



بررسی تاثیر بکارگیری دو انژکتور تزریق سوخت بر قطر قطرات در جریان عرضی

محمد جواد خیامی¹، علی رضا شاطری^{2*}، محمد مهدی دوستدار³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

* شهرکرد، صندوق پستی 115، shateri@eng.sku.ac.ir

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تاثیر استفاده همزمان از دو انژکتور تزریق سوخت در یک جریان هوای عرضی است. امروزه روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی تزریق سوخت در موتورهای احتراق داخلی پیشنهاد می‌شود. این بهینه‌سازی‌ها بدلیل تاثیر بالای این متغیر بر کارایی موتور و کاهش آلاینده‌ها است. روشی که در این مطالعه پیشنهاد شده است استفاده از دو انژکتور پاشش سوخت بجای تک انژکتور در مسیر ورودی هوا می‌باشد. استفاده از دو انژکتور بمنظور برخورد دادن دو اسپری سوخت به یکدیگر و افزایش اغتشاشات و برخورد قطرات و در نتیجه کمک به شکسته شدن و اتمیزه شدن سریع‌تر آن‌ها است. همچنین استفاده از دو انژکتور می‌تواند امکان کنترل بیشتر بر روی توزیع زمانی و فضایی را فراهم آورد. شبیه‌سازی‌ها بصورت عددی و با استفاده از کد تعمیم یافته کیوا انجام شده است. این شبیه‌سازی‌ها مشابه شرایط تزریق سوخت در مانیفولد موتور احتراق داخلی اشتعال جرقه‌ای انجام شده است. نتایج بیانگر آن است که قرار گرفتن دو انژکتور در یک فاصله‌ی طولی، نصب دو انژکتور در زاویه‌ی 70 درجه با مجرا، قرار دادن دو انژکتور در روبروی هم و یا با زاویه قائمه و زاویه‌ی مخروطی 15 درجه، سبب کاهش قطر متوسط قطرات می‌گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند در طراحی سیستم تزریق سوخت یک موتور احتراق داخلی مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 اسفند 1396

پذیرش: 17 فروردین 1397

ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

موتور احتراق داخلی

تزریق سوخت

انژکتور

شبیه‌سازی اسپری سوخت

جریان عرضی

Evaluation the Effect of Using Two Fuel Nozzles on Droplet Size in Cross Flow

Mohammad Javad khayyami¹, Ali Reza Shateri^{1*}, Mohammad Mahdi Dostdar²

1- Mechanical Engineering Department, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Mechanical Engineering Department, Imam Hossain University, Tehran, Iran

* P.O.B. 115, Shahrekord, Iran, shateri@eng.sku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 March 2018
Accepted 06 April 2018
Available Online 11 May 2018

Keywords:

Internal combustion engine
Fuel injection
Injector
Fuel spray simulation
Cross flow

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the effect of the simultaneous use of fuel injectors in an air cross flow. Nowadays, several methods are proposed for optimizing fuel injection in internal combustion engines. These optimizations are due to the high impact of this parameter on engine performance and reduction of pollutant. The method proposed in this study is to use two fuel injectors instead of a single injector in the air inlet manifold. The uses of two injectors in order to impingement two fuel sprays and increase the turbulent and collision of droplets, and so break them up faster. Also, the use of two injectors can provide more control over spatial and temporal distribution. Simulations are performed numerically using the generalized Kiva code. These simulations are similar to the fuel injection conditions in the manifold of the spark ignition internal combustion engine. The results indicate that the placement of two injectors in a longitudinal distance, the installation of two injectors at a 70 ° angle with the duct, placing two injectors in 180° or 90° relative angles and a 15° conical angle reduces the average diameter of the droplets. The results of this study can be used to design an internal combustion engine fuel injection system.

1- مقدمه

جلوگیری از برخورد اسپری سوخت به دیواره، قطرات دارای توزیع فضایی مناسب و یکنواختی اندازه باشند. در این صورت، قطرات بصورت همزمان و به سرعت تبخیر شده و مخلوط مناسبی از سوخت و هوا برای تشکیل یک احتراق مناسب ایجاد می‌کند که در این صورت، راندمان احتراق افزایش و آلودگی آن کاهش می‌یابد.

پژوهشگران مطالعات و بررسی‌های زیادی بر روی روش‌های تزریق سوخت در موتور احتراق داخلی و تاثیر متغیرهای مختلف بر راندمان آن انجام داده‌اند. این مطالعات بیشتر پیرامون نوع انژکتور و موقعیت و زمان پاشش آن بوده است. روشی که در این مطالعه برای تجزیه بیش‌تر و سریع‌تر قطرات در

تزریق سوخت به یک موتور احتراق داخلی از جمله‌ی اصلی‌ترین و تاثیر گذارترین عوامل بر افزایش توان و کاهش آلاینده‌های آن است چرا که کاهش اندازه‌ی قطرات، سبب افزایش سطح مشترک سوخت با محیط پیرامون شده و افزایش نرخ تبخیر قطرات و بهبود کیفیت احتراق را بدنبال دارد. در موتورهای بنزینی و HCCI¹ تزریق سوخت در منیفولد هوای ورودی سیلندر رخ می‌دهد و انژکتور وظیفه‌ی تزریق و اتمیزه کردن سوخت در زمان بسیار کوتاه را برعهده دارد. همچنین جانمایی این انژکتور باید بنحوی باشد که ضمن

¹ homogeneous charge compression ignition

ورودی موتور پیشنهاد می‌شود استفاده همزمان از دو انژکتور برای پاشش سوخت است. مزیت این روش علاوه بر برخورد دادن دو اسپری و کمک به شکسته شدن قطرات، کنترل بهتر و دقیق‌تر پاشش سوخت بمنظور افزایش بازدهی احتراق و کاهش آلاینده‌ها است.

