتور EF7 که بر روی بستر آزمایش نصب شده است در جدول ۲ قابل ملاحظه است.

همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است برای شبیه-سازی تزریق گاز به منیفولد ورودی از یک کپسول گاز مایع (LPG) استفاده شده است. با نصب λ سنسور در راهگاههای خروجی مربوط به هر یک از سیلندرها و همچنین راهگاه کلی مسیر آگروز می‌توان نسبت هوا-به-سوخت واقعی به هوا-به-سوخت استوکیومتری را اندازه‌گیری کرد. لازم به ذکر است که به علت عدم جایابی صحیح امکان نصب λ سنسور بر روی راهگاه خروجی سیلندر اول میسر نبود. با انجام آزمایش در شرایط معین بدون تزریق گاز (حالت پایه) و ثبت مقادیر λ و مصرف سوخت، دبی جرمی هوای مصرفی معین خواهد شد. لازم به ذکر است که دبی هوا با تقریب خوبی بطور یکنواخت بین سیلندرها توزیع و مقدار تزریق سوخت، با توجه به اینکه تمامی انژکتورها از ECU فرمان دریافت می‌کنند، کاملاً یکسان

جدول ۱- مشخصات تجهیزات آزمایشگاهی بستر تست

پارامتر اندازه‌گیری شده	نوع وسیله	دقت/محدوده مجاز
دمای محصولات احتراق	ترموکوپل نوع K	$\pm 1^\circ\text{C}$ تا 1200°C
مصرف سوخت (بنزین)	حداکثر دبی ۱۰ L/min حداکثر فشار ۳۰۰۰ psi	± 5 cc/min
λ	سنسور ۱۰۰، ۸۰ و $300\ \Omega$ زمان پاسخ ۱۰ ms	۰٫۷ - ۱٫۴

۳- چگونگی توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها در

روش آزمایشگاهی

از آنجاکه لازم است دبی معینی از گاز LPG به منیفولد ورودی تزریق شود باید مکانیزمی برای تنظیم دبی گاز در نظر گرفت. چون روش متداول برای بیان دبی دود یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده به منیفولد ورودی نسبت دبی این گازها به دبی هوای ورودی به منیفولد است در اینجا از روشی به شرح ذیل برای تخمین این نسبت استفاده می‌شود.
در ابتدا لازم به ذکر است که به منظور جلوگیری از تداخل

کمیت‌های ذکر شده در محاسبات و ارجاع ساده‌تر به مقادیر اندازه‌گیری شده در منیفولد خروجی کمیت‌های بدون بالا نویس به مقادیر کلی و مقادیر همراه با بالا نویس " ' " بیان کننده مقادیر مربوط به راهگاههای منیفولد خروجی هستند. به عنوان مثال برای اشاره کردن به λ های مربوط به راهگاههای خروجی سیلندرهایی ۱ تا ۴ به ترتیب از نمادهای λ' ، λ'' ، λ''' و λ'''' استفاده می‌کنیم و برای λ های مربوط به راهگاه کلی اگزوز از نماد ساده λ استفاده خواهد شد.

جدول ۲- مشخصات موتور EF7-TC

عنوان مشخصه	مقدار	واحد
نام موتور	EF7 Turbocharged	
تعداد سیلندرها	۴	
نحوه قرارگیری سیلندرها	خطی	
قطر سیلندر	۷۸٫۶	mm
کورس سیلندر	۸۵	mm
حجم جابه‌جا شده	۱۷۰۰	cm ³
نسبت تراکم	۹٫۵	
حداکثر توان	۱۱۰	kW
سرعت در حداکثر توان	۵۵۰۰	rpm
حداکثر گشتاور	۲۱۵	N.m
سرعت در حداکثر گشتاور	۲۲۰۰	rpm
تعداد سوپاپهای هر سیلندر	۴	degree
زمان باز شدن سوپاپ هوا	۱۵° BTDC	degree
زمان بسته شدن سوپاپ هوا	۲۶° ABDC	degree
زمان باز شدن سوپاپ دود	۲۵° BBDC	degree
زمان بسته شدن سوپاپ دود	۱۵° ATDC	degree

۳-۱- نسبت دبی گاز تزریق شده به دبی هوای ورودی

مهمترین مشخصه مورد نیاز برای تعیین دبی گاز LPG تزریق شده به منیفولد ورودی در دست داشتن مقدار نسبت هوا-به-سوخت استوکیومتری سوخت است. مشخصات سوخت مورد استفاده در آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. در ابتدا، برای شرایط کاری معین موتور به کمک تعریف λ می‌توان نوشت:

$$\lambda_B = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \right)_{actual,B}}{\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \right)_{stoich.}}$$

(۱)

در رابطه فوق \dot{m} مشخص کننده دبی جرمی و زیر نویس‌های B و stoich. به ترتیب معرف مقادیر مربوط به حالت

$$\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}\right)_{stoich.} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}\right)_{actual,B}}{\lambda_B} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}\right)_{actual,I}}{\lambda_I} \quad (3)$$

زیر نویس λ_I در رابطه فوق بیان کننده مقادیر مربوط به حالت همراه با تزریق گاز LPG است. با توجه به اینکه دبی هوای ورودی ثابت نگه داشته می شود بنابراین می توان \dot{m}_{air} را از طرفین جملات دوم و سوم تساوی فوق حذف کرد در نتیجه داریم:

$$\lambda_B \times \dot{m}_{fuel,B} = \lambda_I \times \dot{m}_{fuel,I} \quad (4)$$

که در نهایت می توان نوشت:

$$\dot{m}_{fuel,I} = \frac{\lambda_B \times \dot{m}_{fuel,B}}{\lambda_I} \quad (5)$$

پایه که در آن گاز LPG به منیفولد ورودی تزریق نمی شود و شرایط استوکیومتری هستند. با توجه به اینکه در جدول ۳ نسبت هوا-به-سوخت استوکیومتری برای سوخت مورد استفاده ۱۴/۳۹ تعیین شده است با اندازه گیری دبی مصرف سوخت می توان دبی هوای ورودی به منیفولد را از رابطه ذیل محاسبه نمود.

$$\dot{m}_{air,actual,B} = \underbrace{\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}\right)_{stoich.}}_{14.39} \times \lambda_B \times \dot{m}_{fuel,actual,B} \quad (2)$$

اگر با ثابت نگه داشتن شرایط کاری موتور و دبی هوای ورودی در مقایسه با حالت پایه، گاز LPG به منیفولد ورودی تزریق شود با فرض اینکه نسبت هوا-به-سوخت استوکیومتری برای سوخت بنزین خالص و مخلوط LPG و بنزین (برای ترکیبی شامل کمتر از ۱۰٪ LPG و بیشتر از ۹۰٪ بنزین) با اختلاف ناچیزی با یکدیگر برابر باشند با توجه به تعریف λ از رابطه (۱) می توان نوشت:

جدول ۳- مشخصات سوخت مورد استفاده در آزمایش

عنوان مشخصه	نوع یا مقدار	واحد
نوع سوخت	بنزین	
نام سوخت	IP06G881113	
چگالی (DIN ۵۱۷۵۷)	۷۵۴/۵	kg/m ³
در دمای °C ۱۵		
عدد اکتان	۹۵/۴	
ارزش حرارتی		
HHV (بالا)	۴۵/۶۰	MJ/kg
LHV (پایین)	۴۲/۹۰	
جرم مولکولی	۹۷/۸۰	g/mol
نسبت هوا به سوخت استوکیومتری	۱۴/۳۹	

