



## بررسی عددی تأثیر چرخش و تغییر نحوه جابجایی سوزن بر رفتار فواره سوخت دیزل

امیرحمزه فرج‌الهی<sup>۱\*</sup>، رضافیروزی<sup>۲</sup>، مهدی پورسیفی<sup>۳</sup>، امیر مردانی<sup>۴</sup>، محسن رستمی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران، [a.farajollahi@sharif.edu](mailto:a.farajollahi@sharif.edu)

<sup>۲</sup> دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ع)، قزوین، ایران، [rezafiruzi@edu.ikiu.ac.ir](mailto:rezafiruzi@edu.ikiu.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران، [mpoursefi@yahoo.com](mailto:mpoursefi@yahoo.com)

<sup>۴</sup> دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [amardani@sharif.edu](mailto:amardani@sharif.edu)

<sup>۵</sup> دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، [cptrostami@gmail.com](mailto:cptrostami@gmail.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۷ آذر ۱۳۹۸

پذیرش: ۷ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

سوراخ افشانه

نحوه جابجایی سوزن

جریان چرخشی

طول نفوذ فواره

زاویه مخروطی فواره

### چکیده

در این مقاله تأثیر ایجاد جریان چرخشی و تغییر نحوه جابجایی سوزن بر روی رفتار فواره سوخت دیزل بررسی شده است. به این منظور، جریان دو حالتی درون افشانه دیزل با دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده است. برای ایجاد هندسه از نرم افزار سالیدورکز و برای شبکه‌بندی و شبیه‌سازی از نرم‌افزار ای وی ال فایر استفاده شده است. ابتدا جریان مایع و مشخصات فواره سوراخ افشانه‌های استوانه‌ای و مخروطی با نحوه جابجایی سوزن یکسان به صورت عددی بررسی شده است. نتایج عددی این مرحله نشان می‌دهند که سوراخ افشانه مخروطی نسبت به سوراخ افشانه استوانه‌ای طول نفوذ فواره بیشتری دارد ولی قطر متوسط ذرات پاشیده شده برای هر دو افشانه تقریباً یکسان است. در مرحله دوم به منظور افزایش زاویه مخروطی فواره و بهبود کیفیت اتمیزه شدن، از خان درون سوراخ افشانه مخروطی استفاده گردیده و نحوه جابجایی سوزن نیز تغییر داده شده است. نتایج عددی حاصل در این مرحله نشان می‌دهند که این افشانه‌های جدید دارای زاویه مخروطی فواره بیشتر و طول نفوذ و قطر متوسط ذرات پاشیده شده کمتری نسبت به افشانه‌های شبیه‌سازی شده در مرحله اول اند. بنابراین مشخصات فواره سوخت از طریق ایجاد جریان چرخشی، تغییر نحوه جابجایی سوزن و هندسه سوراخ افشانه می‌توانند کنترل شوند. نتایج عددی و داده‌های تجربی از تحقیقات پیشین اعتبارسنجی شده است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



## ۱- مقدمه

فرآیند احتراق به منظور تأمین انرژی در بسیاری از صنایع نظامی، نیروگاهی، پالایشگاهی و حمل و نقل کاربرد فراوانی دارد. در این میان، موتورهای اشتعال تراکمی دیزل به علت داشتن نسبت تراکم قویتر و توان تولیدی بیشتر، نقش مهمی در صنایع نظامی و حمل و نقل دارند. از جمله کاربردهای این نوع موتورها می‌توان به انواع نفربرها، تانک‌ها، زیردریایی‌ها و قطارها اشاره کرد. با توجه به آلاینده‌های ناشی از این نوع موتورها و محدود بودن منابع سوخت‌های سنگواره‌ای، تلاش برای کاهش آلاینده‌های ناشی از این نوع موتورها، کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده احتراق قابل اهمیت است.

بهبود مشخصات احتراق در موتورهای احتراق داخلی از طریق تغییر سامانه‌های عرضه سوخت، هندسه موتور، نحوه پاشش و همچنین بکارگیری پاشش‌های چندمرحله‌ای صورت می‌گیرد. در سامانه‌های عرضه سوخت، تغییر هندسه سوراخ افشانه، نحوه جابجایی سوزن و ایجاد جریان چرخشی به منظور بهبود کیفیت اتمیزه شدن سوخت و اختلاط بهتر آن با هوا صورت می‌گیرد، چراکه اختلاط بهتر سوخت و هوا موجب احتراق بهتر آن خواهد شد.

وقوع پدیده حفره‌زائی در سامانه‌های تزریق فشار قوی می‌تواند برای توسعه فواره سوخت مفید باشد چراکه می‌تواند فروپاشی اولیه و اتمیزه شدن سوخت را بهبود بخشد.