تحقیقاتی که تا کنون در زمینه بررسی برخورد دو اسپری تزریق سوخت و عوامل موثر بر مشخصه‌های عملکردی آن انجام شده عمدتاً با در نظر گرفتن شرایط مشابه موتور احتراق تراکمی و با فرض ساکن بودن محیط پیرامونی انجام شده است. این مطالعات در دو حوزه عددی و تجربی و با رویکرد افزایش کیفیت آتمیزه شدن گزارش شده است. از آن جمله یورتی و همکاران [1] به مطالعه برخورد دو اسپری تزریق سوخت مخروطی پرداخته و تاثیر زاویه برخورد و فشار هوا را بر قطر قطرات بررسی کردند. آرای و سائو [2] به مطالعه تجربی برخورد دو انژکتور تزریق بنزین در فشار محیط پرداخته و نشان داده‌اند قطر متوسط قطرات می‌تواند در این حالت نسبت به حالت تک انژکتور تا 50٪ کاهش یابد. در تحقیقی مشابه چیبا و همکاران [3] به بررسی تزریق سوخت دیزل از انژکتور در فشار بالای محیط بصورت تجربی پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد عمق نفوذ و عرض اسپری پس از برخورد بترتیب شدت کاهش و افزایش می‌یابد. کو و ریو [4] بصورت عددی و تجربی برخورد دو اسپری را در فشارها و زوایای مختلف پاشش بررسی کرده‌اند. آن‌ها در کار تجربی، توزیع زاویه‌ای مقدار سوخت تزریق شده و در کار عددی تنها قطر متوسط قطرات را بدست آورده‌اند. مارویاما و همکاران [5] نیز به صورت تجربی به تحلیل این مسئله پرداختند و گزارش دادند که پس از برخورد دو اسپری، عمق نفوذ و حجم اشغال شده‌ی اسپری بترتیب کاهش و افزایش می‌یابد اما راجع به قطر قطرات گزارشی ارائه نداده‌اند.

کیم و همکاران [6] به استخراج مشخصه‌های عملکردی اسپری نظیر قطر متوسط قطرات، عمق نفوذ و سرعت نفوذ در فواصل مختلف دو انژکتور بصورت عددی پرداختند و گزارش دادند با افزایش فاصله دو انژکتور، عمق نفوذ پس از برخورد افزایش داشته اما قطر متوسط قطرات کاهش می‌یابد. قاسمی و همکاران [7] نیز با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس به مطالعه مشخصه‌های اسپری تزریق شده از دو انژکتور پرداخته و جریان القایی اطراف آن را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که با افزایش زاویه برخورد، عمق نفوذ و قطر قطرات همزمان کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر مطالعات و تحقیقات گسترده‌ای درباره پاشش سوخت و یا آب به یک جریان عرضی هوا انجام شده است. هدف از این مطالعات، نزدیک بودن شبیه‌سازی‌ها به شرایط واقعی تزریق سوخت در موتور احتراق جرقه‌ای و یا دیگر کاربردهای عملی آن مانند خنک کاری تبخیری است که در ادامه تعدادی از آن‌ها بیان خواهد شد.

ژانگ و همکاران [8,9] بترتیب با قرار دادن یک و دو انژکتور در یک کانال و عبور هوا در داخل آن بصورت تجربی، توزیع سرعت هوا در مقاطع مختلف و گردابه‌های بوجود آمده ناشی از تزریق سوخت را بدست آوردند.

بای و همکاران [10] با استفاده از سیستم PIV¹ و تکنیک پردازش تصویر، جریان پاشش عرضی یک انژکتور پاشش آب را در داخل یک جریان عرضی هوا مطالعه کرده و تاثیر زوایای مختلف پاشش و سرعت‌های مختلف جریان هوا را بر توزیع و قطر قطرات بررسی کردند.

کاستا و همکاران [11] با پاشش آب در داخل جریان عرضی هوا در زوایای پاشش، سرعت‌های هوا و دبی‌های مختلف آب، عمق نفوذ، طول

شکست و کیفیت پودر شدن قطرات را مطالعه کردند. پائانو و همکاران [12] به بررسی تجربی تاثیر جریان عرضی بر برخورد اسپری به سوپاپ در موتور HCCI پرداختند. آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های تصویر برداری مای²، اثر جریان عرضی در برخورد اسپری به دیواره را به صورت کیفی و کمی بررسی کردند. دشیاند و همکاران [13] بصورت عددی و با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی اسپری تزریق شده در داخل جریان عرضی هوا را شبیه سازی کرده و ساختار اسپری را در شرایط مختلف جریان عرضی مورد مطالعه قرار دادند. پوسلت و همکاران [14] به بررسی تاثیر تزریق سوخت از دو انژکتور و افزایش فشار سوخت بر روی کیفیت احتراق موتور بنزینی پرداخته و نشان دادند بکارگیری آن دوده‌های هیدروکربنی را تا 12٪ کاهش می‌دهد.

همانگونه که بیان شد تا کنون مطالعات زیادی در رابطه با تزریق سوخت از دو انژکتور و در شرایط مشابه موتور احتراق-جرقه‌ای انجام نشده است که در این مطالعه به آن پرداخته و متغیرهای موثر بر آن بررسی خواهد شد.

هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر برخورد دادن اسپری خروجی از دو انژکتور تزریق سوخت بنزین در یک جریان عرضی هوا بر کیفیت خرد شدن قطرات در شرایط مختلف است. در این بررسی سعی شده شبیه‌سازی‌ها مشابه شرایط اسپری سوخت در موتور احتراق جرقه‌ای باشد. برای این منظور ابتدا مدل اورورکه بمنظور پیش‌بینی دقیق‌تر برخورد قطرات در کد کیوا بسط داده شده و سپس با استفاده از آن به شبیه‌سازی این مسئله و استخراج قطر متوسط قطرات در طول کانال در شرایط مختلف قرار گیری انژکتور دوم پرداخته شده است.

2- معادلات حاکم و تعریف مساله

2-1- معادلات حاکم و روند حل عددی

برای شبیه سازی جریان اسپری سوخت و محیط پیرامون آن از برنامه کیوا استفاده شده است. این برنامه بدلیل اینکه با رویکرد تحلیل موتور احتراق داخلی تدوین شده، دارای قابلیت‌های بسیار بالایی در زمینه تحلیل جریان‌های دو فازی، احتراق و واکنش‌های شیمیایی نسبت به دیگر نرم افزارهای موجود است.