شارژ و فشار تقویتی تولید شده و در نتیجه دبی هوای ورودی تأثیر خواهد گذاشت. با توجه به توضیحات بالا دبی LPG تزریق شده عبارت است از:

$$\dot{m}_{LPG} = \dot{m}_{fuel,I} - \dot{m}_{fuel,B} \quad (6)$$

با ترکیب روابط (۵) و (۶) داریم:

$$\dot{m}_{LPG} = \dot{m}_{fuel,B} \times \left(\frac{\lambda_B}{\lambda_I} - 1 \right) \quad (7)$$

برای بیان نسبت دبی گازهای رخنه ای یا دود بازگردانده شده به دبی هوای در حال جریان در منیفولد ورودی به کمک دبی هوای ورودی محاسبه شده در رابطه (۲) می توان نوشت:

$$\frac{\dot{m}_{LPG}}{\dot{m}_{air,actual,B}} = \frac{\dot{m}_{fuel,B} \times \left(\frac{\lambda_B}{\lambda_I} - 1 \right)}{14.39 \times \lambda_B \times \dot{m}_{fuel,actual,B}} = \frac{\left(\frac{\lambda_B}{\lambda_I} - 1 \right)}{14.39 \times \lambda_B} \quad (8)$$

تفاوت دبی های جرمی مصرف سوخت حالت پایه و حالت همراه با تزریق می تواند بیان کننده دبی گاز LPG تزریق شده به منیفولد ورودی باشد. این عبارت در صورتی درست است که در حین تزریق گاز LPG بازخورد λ سنسور به ECU ارسال نشده و دبی مصرف سوخت در شرایطی که مخلوط سوخت و هوا غنی شده و مقدار λ_I در مقایسه با λ_B کاهش پیدا کرده است اصلاح نشود. به عبارت دیگر دبی مصرف سوخت اندازه گیری شده در حالت پایه و حالت همراه با تزریق با یکدیگر برابرند ولی بر اساس محاسبات بالا با یکدیگر اختلاف دارند. این اختلاف همان دبی گاز LPG تزریق شده است. لازم به ذکر است که در این شرایط دبی هوای ورودی بوسیله کنترل دستی درچه کنار گذر سیستم توربو شارژ ثابت نگه داشته می شود چراکه غنی یا رقیق شدن مخلوط سوخت به هوا، انرژی محصولات احتراق را تغییر داده و بر نحوه کارکرد سیستم توربو

که پس از ساده سازی داریم:

سیلندر اول است. بنابراین اختلاف $\dot{m}'_{fuel,B}$ و $\dot{m}'_{fuel,IB}$ سهم سیلندر اول از LPG تزریق شده به منیفولد ورودی را مشخص می‌کند. بنابراین داریم:

$$\dot{m}'_{LPG} = \dot{m}'_{fuel,I} - \dot{m}'_{fuel,IB} \quad (۱۳)$$

با ترکیب روابط (۱۲) و (۱۳) می‌توان نوشت:

$$\dot{m}'_{LPG} = \dot{m}'_{fuel,B} \times \left(\frac{\lambda'_B}{\lambda'_I} - 1 \right) \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق \dot{m}'_{LPG} بیان کننده سهم سیلندر اول از LPG تزریق شده به منیفولد ورودی است. با تکرار این محاسبات برای سیلندرهایی دیگر در نهایت می‌توان چگونگی توزیع LPG تزریق شده را در منیفولد ورودی تخمین زد. در انتها باید به این نکته اشاره کرد که با توجه به عدم وجود λ سنسور در راهگاه خروجی سیلندر اول محاسبه مقدار سهم این سیلندر از گازهای تزریق شده با توجه به مقادیر محاسبه شده برای سهم سیلندرهایی ۲ تا ۴ و نرخ کل گاز تزریق شده به منیفولد مشخص می‌گردد.

۴- تحلیل عددی و توزیع گازهای تزریق شده به منیفولد

۴-۱- معادلات حاکم

فرض می‌شود که جریان مغشوش و تراکم پذیر در کل زمان یک سیکل برقرار باشد. بدین ترتیب معادلات حاکم (اصل بقا جرم، ممنتوم، انرژی و معادله حالت عبارتند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (۱۵)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \right) + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (۱۶)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + (\vec{V} \cdot \nabla) T = -\nabla \cdot (k \nabla T) \quad (۱۷)$$

$$p = \rho RT \quad (۱۸)$$

تانسور تنش در رابطه (۱۶) از رابطه کلی $\vec{\tau} = \mu \vec{\gamma} = \mu [\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T]$ تبعیت می‌کند. همچنین برای اعمال اثرات اغتشاش از مدل k-ε استاندارد استفاده شده است. معادلات حاکم برای این مدل عبارتند از:

$$\frac{\dot{m}'_{LPG}}{(\dot{m}'_{air})_{actual,B}} = \frac{\lambda_B - \lambda_I}{14.39 \times \lambda_B \times \lambda_I} \quad (۹)$$

به کمک رابطه فوق می‌توان بدون نیاز به دبی سنج و تنها با اندازه‌گیری مقادیر λ_B و λ_I نسبت LPG تزریق شده به دبی هوای ورودی به منیفولد را تخمین زد. اگر هدف تعیین مقدار λ_I مشخصی برای دست یافتن به مقدار معینی از نسبت $\frac{\dot{m}'_{LPG}}{(\dot{m}'_{air})_{actual,B}}$ باشد رابطه ذیل مفیدتر خواهد بود:

$$\lambda_I = \frac{\lambda_B}{14.39 \times \lambda_B \times \frac{\dot{m}'_{LPG}}{(\dot{m}'_{air})_{actual,B}} + 1} \quad (۱۰)$$

به کمک رابطه ۱۰ با در اختیار داشتن مقادیر حالت پایه می‌توان مشخص کرد که برای دست یابی به یک نسبت دبی مشخص برای LPG تزریق شده به هوای ورودی باید مقدار λ_I چقدر باشد. به این ترتیب با تنظیم شیر کنترل دبی متصل به مسیر کپسول LPG و قرائت مقادیر λ از روی نمایش دهنده می‌توان به نسبت دبی مورد نظر رسید.