اختلاف فشار قوی مابین ابتدا و انتهای اریفیس افشانه علاوه بر مشخصات هندسی سوراخ افشانه که سرعت جریان را در خروجی افشانه افزایش می‌دهد، منجر به داشتن فشار دینامیکی قویتر و فشار استاتیکی ضعیفتر در جریان داخلی افشانه شده و در نهایت باعث رشد حفره‌زائی می‌شود [۱].

شایان ذکر است که ترکیب جناب‌های بخار در درون سوراخ افشانه منجر به فرسایش سطح افشانه شده و در نتیجه باعث کاهش طول عمر آن می‌شود. لذا یک مقدار بهینه برای حفره‌زائی مطلوب است.

یجاد تغییرات در سامانه‌های عرضه سوخت منجر به تغییر مشخصات فواره سوخت می‌شود. مشخصات فواره سوخت نقش مهمی بر عملکرد موتورهای دیزل و آلاینده‌های ناشی از آن‌ها دارد. طول نفوذ، قطر متوسط ذرات پاشیده شده<sup>۱</sup> و زاویه مخروطی مهمترین مشخصات فواره سوخت اند. در مطالعات گذشته مشخصات جریان درونی افشانه، فواره افشانه با هندسه‌های افشانه، نحوه‌های جابجایی مختلف و افشانه‌های پیچشی بررسی شده است.

اکبری مشخصه‌های عملکردی افشانه فشاری - پیچشی دوگانه توربین گاز هوایی ۲۱-۸۵ را بررسی نظری و تجربی کرد. نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز ابتدا حالت پاشش افشانه از چکیدن به اتمیزه

شدن تغییر یافت و با افزایش بیشتر عدد رینولدز، شکل کاملاً توسعه یافته حاکم می‌شود. همچنین با افزایش عدد رینولدز، زاویه پاشش برای هر دو مسیر سیال ابتدا افزایش یافته ولی با افزایش بیشتر آن، ثابت باقی می‌ماند [۲].

دارفتر<sup>۲</sup> و همکاران به بررسی تأثیر لزجت بر روی فواره سوخت در افشانه‌های پیچشی پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش لزجت، اندازه قطر ذرات افزایش می‌یابد [۳].

پایری و همکاران تأثیر نحوه بالابری سوزن افشانه بر رفتار فواره سوخت دیزل را به صورت تجربی بررسی کردند. به این منظور آن‌ها از سه نحوه مربعی، رمپ و بوت استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که طول نفوذ فواره سوخت در حالت مربعی بیشتر از دو حالت دیگر است [۴].

جونز و بایس<sup>۳</sup> تأثیر قطر سوراخ ورودی افشانه بر روی طول نفوذ فواره سوخت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش قطر سوراخ ورودی افشانه، طول نفوذ فواره سوخت افزایش می‌یابد. زیرا قطر ذرات سوخت افزایش یافته و قطرات بزرگتر دارای انرژی جنبشی بیشتری هستند [۵].

مهدی و سالاری تأثیر فاصله سوزن و شکل نشیمنگاه بر پدیده حفره‌زائی درون سوراخ افشانه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ارتفاع سوزن افشانه و شکل نشیمنگاه علاوه بر ضریب تخلیه بر محل تشکیل حفره حفره‌زائی نیز تأثیرگذار است [۶].

زو<sup>۴</sup> و همکاران تأثیر متغیرهای هندسی سوراخ افشانه را بر روی جریان و پدیده حفره‌زائی به صورت عددی بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که نسبت طول به قطر اریفیس و شعاع انحنا سوراخ ورودی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب جریان و پدیده حفره‌زائی درون افشانه دارد [۷].

میشل<sup>۵</sup> و کارلو<sup>۶</sup> به صورت عددی جریان درون افشانه و مشخصات فواره برای سوخت‌های دیزل و زیست‌دیزل در افشانه دیزل را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی جریان درون افشانه نشان داد که پدیده حفره‌زائی برای سوخت دیزل در نواحی نسبتاً بیشتری نسبت به سوخت بیودیزل درون سوراخ افشانه رخ می‌دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی فواره نشان داد که سوخت دیزل طول نفوذ بیشتر و قطر متوسط ذرات پاشیده شده کمتری نسبت به سوخت بیودیزل دارد [۸].

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد مطالعات زیادی بر روی عوامل تأثیرگذار بر جریان درون سوراخ افشانه، ایجاد پدیده حفره‌زائی و مشخصات فواره حاصل انجام شده است ولی تاکنون تأثیر ترکیب ایجاد چرخش درون سوراخ افشانه و تغییر نحوه جابجایی سوزن بر