اساس شبیه‌سازی جریان اسپری در این برنامه بر مبنای فرض جریان پیوسته برای هوا و تحلیل جریان بصورت اویلری بعنوان یک فاز و در نظر گرفتن قطرات سوخت بعنوان ذرات مجزا و تحلیل لاگرانژی برای این فاز است. معادله‌ی بقای جرم برای فاز گازی در رابطه‌ی (1) بیان شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = \dot{\rho}^s + \dot{\rho}^c \quad (1)$$

که در آن $\dot{\rho}^s$ معرف جرم اضافه شده به واحد حجم گاز بر اثر تبخیر اسپری و $\dot{\rho}^c$ تغییر جرم بر اثر واکنش‌های شیمیایی است. همچنین معادله بقای ممنتوم طبق رابطه (2) ذکر شده است.

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

که در آن $\vec{F}^s$ نرخ تغییر ممنتوم در واحد حجم بر اثر ورود اسپری می‌باشد.

معادله (3) نیز معادله‌ی بقای انرژی را بیان می‌کند.

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} I) = -p \vec{\nabla} \cdot \vec{u} - \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \rho \varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s \quad (3)$$

² Mie Scattering Image

¹ Particle Image Velocimetry

داخل مانیفولد موتور احتراق داخلی پرداخته می‌شود. هدف از این کار بررسی رفتار این نوع اسپری تحت شرایط مختلف بوجود آمده در داخل منیفولد بوده تا بتوان مدیریت پاشش سوخت مناسبی در موتورهای بنزینی از نظر اندازه‌ی قطرات سوخت تزریق شده در داخل مجرا داشت.

بدین منظور مطابق شکل 1 دو نازل مشابه، بصورت مورب در یک مجرای هوا قرار داده شده و پس از اعتبار سنجی با نتایج آزمایشگاهی، قطر متوسط قطرات در طول زمان پاشش و تحت شرایط مختلف محاسبه شده است. شرایط مورد بررسی دقیقاً مشابه تزریق سوخت در موتورهای احتراق جرقه‌ای بوده و شبیه‌سازی انژکتور مشابه انژکتور مورد استفاده در موتور XU7JP/L3 فرض شده است.

هندسه مورد استفاده در این مطالعه مجرای با سطح مقطع دایره‌ای به قطر 3cm و طول 9cm است که انژکتور اول در $x_1=3\text{cm}$ از شروع کانال قرار گرفته است. جریان هوا با سرعت 50m/s بصورت دائم در جریان است. شرایط نازل‌های سوخت و متغیرهای مورد بررسی در جدول 2 ارائه شده است. تمامی این شرایط بنحوی انتخاب شده تا بتواند شرایط تزریق سوخت از انژکتور به داخل مانیفولد هوای ورودی به یک موتور احتراق داخلی اشتعال جرقه‌ای را شبیه سازی کند.

2-3- اعتبار سنجی

بمنظور اعتبار سنجی کد تعمیم یافته و روش حل، شبیه‌سازی برای شرایط مشابه شرایط آزمایشگاهی ژانگ و همکاران [9] انجام شده است. شرایط آن‌ها مطابق شکل 1 و با دو انژکتور ولی با سطح مقطع مربعی و ضلع 9.5cm در نظر گرفته شده بود که بمنظور اعتبار سنجی کار حاضر، هندسه و شرایط انژکتورها دقیقاً شبیه‌سازی شد. جریان هوا با سرعت 5m/s در کانال در جریان بوده و دو انژکتور تزریق آب با دبی‌های برابر $0.03\text{m}^3/\text{h}$ ، زوایای طولی 60 و 120 درجه نسبت به کانال و زاویه‌ی مخروطی 80 درجه و دقیقاً روبروی هم قرار گرفته‌اند. آن‌ها پروفیل سرعت هوا در 1.2cm بعد از انژکتورها را اندازه

جدول 2 مقادیر در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی

Table 2 Initial and boundary condition

مقدار	واحد	متغیر
0.16	mm	قطر نازل
19.6	gram	جرم تزریق شده
100	ms	مدت زمان پاشش
300	K	دمای سوخت
300	K	دمای هوا
3.85	μm	قطر اولیه قطرات
0-30	mm	فاصله دو انژکتور (dx)
30-180	deg	زاویه شعاعی (ϕ)
30-150	deg	زاویه طولی (θ)
15-90	deg	زاویه مخروطی پاشش (α)

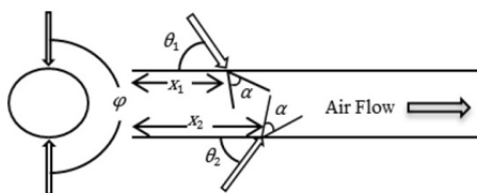


Fig. 1 A schematic of the two injectors' collision in cross flow

شکل 1 ترسیمی برخورد دو انژکتور در جریان عرضی

ترم‌های چشمه $\dot{Q}^c$ و $\dot{Q}^s$ بترتیب معرف گرمای تولیدی به سبب فعل و انفعالات شیمیایی و برهم کنش‌های اسپری (تظیر برخورد آن‌ها) می‌باشد.

در فاز گازی نیز خواص قطره با استفاده از تابع توزیع قطرات محاسبه می‌گردد. این تابع علاوه بر زمان به ده عامل دیگر وابسته است که عبارتند از سه متغیر مکانی، سه متغیر سرعت، شعاع قطره، دمای قطره، انحرافات سطح قطره و نرخ نوسانات انحراف سطح قطره. فرم وابسته به زمان معادله f برای تحلیل اسپری به صورت رابطه (4) معرفی شده است [15].