۳-۲- چگونگی توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها

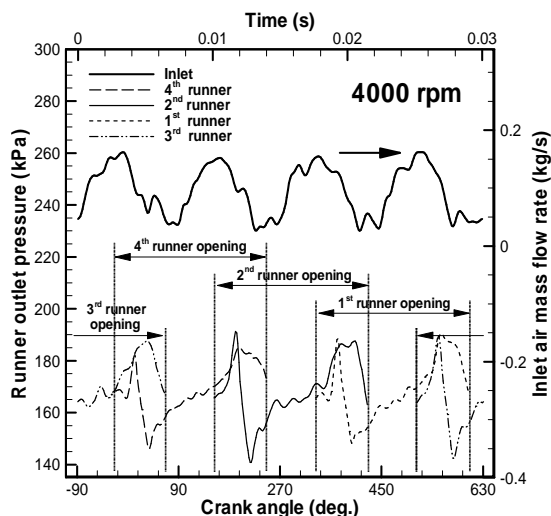
محاسباتی که در بالا بیان شد به کمک λ راهگاه کلی منیفولد خروجی انجام می‌شود. اگر بخشی از این عملیات با استفاده از λ مربوط به هر یک از چهار راهگاه خروجی انجام گیرد می‌توان سهم هر یک از سیلندرها از گاز LPG تزریق شده را محاسبه کرد. روابطی که در ذیل آورده می‌شوند برای محاسبه مقدار LPG دریافت شده توسط سیلندر اول هستند. انجام محاسبات مشابه برای سایر سیلندرها به سادگی و تنها با جایگزینی λ' با λ'' ، λ''' و λ'''' به ترتیب برای سیلندرهایی دوم، سوم و چهارم قابل انجام است. اگر همچنان فرض تساوی نسبت هوا-به-سوخت استوکیومتری برای سوخت بنزین و مخلوط LPG و بنزین را برقرار بدانیم، به عنوان مثال برای سیلندر اول داریم:

$$\lambda'_B \times \dot{m}'_{fuel,B} = \lambda'_{IB} \times \dot{m}'_{fuel,IB} \quad (۱۱)$$

که در نهایت می‌توان نوشت:

$$\dot{m}'_{fuel,IB} = \frac{\lambda'_B \times \dot{m}'_{fuel,B}}{\lambda'_{IB}} \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق $\dot{m}'_{fuel,B}$ ، λ'_B و λ'_{IB} از آزمایش بدست می‌آیند. مقدار $\dot{m}'_{fuel,IB}$ حاصل جمع دبی بنزین و LPG وارد شده به



شکل ۲- شرایط مرزی مورد استفاده در حل عددی شامل تغییرات دبی هوای ورودی و فشار خروجی چهار راهگاه منیفولد ورودی بر حسب زمان که از شبیه سازی یک بعدی شرایط کاری موتور بدست آمده است

۳-۴- روش تعقیب ذرات

همانطور که پیشتر ذکر شد روشهای تزریق CO₂ و حرارتی به همراه روش جدید تعقیب ذرات تکنیکهایی هستند که می‌توانند برای مطالعه توزیع گازهای بازگردانده شده به منیفولد ورودی مورد استفاده قرار گیرند. گازهای بازگردانده شده گازهایی مانند گازهای رخنه‌ای، بخار بنزین و یا محصولات احتراق را شامل می‌شود که باید به منیفولد ورودی تزریق شده و همراه با هوا در به محفظه احتراق فرستاده شوند. دو روش پیشین را می‌توان هم به صورت آزمایشگاهی و همچنین عددی بخدمت گرفت که با تزریق مستقیم گاز از موقعیت یا موقعیتهای مورد نظر به داخل منیفولد ورودی انجام می‌پذیرد. در روش تعقیب ذرات به جای تزریق گاز، ذرات بدون جرمی از موقعیتهای مطلوب به درون میدان جریان تزریق می‌شوند. مشخصات مربوط به چگونگی تزریق از قبیل موقعیت، سرعت و جهت تزریق به راحتی قابل تنظیم است. این ذرات تحت تأثیر میدان جریان هوای ورودی قرار گرفته، در منیفولد پخش و به سمت راهگاهها هدایت می‌شوند. ذرات تزریق شده بطور مستقل قابل ردیابی هستند از این رو چندین جریان تزریق را بطور هم زمان از چند موقعیت مختلف و یا از یک موقعیت ولی با سرعتها و زوایای تزریق مختلف به میدان جریان بررسی کرد. این قابلیت به این معنی است که می‌توان تنها با یک بار حل میدان جریان، چگونگی توزیع دود یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده به منیفولد را برای تعداد زیادی از موقعیتهای تزریق و با شرایط تزریق مختلف مورد مطالعه قرار داد. با توجه به اینکه در این

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} \right) + (\vec{v} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right] \nabla k \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (19)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right) + (\vec{v} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right] \nabla \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (20)$$

در روابط فوق k انرژی جنبشی اغتشاش و ϵ نرخ تلافات انرژی جنبشی است. همچنین G_k نرخ تولید انرژی جنبشی اغتشاش است که با رابطه $G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ محاسبه می‌گردد. لزجت مغشوش نیز بصورت $\mu_t = \rho C_\mu \frac{\epsilon^2}{k}$ تعریف می‌شود. σ_k و σ_ϵ نیز اعداد پیرانتل مغشوش برای انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ تلافات انرژی جنبشی هستند. در این پژوهش برای ضرایب ثابت $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ ، C_μ ، σ_k و σ_ϵ به ترتیب مقادیر ۱٫۴۴، ۱٫۹۲، ۰٫۰۹، ۱٫۰ و ۱٫۳ اختیار شده است.

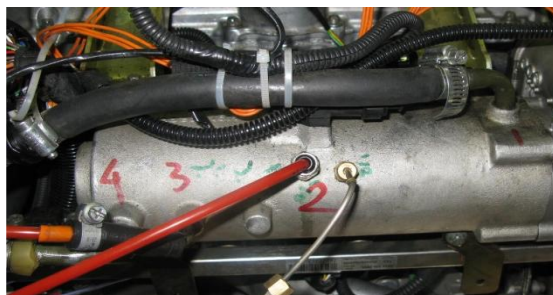
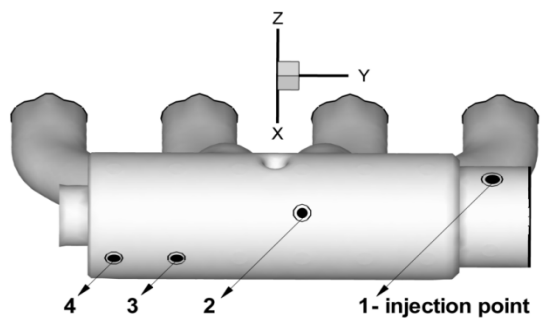
۲-۴- روش عددی و شرایط مرزی

برای حل معادلات حاکم جریان در منیفولد ورودی از روش حجم کنترل استفاده شده است. نرم افزار Gambit برای تولید شبکه و اصلاح شکل هندسی منیفولد ورودی به کار گرفته شده است و نرم افزار Fluent برای حل معادلات حاکم مورد استفاده قرار گرفته است. در این بررسی جریان سیال غیر دائمی، تراکم پذیر و مغشوش در نظر گرفته شده است. برای اعمال اثرات اغتشاش از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است.

شرایط مرزی وابسته به زمان در مقاطع ورودی و خروجی منیفولد از یک شبیه سازی یک بعدی بدست آمده است. این شبیه سازی یک بعدی بوسیله نرم افزار GT-Power انجام گرفته و مدل مورد استفاده در این نرم افزار با داده های آزمایشگاهی موتور EF7 کاملاً کالیبره گردیده است. از این شبیه سازی یک بعدی دبی جرمی در مقطع ورودی و فشار برای چهار مقطع خروجی منیفولد (راهگاهها) بر حسب زاویه میل لنگ (زمان) استخراج می‌گردد. شکل ۲ نمونه‌ای از شرایط مرزی مورد استفاده شامل دبی جرمی هوا در مقطع ورودی و فشار در مقطع خروجی چهار راهگاه منیفولد را بر حسب زاویه میل لنگ و زمان در دور موتور ۴۰۰۰ rpm نمایش می‌دهد. توضیحات و اطلاعات کامل‌تر در مورد شرایط مرزی در مرجع [۱۶] ارائه شده است.