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{\nabla}_x \cdot (f\vec{v}) + \vec{\nabla}_v \cdot (f\vec{a}) + \frac{\partial}{\partial r}(fR) + \frac{\partial}{\partial T_d}(fT_d) + \frac{\partial}{\partial y}(f\dot{y}) + \frac{\partial}{\partial \dot{y}}(f\ddot{y}) = \dot{f}^{\text{coll}} + \dot{f}^{\text{bu}} \quad (4)$$

که $\dot{f}^{\text{coll}}$ و $\dot{f}^{\text{bu}}$ بترتیب ترم‌های وابسته به برخورد و تجزیه‌ی قطرات هستند.

بدلیل اینکه هدف از این مطالعه بررسی رفتار برخورد دو اسپری سوخت می‌باشد، برنامه‌ی کیوا برای بررسی دقیق‌تر برخورد دو قطره تعمیم داده شد. این برنامه برای پیش‌بینی برخورد دو قطره از مدل برخورد اورورکه استفاده می‌کند. مدل اورورکه که مدلی شناخته شده و بسیار پر کاربرد است، توانایی پیش‌بینی فقط دو حالت ادغام و جدایی کششی را داشته که در این مطالعه برای پیش‌بینی دو حالت دیگر پیامد، یعنی حالت‌های پرشی و جدایی انعکاسی، تعمیم داده شده است. همچنین در حالت‌های جدایی کششی و جدایی انعکاسی، دو قطره پس از برخورد می‌توانند به دو، سه و یا بیشتر از سه قطره شکسته شوند. پیش‌بینی تولید و شبیه‌سازی رفتار این قطرات که به قطرات ماهواره‌ای شناخته می‌شوند نیز در این برنامه تعمیم داده شد. مدل‌های تعمیم داده شده در جدول 1 بیان شده است.

برای ارزیابی قطر قطرات در این پژوهش، از قطر متوسط ساوتر¹ که از رابطه (5) بدست می‌آید استفاده می‌شود. در این رابطه n تعداد قطرات با قطر d و N تعداد کل قطرات است.

$$SMD = \frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N n_i d_i^2} \quad (5)$$

شرایط مرزی اعمال شده بر این مسئله برای فاز گازی، سرعت معین در ورودی و فشار معین در خروجی فرض شده است. همچنین در دیواره‌ها، شرط مرزی عدم لغزش برای هر دو فاز تعیین شده است.

2-2- تعریف مساله

همانگونه که بیان شد، در این مطالعه به بررسی رفتار برخورد دو اسپری پاشش سوخت در یک جریان داخلی هوا و مشابه شرایط تزریق سوخت در

جدول 1 مدل‌های تعمیم داده شده در کد کیوا

Table 1 Used models in Kiva code

شرایط	مدل استفاده شده
پیش بینی برخورد	اورورکه [16]
تشخیص ادغام- جدایی کششی	بریزیراسمیت [17]
تشخیص ادغام - جدایی انعکاسی	اشگریز و پو [18]
تشخیص پرشی	استراد [19]
قطرات ماهواره‌ای	مونانور و ریتز [20]

¹ Sauter Mean Diameter

در معرض جریان هوا قرار دارند دارای قطر بیشتری نسبت به قطرات پشت اسپری می‌باشند. این پدیده به دو دلیل می‌تواند توجیه گردد. اول اینکه بدلیل نیروی درگ ناشی از وجود سرعت نسبی بین قطرات و هوا، سرعت قطرات بشدت کاهش یافته و این کاهش سرعت، سبب برخورد قطرات تزریق شده جدیدتر به آن‌ها شده و با یکدیگر ادغام می‌شوند.

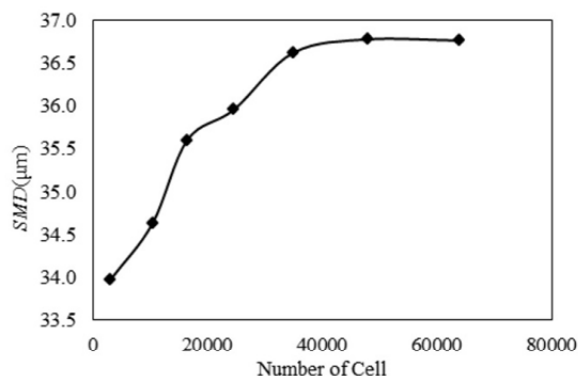


Fig. 4 The effect of the number of cells on the SMD

شکل 4 تأثیر تعداد سلول بر قطر متوسط قطرات

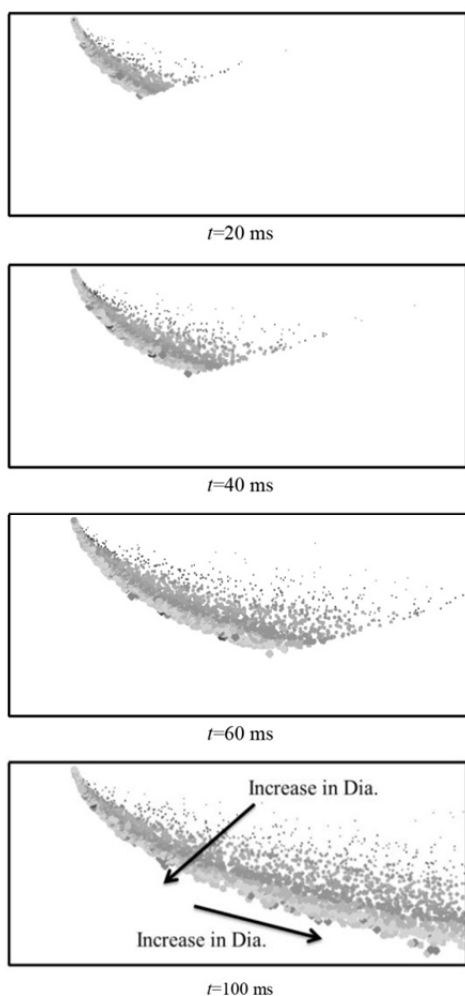


Fig. 5 The spray injected in an air flow ($\theta_1 = 70^\circ$, $x_1 = 30\text{mm}$, $\alpha = 15^\circ$)

شکل 5 اسپری تزریق شده در داخل جریان ($\theta_1 = 70^\circ$, $x_1 = 30\text{mm}$, $\alpha = 15^\circ$)

گیری و گزارش داده‌اند که از این پروفیل برای اعتبارسنجی استفاده شده است.

پروفیل سرعت در کار حاضر و در مقایسه با کار ژانگ و همکاران در شکل 2 نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود شبیه‌سازی‌ها در هر دو زاویه تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند. همچنین در زاویه 60 درجه که مشابه کار حاضر است، تطابق بهتری مشاهده می‌شود.

3- نتایج

پس از اعتبار سنجی کد تعمیم یافته، به بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه‌ای حل برای هندسه‌ی نشان داده شده در شکل 1 پرداخته می‌شود. شبکه مورد استفاده در این هندسه از نوع شش وجهی مکعبی بوده که در شکل 3 نشان داده شده است. برای بررسی استقلال از شبکه، مقدار قطر متوسط قطرات در تعداد مختلف سلول محاسبه شده است. همانگونه که در شکل 4 مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سلول، مقدار قطر متوسط قطرات به مقدار ثابت میل کرده و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند و در نتیجه استفاده از شبکه‌ای با 48000 سلول منطقی بنظر می‌رسد.

پس از اطمینان از صحت نتایج عددی، تأثیر موقعیت انژکتور دوم در چهار حالت مختلف بر روی اندازه متوسط قطرات بررسی می‌شود. بدین منظور و برای درک بهتر شرایط اسپری سوخت از تک انژکتور در معرض جریان عرضی، در ابتدا ابر تشکیل شده از تزریق یک اسپری در جریان داخلی بررسی می‌شود. این ابر قطرات که در شکل 5 ارائه شده است توزیع و اندازه قطرات را در داخل جریان و طی زمان پاشش نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود پس از تزریق سوخت در جریان، قطرات سوختی که بیشتر

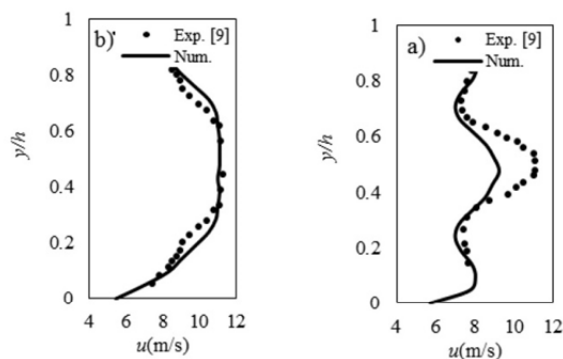


Fig. 2 velocity profile in the present study and the experimental results [9] in $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$ (a) and $\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$ (b) ($x_1 = x_2 = 30\text{mm}$, $\varphi = 180^\circ$, $\alpha = 80^\circ$)

شکل 2 پروفیل سرعت در مطالعه حاضر و نتایج تجربی مرجع [9] در زاویه‌ی

($x_1 = x_2 = 30\text{mm}$, $\varphi = 180^\circ$, $\alpha = 80^\circ$) $\theta_1 = \theta_2 = 120^\circ$ (b) و $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$ (a)

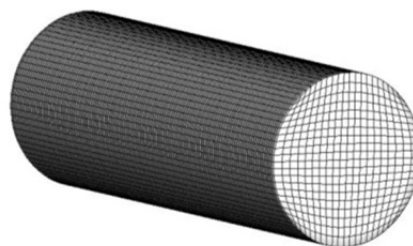


Fig. 3 The computational grid in the present study

شکل 3 شبکه محاسباتی استفاده شده در این مطالعه

زاویه احتمال برخورد قطرات با یکدیگر نیز کاهش یافته و قطرات کمتری با یکدیگر ادغام می‌شوند و در مجموع در زاویه‌ی 15 درجه، کمترین مقدار قطر قطرات مشاهده می‌شود.

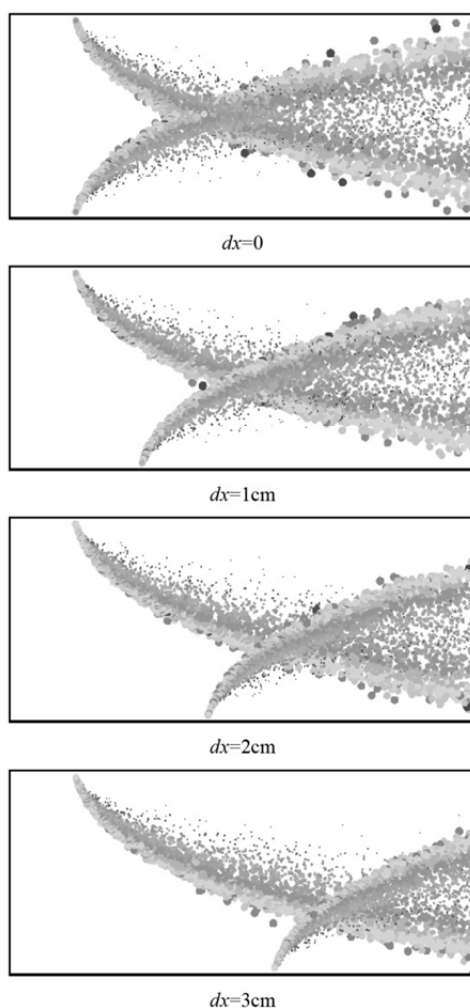


Fig. 7 the droplets sprayed from two injectors in a duct in various distances of between the injectors ($\theta_1=\theta_2=70^\circ$, $\varphi=180^\circ$, $\alpha=15^\circ$, $t=100\text{ms}$)
 شکل 7 قطرات پاشش شده از دو اسپری در مجرا در فواصل مختلف دو انژکتور ($\theta_1=\theta_2=70^\circ$, $\varphi=180^\circ$, $\alpha=15^\circ$, $t=100\text{ms}$)