برای شبکه‌بندی مدل هندسه مورد مطالعه از ۷۳۰۰۰ سلول بدون سازمان چهار وجهی استفاده شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی شبیه‌سازی عددی برای شبکه‌ای با حدود ۱۴۰۰۰۰ سلول نیز انجام گرفت و با وجود دو برابر شدن تعداد سلولها اختلاف کمیتهای مورد مطالعه از حدود ۳٪ برای دو شبکه بندی استفاده شده تجاوز نکرد. جزئیات بیشتر در مورد شبکه‌بندی حوزه حل در مراجع [۱۵ و ۱۶] ارائه شده است.

با در نظر گرفتن نتایج تحقیقات قبلی انتخاب نقاط تزریق به ترتیبی انجام شده است تا گروهی از نقاط با رفتار توزیع کنندگی متفاوت را شامل شود و با توجه به تراکم تجهیزات در اطراف محفظه آرامش، در دسترس نیز باشند. این موقعیتها در شکل ۴ شماره گذاری و مشخص شده‌اند. همانطور که در این شکل مشخص است نقطه تزریق ۱ تقریباً در ورودی منیفولد، نقطه تزریق ۲ در میانه و نقاط ۳ و ۴ نیز در انتهای محفظه آرامش جای داده شده‌اند. با در نظر گرفتن شرایط انجام آزمایش باید توجه داشت که توزیع نامتوازن سوخت (LPG) در بین سیلندرها، می‌تواند به تشکیل امواج فشاری و جریانهای برگشتی در منیفولد ورودی منجر شود به شکلی که الگوی جریان نسبت به حالت پایه دچار تغییر گردد. این تغییر در الگوی جریان برای نقاطی که توزیع غیر یکنواخت تر سوخت را بدست می‌دهند می‌تواند اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی را بیشتر کند.



شکل ۴- چهار موقعیت در نظر گرفته شده بر روی محفظه آرامش راهگاه مکش EF7 برای تزریق گاز

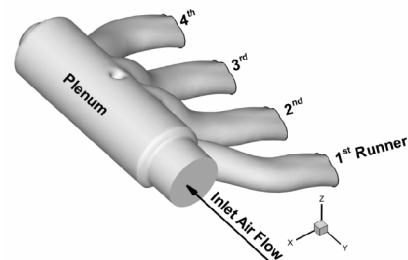
روش، ذرات کد گذاری می‌شوند در انتهای حل می‌توان مشخص کرد که ذرات خارج شده از هر راهگاه از کدامیک از موقعیتها و یا با چه شرایطی تزریق شده بودند. همچنین به کمک این روش می‌توان توزیع دود و گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده حاصل از ترکیب دو یا چند موقعیت تزریق بر روی منیفولد را نیز به سادگی بررسی کرد.

لازم به ذکر است در شرایطی که جریان دود یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده به منیفولد تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و در نتیجه توزیع گازهای بازگردانده شده بگذارد جریان جرم گاز تزریق شده به میدان جریان نیز باید منظور شود. اگر چه در این حالت امکان مطالعه هم زمان چند موقعیت تزریق تنها با یک بار حل کردن میدان جریان مقدور نخواهد بود اما با در نظر گرفتن جریان تزریق شده به منیفولد ورودی این روش توزیع جریان تزریق شده از موقعیت مورد نظر را بخوبی پیش‌بینی می‌کند. این نکته نیز حائز اهمیت است که در روش تعقیب ذرات لازم نیست گاز تزریق شده (مشابه روش تزریق CO₂) سیالی غیر از هوا باشد چرا که تنها اثر جریان تزریق شده و نه جنس آن بر الگوی جریان و توزیع گازها موثر است. بنابراین دیگر نیازی به استفاده از کدهای پیچیده و صرف زمان بیشتر به منظور حل میدان جریان شامل چند گونه گاز مختلف نیست.

باید اضافه کرد که با افزایش موقعیتها و شرایط تزریق زمان محاسبات افزایشی جزئی خواهد داشت که با توجه به تعیین چگونگی توزیع گازهای تزریق شده برای همه موقعیتها و شرایط تزریق با یک بار حل میدان جریان، صرف زمان بیشتر در این روش کاملاً توجیه پذیر و منطقی است.

۵- مدل هندسی

از آنجاییکه مطالعات قبلی نیز بر روی موتور EF7-TC انجام شده بود [۱۳-۱۶] با توجه به این تجربیات و در دسترس بودن بستر تست موتور مذکور در این تحقیق نیز از موتور EF7-TC استفاده شده است. شکل ۳ نمایی از منیفولد ورودی موتور مورد استفاده را نمایش می‌دهد که شامل یک محفظه آرامش و چهار راهگاه است.



شکل ۳- نمایی از منیفولد ورودی موتور EF7

۶- نتایج

می‌شود که برای در نظر گرفتن این اثر می‌توان سرعت تزریق ذرات به منیفولد را افزایش داد. از طرف دیگر نویسندگان مقاله در تحقیقی [۱۶] نشان دادند که افزایش سرعت تزریق تأثیر ناچیزی بر نحوه توزیع گازهای بازگردانده شده به منیفولد ورودی دارد. از این رو نتایج عددی مورد استفاده برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در نرخ تزریقهای ۰/۵٪ و ۱٪ در هر نقطه تزریق در یک دور موتور مشخص با یکدیگر یکسانند. مقادیر اندازه‌گیری شده به کمک آزمایش برای حالت پایه در دورهای موتور ۳۰۰۰ rpm و ۴۰۰۰ rpm در جدول ۴ ارائه شده‌اند. مقادیر گزارش شده در این جدول تنها شامل کمیتهایی هستند که در محاسبات تشریح شده در قسمت ۳-۲ مورد نیاز هستند. در ادامه مقادیر اندازه‌گیری شده برای نقطه تزریق ۱ به عنوان نمونه در جدول ۵ ارائه می‌شوند. برای سایر نقاط تزریق نتایج محاسبه شده از کمیتهای بدست آمده از آزمایش گزارش شده و به علت کثرت مقادیر از ارائه کمیتهای اندازه‌گیری شده برای سایر نقاط تزریق صرف نظر می‌شود.

همانطور که قبلاً اشاره شد آزمایش در شرایط تمام بار و برای چهار نقطه تزریق در نظر گرفته شده بر روی محفظه آرامش منیفولد ورودی (شکل ۴) انجام گرفته است. برای بررسی جامع‌تر آزمایشها در دو دور موتور ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ rpm و دو نرخ تزریق ۰/۵٪ و ۱٪ برای LPG انجام گرفته است. لازم به ذکر است که نرخ تزریق، نسبت شدت جریان سوخت تزریق شده به شدت جریان کل هوای ورودی به منیفولد را بیان می‌کند. همچنین باید اضافه نمود که مقادیر نرخ تزریقهای ۰/۵٪ و ۱٪ در محدوده شدت جریان گازهای رخنه‌ای که به منیفولد ورودی بازگردانده می‌شوند انتخاب شده‌اند. در ادامه نتایج عددی و آزمایشگاهی حاصل برای نقاط مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا صحت و دقت روش عددی تعقیب ذرات برای پیش‌بینی توزیع گازهای تزریق شده به منیفولد مشخص گردد. پیشتر بیان شد که در روش تعقیب ذرات اثر جریان جرم گازهای تزریق شده در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین با افزایش دبی در یک سطح مقطع و چگالی ثابت سرعت تزریق بیشتر