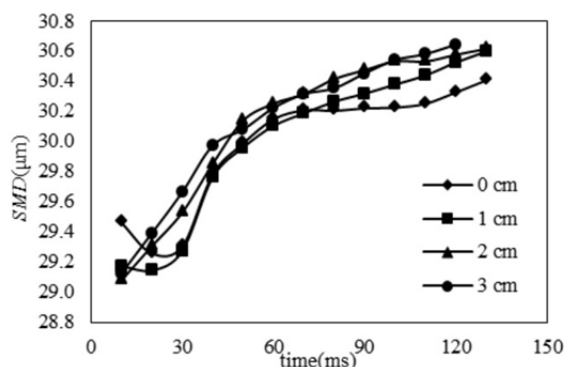


Fig. 8 The SMD of the droplets based on the time in distances of between the injectors ($\theta_1=\theta_2=70^\circ$, $\varphi=180^\circ$, $\alpha=15^\circ$)
 شکل 8 قطر متوسط قطرات بر حسب زمان در موقعیت‌های طولی مختلف انژکتور دوم ($\theta_1=\theta_2=70^\circ$, $\varphi=180^\circ$, $\alpha=15^\circ$)

دلیل دوم این است قطرات ریزتر تشکیل شده در اطراف اسپری با قرار گرفتن در معرض جریان هوا به سمت مرکز اسپری حرکت کرده و با قطرات واقع در مرکز اسپری ترکیب و ادغام شوند. این پدیده‌ها سبب افزایش قطر قطرات با افزایش فاصله از نازل سوخت نیز می‌شوند زیرا با افزایش فاصله از نازل، زمان بیشتری برای حرکت و ادغام قطرات وجود خواهد داشت. لازم بذکر است قطرات اسپری بعد از 80 ms از شروع تزریق از کانال خارج شده و پس از آن شکل ابر قطرات پایدار می‌ماند. همچنین قطر متوسط قطرات بر حسب زمان پاشش در این حالت در شکل 6 ارائه شده است که بیانگر افزایش قطر متوسط قطرات در طی زمان پاشش بوده و در زمان $t=130\text{ms}$ قطر متوسط به $30.3\mu\text{m}$ می‌رسد، لازم بذکر است انتگرال‌گیری مکانی در کل حجم مجرا و در هر لحظه انجام شده است.

شکل 7 ابر قطرات اسپری شده در داخل مجرا را در موقعیت‌های طولی مختلف انژکتور دوم و در زمان 100 ms پس از تزریق ارائه می‌دهد. همانگونه که بیان شد با فاصله گرفتن قطرات از اسپری، اندازه‌ی آن‌ها افزایش و سرعت آن‌ها کاهش می‌یابد و در صورتی که انژکتور دوم در فاصله‌ی بیشتری از انژکتور اول قرار گیرد، قطرات اسپری دوم به قطرات کندتر و بزرگتر از اسپری اول برخورد کرده و در نتیجه احتمال ادغام قطرات دو اسپری افزایش یافته و قطر متوسط قطرات افزایش می‌یابد.

در شکل 8 تاثیر متغیر فاصله‌ی طولی دو انژکتور بر متوسط قطر قطرات در طی زمان پاشش بصورت کمی ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله‌ی دو انژکتور، قطر قطرات در ابتدا بشدت افزایش یافته و سپس تقریباً ثابت می‌ماند. بعبارت دیگر کمترین قطر قطرات در موقعیتی که دو انژکتور روبروی هم قرار گرفته‌اند رخ می‌دهد و با افزایش فاصله‌ی این دو انژکتور قطر متوسط قطرات افزایش می‌یابد. مقدار کمینه‌ی قطر متوسط قطرات در این حالت برابر $30.4\mu\text{m}$ است که تقریباً با مقدار تک انژکتور برابر است.

در شکل 9 قطر متوسط قطرات بر حسب زمان در زوایای مخروطی مختلف پاشش دو انژکتور ارائه شده است. در این شبیه‌سازی فرض شده زاویه مخروطی در هر دو نازل با هم برابر باشند. همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش زاویه مخروطی از 15 به 60 درجه تاثیر منفی بر اندازه قطرات داشته اما با افزایش بیشتر این زاویه به 90 درجه، کاهش شدید قطر متوسط قطرات مشاهده می‌شود. دلیل این امر این است که با افزایش زاویه مخروطی سرعت نفوذ قطرات کاهش یافته و دیرتر شکسته می‌شوند اما با افزایش بیشتر این

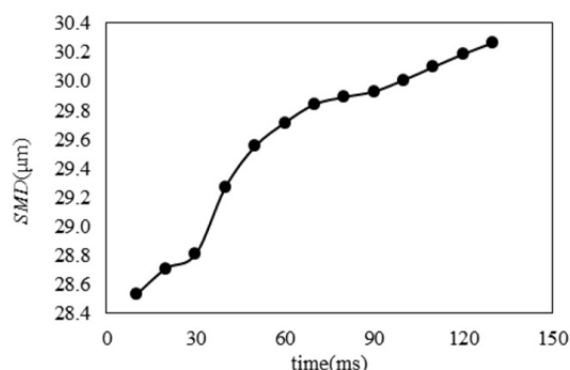


Fig. 6 The SMD of the droplets based on the time in single injector ($\theta_1=70^\circ$, $x_1=30\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$)
 شکل 6 قطر متوسط قطرات بر حسب زمان در تک انژکتور، ($\theta_1=70^\circ$, $x_1=30\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$)

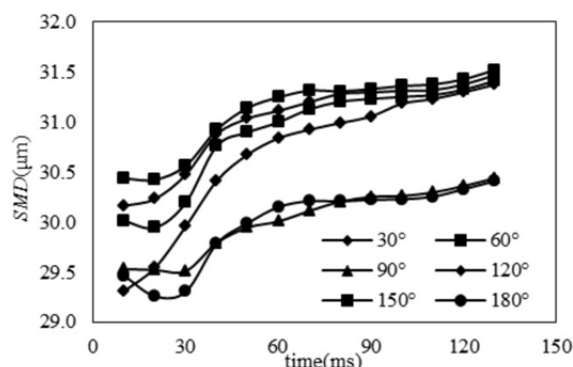


Fig. 11 The SMD of the droplets based on the second injector's radial angle ($x_1=x_2=30\text{mm}$, $\theta_1=\theta_2=70^\circ$, $\alpha=15^\circ$)

شکل 11 قطر متوسط قطرات بر حسب زاویه شعاعی انژکتور دوم ($x_1=x_2=30\text{mm}$, $\theta_1=\theta_2=70^\circ$, $\alpha=15^\circ$)

جدول 3 تاثیر متغیرهای مختلف بر کمترین و بیشترین قطر متوسط قطرات و موقعیت مربوطه

Table 3 Different variables effect on Max. and Min. of SMD and its condition

متغیر	کمترین قطر موقعیت (μm)	بیشترین قطر موقعیت (μm)
فاصله دو انژکتور (dx)	$dx=0\text{mm}$ 30.4	$dx=30\text{mm}$ 30.6
زاویه شعاعی (φ)	$\varphi=180^\circ$ 30.4	$\varphi=150^\circ$ 31.5
زاویه طولی (θ)	$\theta=70^\circ$ 30.4	$\theta=150^\circ$ 32.5
زاویه مخروطی پاشش (α)	$\alpha=15^\circ$ 30.4	$\alpha=60^\circ$ 30.9

4- نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر متغیرهای مختلف قرار گیری انژکتور دوم بر قطر متوسط قطرات سوخت تزریق شده از دو انژکتور در یک جریان عرضی هوا مطالعه و بررسی شد. این مطالعه به روش عددی و با استفاده از کد تعمیم یافته کیوا انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که کمترین قطر متوسط قطرات زمانی رخ خواهد داد که:

- 1- دو انژکتور دقیقاً روبروی هم و در یک فاصله‌ی طولی قرار گیرند.
- 2- دو انژکتور در زاویه‌ی طولی یکسان و برابر 70 درجه نسبت به مجرا نصب شوند.
- 3- بهترین زاویه مخروطی انژکتورها 15 درجه باشد.
- 4- زاویه‌ی شعاعی 90 و 180 درجه بهترین زاویه‌ی نصب دو انژکتور قرار داده شود.

از نتایج این مطالعه در طراحی سیستم تزریق سوخت در موتور احتراق داخلی اشتعال جرقه‌ای که نحوه‌ی تزریق سوخت در بازدهی موتور بسیار با اهمیت است استفاده می‌شود.

5- فهرست علائم

$\bar{a}$	شتاب قطره (ms^{-2})
d	قطر قطره (m)
f	تابع توزیع قطره
$\bar{g}$	شتاب گرانش (ms^{-2})
I	انرژی داخلی (Jkg^{-1})
$\bar{j}$	شار حرارتی (W)

قطر متوسط قطرات در مجرا در زوایای طولی مختلف نیز در شکل 10 رسم شده که نشان می‌دهد با افزایش زاویه پاشش تا 70 درجه قطر متوسط قطرات کمی کاهش می‌یابد اما هنگامی که زاویه قائم است قطراتی که در معرض جریان قرار گرفته‌اند شتاب منفی بزرگتری داشته و سرعت آن‌ها بشدت کاهش می‌یابد که باعث می‌شود با برخورد قطرات جدید به آن‌ها بدلیل سرعت نسبی کم، قطرات با یکدیگر ادغام شده و بزرگتر شوند. با افزایش بیشتر زاویه‌ی طولی پاشش و تاثیر جریان هوا بر کاهش سریع سرعت قطرات، توده‌ی قطرات در فاصله‌ی نزدیکتری به نازل انژکتور شکل گرفته که این امر سبب افزایش برخورد و ادغام قطرات و در نتیجه افزایش قطر قطرات می‌شود. در این حالت زاویه‌ی 70 درجه مناسب‌ترین زاویه برای نصب دو انژکتور است.

تاثیر زوایای شعاعی مختلف بر قطر متوسط قطرات خروجی در شکل 11 نشان داده شده است. با افزایش زاویه φ ، سرعت نسبی بین قطرات دو اسپری افزایش یافته و این امر سبب افزایش شدت برخورد دو اسپری و شکسته شدن سریعتر قطرات می‌گردد و در زوایای 90 و 180 درجه کاهش شدید قطر متوسط قطرات مشاهده می‌شود.

شبیه‌سازی‌ها در این مطالعه برای چهار متغیر مستقل انجام شده و تاثیر هر کدام بر اندازه‌ی متوسط قطرات محاسبه شده است. از میان این چهار متغیر، تغییر فاصله طولی با 0.65% تغییر بین کمترین و بیشترین حالت، کمترین تاثیر و تغییر زاویه‌ی طولی با 7%، بیشترین تاثیر را بر اندازه‌ی قطرات دارند. مقدار تاثیر هر کدام از این متغیرها در بهترین و بدترین حالت و مقدار مربوطه نیز در جدول 3 ارائه شده است.

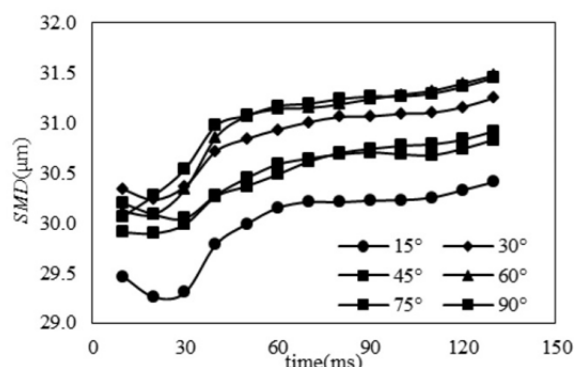


Fig. 9 The SMD of the droplets based on the time in various cone angles ($x_1=x_2=30\text{mm}$, $\theta_1=\theta_2=70^\circ$, $\varphi=180^\circ$)

شکل 9 قطر متوسط قطرات بر حسب زمان در زوایای مخروطی مختلف ($x_1=x_2=30\text{mm}$, $\theta_1=\theta_2=70^\circ$, $\varphi=180^\circ$)