جدول ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده برای حالت پایه در دورهای موتور ۳۰۰۰ rpm و ۴۰۰۰ rpm (با قطعیت ۹۹٪)

و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده)					
شرایط اندازه‌گیری	نرخ مصرف سوخت (L/h)	λ کلی منیفولد خروجی	λ راهگاه دوم	λ راهگاه سوم	λ راهگاه چهارم
۳۰۰۰ rpm	۲۳,۲ ± ۰,۱۵	۰,۹۳۰ ± ۰,۰۰۴	۰,۹۱۱ ± ۰,۰۰۱	۰,۹۰۴ ± ۰,۰۰۳	۰,۹۰۹ ± ۰,۰۰۶
۴۰۰۰ rpm	۳۴,۰ ± ۰,۱۷	۰,۸۷۳ ± ۰,۰۰۴	۰,۸۳۴ ± ۰,۰۰۱	۰,۸۲۷ ± ۰,۰۰۳	۰,۸۴۷ ± ۰,۰۰۷

۶-۱- نقطه تزریق ۱

متعلق به راهگاه چهارم است که کمترین سهم را از گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی دارد. نتایج در دور موتور ۴۰۰۰ rpm برای نقطه تزریق ۱ در جدول ۷ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این جدول نیز سطرهای اول و دوم، سهم هر یک از راهگاهها از گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی را به ترتیب برای روش آزمایشگاهی و عددی مشخص می‌کنند. اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی نیز در سطر سوم این جدول برای دو نرخ تزریق ۰/۵ و ۱٪ ارائه شده است و متوسط آنها در سطر چهارم جدول ذکر گردیده است. در این حالت نیز اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی برای راهگاههایی که بیشترین سهم را از گازهای تزریق شده به منیفولد دارند (راهگاه دوم و اول) برای هر دو نرخ تزریق کاملاً رضایت بخش است. با کاهش سهم راهگاهها از گازهای تزریق شده اختلاف افزایش پیدا می‌کند هر چند رتبه راهگاهها از نظر میزان دریافت گازهای تزریق شده با هر دو روش کاملاً یکسان

کمیتهایی اندازه‌گیری شده از آزمایش برای نقطه تزریق ۱ در جدول ۵ مشاهده می‌شوند. به کمک کمیتهای دو جدول ۴ و ۵ و محاسبات ذکر شده در قسمت ۳-۲ چگونگی توزیع گازهای تزریق شده در بین راهگاههای منیفولد ورودی قابل محاسبه است. در جدول ۶ سهم هر سیلندر از گازهای تزریق شده برای نقطه تزریق ۱ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm و نرخهای تزریق ۰/۵ و ۱٪ ارائه شده و نتایج عددی و حاصل از آزمایش با یکدیگر مقایسه شده است. اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی نیز برای سهم هر سیلندر، برای هر نرخ تزریق در سطر سوم جدول ذکر شده است. سطر چهارم نیز متوسط اختلافها را برای هر نرخ تزریق مشخص می‌کند. نتایج نقطه تزریق ۱ نشان می‌دهند که روش تعقیب ذرات، توزیع گاز تزریق شده به منیفولد را با اختلاف قابل قبولی به درستی پیش‌بینی می‌کند. برای هر دو نرخ تزریق، بیشترین اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی

است. همانطور که در جدولهای ۶ و ۷ مشاهده می‌شود اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نرخ تزریق ۰/۵٪ از نرخ تزریق ۱٪ کمتر است. این روند کاملاً قابل انتظار است چرا که با کاهش

جدول ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ مصرف سوخت و λ در دورهای موتور ۳۰۰۰ rpm و ۴۰۰۰ rpm برای تزریق گاز با نرخ ۰/۵ و ۱٪ از نقطه تزریق ۱ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری)

حالت/ شرایط اندازه‌گیری	نرخ مصرف سوخت (L/h)	λ کلی منیفولد خروجی	λ راهگاه دوم	λ راهگاه سوم	λ راهگاه چهارم
۳۰۰۰ rpm					
نرخ تزریق ۰/۵٪	۲۱,۴ ± ۰,۷۰	۰,۹۲۶ ± ۰,۰۰۱	۰,۸۷۰ ± ۰,۰۰۱	۰,۹۱۴ ± ۰,۰۰۱	۰,۹۴۴ ± ۰,۰۱۲
نرخ تزریق ۱,۰٪	۱۹,۴ ± ۰,۳۱	۰,۹۲۹ ± ۰,۰۰۳	۰,۸۴۶ ± ۰,۰۰۲	۰,۹۳۸ ± ۰,۰۰۴	۰,۹۷۷ ± ۰,۰۰۸
۴۰۰۰ rpm					
نرخ تزریق ۰/۵٪	۳۰,۹ ± ۰,۲۵	۰,۸۷۱ ± ۰,۰۰۳	۰,۷۹۷ ± ۰,۰۰۲	۰,۸۵۳ ± ۰,۰۰۲	۰,۸۸۵ ± ۰,۰۰۶
نرخ تزریق ۱,۰٪	۲۹,۳۰ ± ۰,۲۱	۰,۸۷۴ ± ۰,۰۰۳	۰,۷۷۷ ± ۰,۰۰۲	۰,۸۷۳ ± ۰,۰۰۳	۰,۸۹۶ ± ۰,۰۰۹

جدول ۶- نتایج آزمایش و روش تعقیب ذرات برای نقطه تزریق ۱ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm

راهگاه اول	راهگاه دوم	راهگاه سوم	راهگاه چهارم	نرخ تزریق (%)	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۲۹,۹۷	۳۸,۱۶	۲۰,۰۱	۱۱,۸۶	۰,۵	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۳۰,۱۵	۳۶,۴۵	۱۹,۲۶	۱۴,۱۳	۱	توزیع بدست آمده از روش تعقیب ذرات (%)
۲۶,۱۵	۴۲,۷۷	۲۱,۵۶	۹,۵۲	۰,۵	اختلاف توزیع روش عددی با آزمایش (%)
۱۴,۶۰	۱۲,۰۷	۷,۷۵	۲۴,۵۴	۱	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
۱۵,۲۸	۱۷,۳۲	۱۱,۹۴	۴۸,۴۹	۰,۵	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
		۱۴,۷۵		۱	
		۲۳,۲۶			

جدول ۷- نتایج آزمایش و روش تعقیب ذرات برای نقطه تزریق ۱ در دور موتور ۴۰۰۰ rpm

راهگاه اول	راهگاه دوم	راهگاه سوم	راهگاه چهارم	نرخ تزریق (%)	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۳۱,۱۳	۳۶,۷۹	۱۹,۳۰	۱۲,۷۸	۰,۵	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۲۸,۸۲	۳۸,۵۹	۱۷,۵۷	۱۵,۰۲	۱	توزیع بدست آمده از روش تعقیب ذرات (%)
۳۱,۳۳	۳۶,۵۸	۲۵,۲۲	۶,۸۶	۰,۵	اختلاف توزیع روش عددی با آزمایش (%)
۰,۶۵	۰,۵۶	۳,۰۶۸	۸,۶۲۹	۱	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
۸,۷۱	۵,۴۸	۴۳,۵۸	۱۱۸,۹۴	۰,۵	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
		۲۹,۵۴		۱	
		۴۴,۱۸			

۶-۲- نقطه تزریق ۲

همانطور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی برای راهگاه اول قابل توجه است. همچنین سهم راهگاه اول از گازهای تزریق شده برای نرخ تزریق ۱٪ با افزایش چشمگیری در مقایسه با نرخ تزریق ۰/۵٪ روبه رو است. احتمال تغییر قابل توجه در الگوی جریان داخل منیفولد به واسطه افزایش ۰/۵ درصدی گازهای تزریق شده بسیار ناچیز است. از آنجاییکه این اثر در نتایج مربوط به دور موتور rpm ۳۰۰۰ مشاهده نشد به نظر می‌رسد این افزایش به علت تغییر میدان جریان به دلیل قویتر شدن جریانهای برگشتی در نزدیکی

نتایج مربوط به نقطه تزریق ۲ برای دور موتورهای ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ به ترتیب در جدولهای ۸ و ۹ ارائه شده است. برای دور موتور rpm ۳۰۰۰ اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی برای راهگاههای دوم تا چهارم در حد قابل قبولی است. با توجه به سهم ناچیز ۷ الی ۸ درصدی راهگاه اول از مقدار کل گاز تزریق شده اختلاف مقادیر عددی و آزمایشگاهی برای این راهگاه بیشتر از سایر راهگاهها است. با این وجود، همچنان نتایج عددی و آزمایشگاهی، برای هر دو نرخ تزریق، از نظر سهم راهگاهها از گاز تزریق شده به منیفولد ورودی دارای رتبه‌بندی یکسانی هستند.

است که این راهگاه از رتبه چهارم در نتایج عددی به رتبه سوم در نتایج آزمایشگاهی ارتقا پیدا کند. همچنین راهگاه دوم، در نتایج عددی از رتبه سوم به رتبه چهارم در نتایج آزمایشگاهی تنزل کرده است.

راهگاه اول باشد که الگوی جریان را تحت تأثیر خود قرار داده است. رتبه‌بندی راهگاهها برای نتایج آزمایشگاهی و عددی از نظر سهم دریافتی از گاز تزریق شده برای نرخ تزریق ۰/۵٪ یکسان است. برای نرخ تزریق ۱٪ نیز رتبه‌بندی راهگاههای سوم و چهارم در نتایج آزمایشگاهی و عددی یکسان می‌باشد اما افزایش بوجود آمده در سهم راهگاه اول برای نرخ تزریق ۱٪ باعث شده

جدول ۸- نتایج آزمایش و روش تعقیب ذرات برای نقطه تزریق ۲ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm

راهگاه چهارم	راهگاه سوم	راهگاه دوم	راهگاه اول	نرخ تزریق (%)	
۲۸,۰۰	۴۲,۵۳	۲۲,۳۲	۷,۱۵	۰,۵	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۳۰,۰۰	۴۰,۹۲	۲۰,۷۵	۸,۳۳	۱	
۲۴,۴۵	۴۶,۱۸	۲۶,۶۳	۲,۷۴		توزیع بدست آمده از روش تعقیب ذرات (%)
۱۴,۵۴	۸,۵۹	۱۹,۳۱	۱۶۱,۰۷	۰,۵	اختلاف توزیع روش عددی با آزمایش (%)
۲۲,۶۹	۱۲,۸۶	۲۸,۳۲	۲۰,۴۴۳	۱	
	۵۰,۸۸			۰,۵	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
	۶۷,۰۸			۱	

جدول ۹- نتایج آزمایش و روش تعقیب ذرات برای نقطه تزریق ۲ در دور موتور ۴۰۰۰ rpm

راهگاه چهارم	راهگاه سوم	راهگاه دوم	راهگاه اول	نرخ تزریق (%)	
۳۴,۲۸	۴۷,۳۱	۱۰,۶۴	۷,۷۷	۰,۵	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۳۰,۲۴	۴۶,۰۰	۱۰,۵۳	۱۳,۲۳	۱	
۳۸,۹۷	۵۳,۱۶	۶,۸۳	۱,۰۴		توزیع بدست آمده از روش تعقیب ذرات (%)
۱۳,۶۷	۱۲,۳۷	۵۵,۸۷	۶۴۴,۳۲	۰,۵	اختلاف توزیع روش عددی با آزمایش (%)
۲۸,۸۹	۱۵,۵۵	۵۴,۲۹	۱۱۶۷,۲۱	۱	
	۱۸۱,۵۶			۰,۵	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
	۳۱۶,۴۸			۱	

۳-۶- نقطه تزریق ۳

ولی نتایج عددی سهم دو راهگاه اول و دوم از گاز تزریق شده را صفر پیش‌بینی می‌کنند. به این دلیل برای راهگاههای اول و دوم و برای هیچ کدام از دو نرخ تزریق اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی بر حسب درصد بیان نگردیده است. همچنین متوسط اختلاف نیز در این جدول گزارش نشده است. شاید بتوان علت این اختلاف را پایین بودن مجموع سهم راهگاههای رتبه سه و چهار دانست. با مقایسه مجموع سهم راهگاههای دارای رتبه سه و چهار ملاحظه می‌شود که این مجموع (۱۱,۳۵٪) برای نرخ تزریق ۰/۵٪ و ۱۲,۱۸٪ برای نرخ تزریق ۱٪ برای نقطه تزریق ۳ در دور موتور ۴۰۰۰ rpm در مقایسه با سایر نتایج (جدولهای ۴ تا ۸) کمترین مقدار است. این اختلاف در سوختی که سیلندرها دریافت می‌کنند باعث شکل گرفتن امواج فشاری جریانهای برگشتی قوی‌تر در منیفولد ورودی و در نتیجه تغییر الگوی جریان می‌گردد که این باعث بروز اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی می‌شود.

جدول ۱۰ نتایج حاصل را برای نقطه تزریق ۳ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm ارائه می‌دهد. برای نقطه تزریق ۳ نیز همانطور که مشاهده می‌شود کمترین اختلاف در بین نتایج آزمایشگاهی و عددی متعلق به راهگاه چهارم است که بیشترین سهم را از گاز تزریق شده به منیفولد ورودی دارد. همچنین مطابق نتایج قبلی، برای نقطه تزریق ۳ نیز اختلافها در نتایج مربوط به نرخ تزریق ۱٪ از نرخ تزریق ۰/۵٪ بیشتر است. از طرف دیگر همچنان بیشترین اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی مربوط به راهگاهی است که کمترین سهم را از گازهای تزریق شده به منیفولد دارد. شایان ذکر است که برای هر دو نرخ تزریق، رتبه بندی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر معادل هستند

اگر چه در جدول ۱۱ و در دور موتور ۴۰۰۰ rpm برای دو راهگاه چهارم و سوم که به ترتیب رتبه اول و دوم را در اختیار دارند اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی قابل قبول است

جدول ۱۰- نتایج آزمایش و روش تعقیب ذرات برای نقطه تزریق ۳ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm

راهگاه اول	راهگاه دوم	راهگاه سوم	راهگاه چهارم	نرخ تزریق (%)	
۷,۴۸	۱۱,۳۶	۳۰,۴۷	۵۰,۶۹	۰,۵	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۸,۴۲	۹,۹۹	۳۲,۸۰	۴۸,۷۹	۱	
۴,۸۸	۱۵,۷۱	۲۲,۳۹	۵۷,۰۲		توزیع بدست آمده از روش تعقیب ذرات (%)
۵۳,۲۷	۳۸,۳۵	۲۶,۱۱	۱۲,۴۹	۰,۵	اختلاف توزیع روش عددی با آزمایش (%)
۷۲,۵۱	۵۷,۳۳	۴۶,۵۲	۱۶,۸۷	۱	
		۳۵,۰۵		۰,۵	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
		۴۸,۳۰		۱	