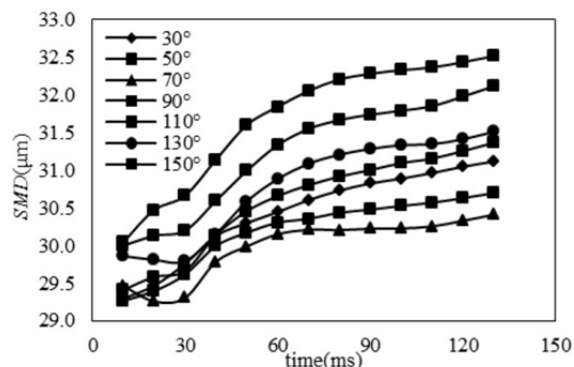


Fig. 10 The SMD of the droplets based on the longitudinal angle of the two injectors ($x_1=x_2=30\text{mm}$, $\varphi=180^\circ$, $\alpha=15^\circ$)

شکل 10 قطر متوسط قطرات بر حسب زاویه طولی دو انژکتور ($x_1=x_2=30\text{mm}$, $\varphi=180^\circ$, $\alpha=15^\circ$)

- Institute for Liquid Atomization and Spray Systems-Asia*, Busan, Korea, October 11-13, 2001.
- [6] S. Kim, D. J. Lee, C. S. Lee, Modeling of binary droplet collisions for application to inter-impingement sprays, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, No. 6, pp. 533-549, 2009.
- [7] A. Ghasemi, R. M. Barron, R. Balachandar, Spray-induced air motion in single and twin ultra-high injection diesel sprays, *Fuel*, Vol. 121, No. 1, pp. 284-297, 2014.
- [8] H. Zhang, B. Bai, L. Liu, H. Sun, et al., Droplet dispersion characteristics of the hollow cone sprays in cross flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 45, No. 1, pp. 25-33, 2013.
- [9] H. Zhang, B. Bai, L. Liu, H. Sun, et al., Experimental study of the mixing of two impinging pressure-swirl sprays in cross flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 49, No. 1, pp. 67-74, 2013.
- [10] B. Bai, H. Zhang, L. Liu, H. J. Sun, Experimental study on turbulent mixing of spray droplets in cross flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, No. 6, pp. 1012-1020, 2009.
- [11] M. Costa, M. J. Melo, M. Sousa, Y. Levy, Spray characteristics of angled liquid injection into subsonic cross flows, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 44, No. 3, pp. 646-653, 2006.
- [12] M. R. O. Panao, A. L. N. Moreira, F. G. Diamantino, Effect of a cross-flow on spray impingement with port fuel injection systems for HCCI engines, *Fuel*, Vol. 106, No. 1, pp. 249-257, 2013.
- [13] S. Suraj, J. G. Deshpande, M. F. Trujillo, Characteristics of hollow cone sprays in cross flow, *Atomization and Sprays*, Vol. 21, No. 4, pp. 349-361, 2011.
- [14] A. Posselt, A. Mai, M. Leder, R. Salvio, et al., Advanced PFI: the economical, high-performance systems approach, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, No. 2015-36-0392, 2015.
- [15] A. A. Amsden, P. J. O'Rourke, T. D. Butler, *KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays*, pp. 7-13, New Mexico, Los Alamos National Laboratory, 1989.
- [16] P. J. O'Rourke, *Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays*, Ph.D. Thesis, Princeton University, Princeton, 1981.
- [17] P. R. Brazier-Smith, S. G. Jennings, J. Latham, The interaction of falling rain drops: coalescence, *Proceeding of Royal Society Serie A*, Vol. 326, No. 1566, pp. 393-408, 1972.
- [18] N. Ashgriz, J. Y. Poo, Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 221, No. 1, pp. 183-204, 1990.
- [19] J. P. Estrade, H. Carentz, G. Lavergne, Y. Biscos, Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol droplets - a model for droplet coalescence and bouncing, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 20, No. 5, pp. 486-491, 1999.
- [20] A. Munnannur, R. D. Reitz, A new predictive model for fragmenting and nonfragmenting binary droplet collisions, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 33, No. 1, pp. 873-896, 2007.

k انرژی جنبشی توربولانس (Jkg^{-1})

N تعداد قطره در یک پارسل

p فشار سیال (Nm^{-2})

$\dot{r}$ نرخ تغییر شعاع قطرات سوخت (ms^{-1})

$\dot{T}_d$ نرخ تغییرات دمای قطره (Cs^{-1})

$\vec{u}$ سرعت هوا (ms^{-1})

$\vec{v}$ سرعت قطره (ms^{-1})

$\dot{\gamma}$ سرعت نوسانات شعاعی در قطره (ms^{-1})

$\dot{\gamma}$ شتاب نوسانات شعاعی در قطره (ms^{-2})

علائم یونانی

α زاویه مخروطی اسپری (deg)

ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی توربولانس ($\text{Jkg}^{-1}\text{s}^{-1}$)

θ زاویه طولی انژکتور (deg)

ρ چگالی هوا (kgm^{-3})

σ تانسور تنش ویسکوز (MPa)

φ زاویه شعاعی بین دو انژکتور (deg)

6- مراجع

- [1] C. D. Yurteri, J. R. Kadambi, E. Arik, Spray characterization and droplet interactions study using particle dynamic analyzer, *Proceedings of 5th International Conference on Laser Anemometry Advances and Applications*, Veldhoven, Netherlands, August 23-27, 1993.
- [2] M. Arai, M. Saito, Atomization characteristics of jet-to-jet and spray-to-spray impingement systems, *Atomization and Sprays*, Vol. 9, No. 4, pp. 399-417, 1999.
- [3] T. Chiba, M. Saito, K. Amagai, M. Arai, Inter-spray impingement of two diesel sprays, *Proceeding of the 8th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Pasadena, USA, July 16-20, 2000.
- [4] G. H. Ko, H. S. Ryou, Droplet collision processes in an inter-spray impingement system, *Aerosol Science*, Vol. 36, No. 11, pp. 1300-1321, 2005.
- [5] Y. Maruyama, T. Chiba, M. Saito, M. Arai, Effect of the inter-impingement process on the behavior of a diesel spray, *International Proceeding of the*