جدول ۱۱- نتایج آزمایش و روش تعقیب ذرات برای نقطه تزریق ۳ در دور موتور ۴۰۰۰ rpm

راهگاه اول	راهگاه دوم	راهگاه سوم	راهگاه چهارم	نرخ تزریق (%)	
۴,۲۹	۷,۰۶	۲۲,۰۴	۵۶,۶۱	۰,۵	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۴,۷۹	۷,۳۹	۳۱,۹۹	۵۵,۸۳	۱	
۰,۰۰	۰,۰۰	۳۸,۹۳	۶۱,۰۷		توزیع بدست آمده از روش تعقیب ذرات (%)
—	—	۲۱,۴۹	۷,۸۸	۰,۵	اختلاف توزیع روش عددی با آزمایش (%)
—	—	۲۱,۶۹	۹,۳۸	۱	
		—		۰,۵	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
		—		۱	

۴-۶- نقطه تزریق ۴

نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نقطه تزریق ۴ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm در جدول ۱۲ قابل ملاحظه است. همانطور که انتظار می‌رود با توجه به موقعیت این نقطه تزریق بخش قابل توجهی از گاز تزریق شده به سیلندر چهارم راه پیدا می‌کند. اگر چه اختلاف نتایج برای راهگاههای چهارم و سوم که به ترتیب رتبه اول و دوم را در اختیار دارند قابل قبول می‌باشد اما اختلاف نتایج مربوط به راهگاههای اول و دوم قابل توجه است. با این وجود رتبه‌بندی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و عددی یکسان است. همانطور که در قسمت قبل اشاره شده به نظر می‌رسد برای این نقطه تزریق نیز کاهش قابل ملاحظه مجموع سهم دو راهگاه با رتبه سه و چهار تغییراتی در میدان جریان ایجاد کرده است که منجر به بروز اختلاف قابل توجه در نتایج آزمایشگاهی و عددی شده است. لازم به ذکر است که مطابق گذشته، اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نرخ تزریق ۰/۵٪ از مقدار این اختلاف برای نتایج مربوط به نرخ تزریق ۱٪ کوچکتر است.

همانطور در جدول ۱۳ ملاحظه می‌شود با تزریق گاز از نقطه تزریق ۴ راهگاه چهارم در دور موتور ۴۰۰۰ rpm نیز همچنان بالاترین سهم را از کل گاز تزریق شده دارا است. مشابه

نتایج جدول ۱۲ روش عددی تعقیب ذرات با دقت قابل قبولی سهم دو راهگاه سوم و چهارم را از گازهای تزریق شده تعیین می‌کند. مطابق انتظار و مشابه نتایج مربوط به نقطه تزریق ۳ در دور ۴۰۰۰ rpm، روش تعقیب ذرات، راهگاههای اول و دوم هیچ شانس برای دریافت سهمی از گاز تزریق شده به منیفولد ورودی ندارند. با دقت در نتایج مربوط به راهگاههای اول و دوم جدول ۱۳ ملاحظه می‌شود، عاملی که باعث بروز اختلاف قابل توجه در نتایج جداول ۱۱ و ۱۲ شده بود در نتایج این جدول نیز قابل مشاهده است. مجموع سهم راهگاههای با رتبه سه و چهار از کل گاز تزریق شده در جدول ۱۳، برای نرخ تزریق ۰/۵٪ به ۹/۳۱٪ و برای نرخ تزریق ۱٪ به ۱۲/۰۵٪ می‌رسد که کمترین مقدار در بین نتایج چهار نقطه تزریق است. با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت قبل این اختلاف چندان دور از انتظار نیست. شایان ذکر است که در نتایج این قسمت نیز اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نرخ تزریق ۰/۵٪ همواره از مقدار آن برای نتایج مربوط به نرخ تزریق ۱٪ کمتر است.

جدول ۱۲- نتایج آزمایش و روش تعقیب ذرات برای نقطه تزریق ۴ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm

راهگاه اول	راهگاه دوم	راهگاه سوم	راهگاه چهارم	نرخ تزریق (%)	
۷,۷۹	۵,۵۴	۲۴,۸۲	۶۱,۸۵	۰,۵	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۸,۸۰	۸,۶۷	۲۶,۱۴	۵۶,۳۹	۱	
۱,۶۷	۱,۶۱	۲۸,۷۴	۶۷,۹۹	۰,۵	توزیع بدست آمده از روش تعقیب ذرات (%)
۳۶۷,۴۳	۲۴۴,۸۲	۱۵,۷۸	۹,۹۳	۰,۵	اختلاف توزیع روش عددی با آزمایش (%)
۴۲۷,۸۹	۴۳۹,۴۲	۹,۹۳	۲۰,۵۶	۱	
	۱۵۹,۴۹			۰,۵	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
	۲۲۴,۴۵			۱	

جدول ۱۳- نتایج آزمایش و روش تعقیب ذرات برای نقطه تزریق ۴ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm

راهگاه اول	راهگاه دوم	راهگاه سوم	راهگاه چهارم	نرخ تزریق (%)	
۵,۲۰	۴,۱۱	۲۹,۸۳	۶۰,۸۶	۰,۵	توزیع بدست آمده از آزمایش (%)
۶,۴۵	۵,۶۰	۲۸,۸۱	۵۹,۱۵	۱	
۰,۰۰	۰,۰۰	۳۴,۹۲	۶۵,۰۸	۰,۵	توزیع بدست آمده از روش تعقیب ذرات (%)
—	—	۱۷,۰۴	۶,۹۴	۰,۵	اختلاف توزیع روش عددی با آزمایش (%)
—	—	۲۱,۲۱	۱۰,۰۴	۱	
		—		۰,۵	متوسط اختلاف توزیع بین چهار راهگاه (%)
		—		۱	

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق نحوه توزیع دود یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده به منیفولد ورودی به کمک شبیه‌سازی تزریق آنها با یک کپسول LPG و اثر آن بر محصولات احتراق بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش بر روی موتور EF7-TC انجام گرفت و نتایج حاصل از آن برای بررسی صحت یک روش عددی مبتنی بر تعقیب ذرات که برای پیش‌بینی نحوه توزیع گازهای بازگردانده شده به منیفولد ورودی توسعه داده شده است استفاده شد. آزمایشها برای چهار نقطه تزریق مختلف، در دو دور موتور ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ rpm و دو نرخ تزریق گاز ۰/۵٪ و ۱٪ انجام گرفت و نتایج آن با نتایج حاصل از روش عددی مقایسه گردید. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح ذیل است:

۱- به کمک روش تعقیب ذرات بدرستی می‌توان رتبه هر یک از راهگاههای منیفولد ورودی را از نظر سهم دریافت شده از گاز تزریقی به منیفولد ورودی تعیین کرد. دقت روش تعقیب ذرات با کاهش اختلاف توزیع گازهای بازگردانده شده بین سیلندرها افزایش پیدا می‌کند و تنها برای راهگاههایی که سهم کمی از گازهای بازگردانده شده دریافت می‌کنند دقت نتایج کمتر است. به این ترتیب برای نقاط تزریقی که توزیع

مطلوبی بدست می‌دهند دقت نتایج روش تعقیب ذرات مطلوب است و دقت کمتر برای نقاط تزریقی که توزیع گاز تزریق شده از آنها در بین سیلندرها یکسان نیست بی اهمیت خواهد بود.

۲- همانطور که پیش‌بینی می‌شد روش تعقیب ذرات برای شرایطی که گازهای بازگردانده شده با نرخ کمتری به منیفولد ورودی تزریق می‌شوند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

۳- با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی مشخص گردید که در تمامی موارد اختلاف نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش برای راهگاههای دارای بیشترین سهم از گازهای تزریق شده کمترین مقدار است در حالی که این اختلاف، برای راهگاههایی که حداقل نرخ دریافت را از گازهای تزریق شده دارند بیشتر می‌باشد.

۴- با توجه به اینکه شبیه‌سازی عددی به کمک شرایط مرزهای بدست آمده در وضعیت کارکرد طبیعی موتور صورت می‌گیرد، در صورت بروز عواملی که این وضعیت را تغییر دهند الگوی جریان داخل منیفولد با

- [2] Alger, T., "Synergies between High EGR Operation and GDI Systems", SAE paper 2008, No. 2008-01-0134.
- [3] He, Y., Salemat, A., Reese, R., Vick, R., and Amer, A., "Effect of Intake Primary Runner Blockages on Combustion Characteristics and Emissions with Stoichiometric and EGR-Diluted Mixtures in SI Engines", SAE paper 2007, No. 2007-01-3992.
- [4] Millo, F., Pautasso, E., Pasero, P., Barbero, S., and Vennettilli, N., "An Experimental and Numerical Study of an Advanced EGR Control System for Automotive Diesel Engines", SAE paper 2008, No. 2008-01-0208.
- [5] Florea, R., Toraza, D., Henein, N., and Bryzk, W., "Transient Fluid Flow and Heat Transfer in the EGR Cooler", SAE paper 2008, No. 2008-01-0956.
- [6] Hountalas, D. T., Mavropoulos, G., and Zannis, T., "Comparative Evaluation of EGR, Intake Water Injection and Fuel-Water Emulsion as NOx Reduction Techniques for Heavy Duty diesel Engines", SAE paper 2007, No. 2007-01-0120.
- [7] Dhariwal, H. C., "Control of Blowby Emissions and Lubricating Oil Consumption in I.C. Engines", Energy Convers. 1997, Vol. 38, No. 10-13, 1267-1274.
- [8] Torres, A., Henriot, S., "Modeling the Effects of EGR Inhomogeneities Induced by Intake Systems in a Four-Valve Engine" SAE paper 1996, No. 961959.
- [9] Siewert, R. M., Krieger, R. B., Huebler, M. S., Baruah, P. C., Khalighi, B., and Wesslau, M., "Modifying an Intake Manifold to Improve Cylinder-to-Cylinder EGR Distribution in a DI Diesel Engine Using Combined CFD and Engine Experiment", SAE paper 2001, No. 2001-01-3685.
- [10] William, J., Dupont, A., Bazile, R., and Marchal, M., "Study of Geometrical Parameter Influence on Air/EGR Mixing", SAE paper 2003, No. 2003-01-1796.
- [11] Green, R. M., "Measuring the Cylinder-to-Cylinder EGR Distribution in the Intake of a Diesel Engine during Transient Operation" SAE Paper 2000, No. 2000-01-2866.
- [12] Partridge, W. P., Lewis, S. A., Ruth, M. J., Muntean, G. G., Smith, R. C., and Stang, J. H., "Resolving EGR Distribution and Mixing" SAE Paper 2002, No. 2002-01-2882
- [13] Shahabi, P. B., Niazmand, H., Modarres Razavi, M. R., "Evaluation of Effective Parameters on EGR/Blowby Distribution" Internatinal Jouranal of Automotive Engineering, 2011, Vol. 1, No. 1.
- [14] Bashi Shahabi, P., Modarres Razavi, M. R., and Niazmand, H., "Numerical Study of Homogeneous Cylinder-to-Cylinder Distribution of EGR/Blowby Gases to Intake Manifold", 16th Int. Conference on Thermal Engineering & Thermogrammetry (THERMO), Budapest, July 1-3, 2009.

آنچه از شبیه‌سازی حاصل می‌شود شباهت کمتری خواهد داشت. یکی از عواملی که می‌تواند باعث این تفاوت شود تقویت جریانهای برگشتی و امواج فشاری در اثر احتراق نامتوازن در سیلندرها است. این عامل در نقطه تزریق ۳ در دور موتور ۴۰۰۰ rpm و در تمامی نتایج مربوط به نقطه تزریق ۴ قابل مشاهده است. وجه مشترک این نتایج در پایین بودن مجموع سهم دو راهگاهی است که رتبه‌های سوم و چهارم را دارا هستند. با مطالعه نتایج ارائه شده به نظر می‌رسد مقدار بحرانی برای این مجموع تقریباً ۱۷٪ باشد به این معنی که برای شرایطی که مجموع سهم دو راهگاه از این مقدار بحرانی کمتر باشد نتایج حاصل از روش تعقیب ذرات از دقت مناسبی برخوردار نیست.

۵- به کمک روش تعقیب ذرات می‌توان نتایج حاصل از توزیع گازهای بازگردانده شده به منیفولد ورودی برای یک یا چند نقطه تزریق را بخوبی از جنبه کیفی ارزیابی کرد. از آنجاییکه در بسیاری از موارد انتخاب چند نقطه تزریق مناسب از میان چندین نقطه تزریق ممکن کار ساده‌ای نیست به کمک روش تعقیب ذرات می‌توان نقاط تزریق مطلوب‌تر را برای بررسی‌های دقیق‌تر انتخاب کرد.

۶- مقایسه نتایج چهار نقطه تزریق در نظر گرفته شده نشان می‌دهد که نقطه تزریق ۱ در بین سایر نقاط تزریق توزیع یکنواخت‌تری از گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی را بدست می‌دهد.

۸- تشکر و قدردانی

بدین وسیله نویسندگان مقاله از حمایت مادی و معنوی شرکت تحقیقات موتور ایران خودرو (IPCO) برای انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین از زحمات آقای مهندس ایزانلو ریاست محترم بخش تحقیقات، پرسنل فنی آزمایشگاه و تیم کالیبراسیون شرکت تحقیقات موتور ایران خودرو که با در اختیار گذاشتن تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز، نویسندگان را در انجام تستهای لازم یاری دادند سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- [1] Ladomatos, N., Abdelhalim, S. M., and Zhao, H., "Effect of Exhaust Gas Recirculation Temperature on Diesel Engine Combustion and Emissions", Journal of Automobile Engineering, 1998, Vol. 212.

[۱۵] باشی شهابی، پیمان؛ مدرس رضوی، سید محمد رضا؛ نیازمند، حمید؛ تحلیل عددی توزیع گازهای برگشتی و نشستی از محفظه لنگ تزریق شده به چند راهه ورودی در هر استوانه، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات موتور، شماره ۱۵، ۱۳۸۸.

[۱۶] باشی شهابی، پیمان؛ بررسی عوامل موثر بر جانمایی محل تزریق گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی به روشهای عددی و تجربی، پایان نامه دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مکانیک دانشکده مهندسی، بهمن ماه ۱۳۸۹.