4 Zuo

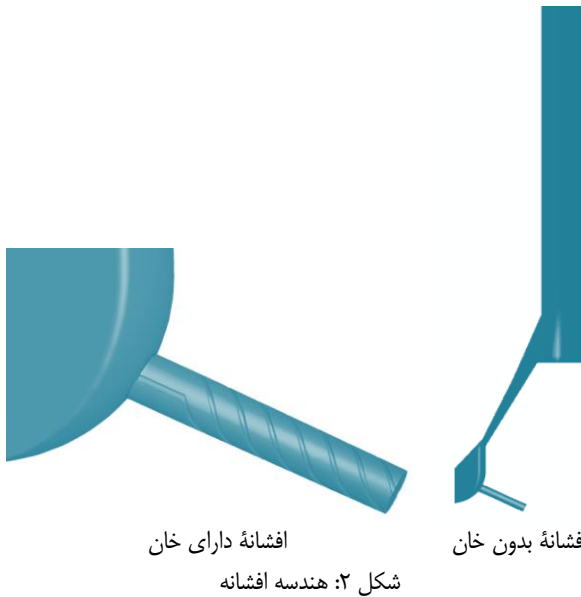
5 Michele

6 Carlo

1 Sauter Mean Diameter

2 Dorfner

3 Bates



برای افزایش دقت و کاهش مدت محاسبات عددی با توجه به شرط مرزی متقارن افشانه، در افشانه‌های بدون خان، شبیه‌سازی تنها یک‌دهم (قطاع با زاویه ۳۶ درجه) و در افشانه‌های دارای خان شبیه‌سازی تنها یک پنجم (قطاع با زاویه ۷۲ درجه) از کل هندسه افشانه صورت گرفته است.

برای ایجاد هندسه از نرم‌افزار سالیدورکز و به منظور ایجاد شبکه و شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی ای وی ال فایر<sup>۱</sup> که بر پایه روش حل عددی حجم محدود است، استفاده شده است.

### ۲-۱- معادلات حاکم بر شبیه‌سازی افشانه

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، لختی، انرژی جنبشی، آشفتگی و تلفات آشفتگی اند. با توجه به فرض همدمابودن، از آوردن و حل معادله انرژی صرف‌نظر شده است. معادله بقای جرم

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k = \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{lk}, \quad k = 1, \dots, N \quad (1)$$

که در آن،  $\alpha_k$  کسر حجمی حالت  $k$ ،  $v_k$  سرعت حالت  $k$  و  $\Gamma_{kl}$  بیانگر تبادل جرمی بین دو حالت  $k$  و  $l$  است. همچنین شرط سازگاری نیز بایستی صدق کند.

$$\sum_{k=1}^N \alpha_k = 1 \quad (2)$$

معادله بقای لختی

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k = \alpha_k \nabla p + \nabla \cdot \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{T}_k^t) \quad (3)$$

شکل‌گیری پدیده حفره‌زائی و تأثیر آن بر مشخصات فواره انجام نشده است.

هدف و نوآوری تحقیق حاضر، بررسی عددی تأثیر ایجاد چرخش درون افشانه و تغییر هندسه و نحوه جابجایی سوزن روی شکل‌گیری پدیده حفره‌زائی و رفتار فواره سوخت دیزل در افشانۀ دیزل CR11 ساخت شرکت بوش است.

### ۲- الگوی محاسباتی

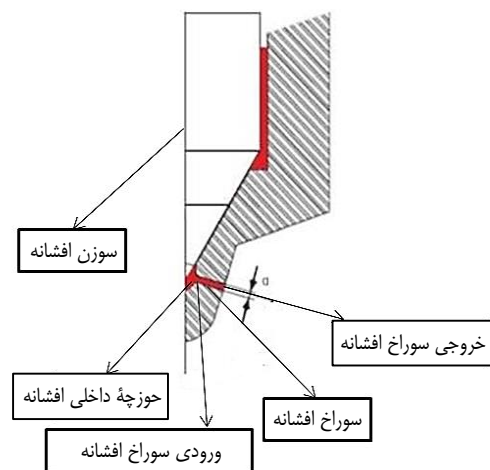
در این مقاله، در دو مرحله تأثیر ایجاد چرخش درون سوراخ افشانه و تغییر نحوه جابجایی سوزن بر ایجاد پدیده حفره‌زائی و رفتار فواره سوخت دیزل بررسی شده است.

شبیه‌سازی اویلر-اویلر برای شبیه‌سازی جریان چندحالتی و حفره‌زائی درون افشانه به کار برده شده است. بر اساس این شبیه‌سازی سوخت مایع و بخار به صورت دو حالت پیوسته در نظر گرفته می‌شود و معادلات حاکم برای هر حالت به صورت جداگانه حل می‌شود.

نتایج حاصل از محاسبات جریان داخل افشانه در مقطع خروجی افشانه ذخیره می‌شوند. در ادامه شبیه‌سازی فواره به کمک داده‌های ذخیره شده در مقطع خروجی افشانه به عنوان داده‌های ورودی آن صورت می‌گیرد.

الگوی استفاده‌شده در این شبیه‌سازی، روش اویلر-لاگرانژ است. در این مطالعه از یک افشانه دیزل CR11 ساخت شرکت بوش از نوع افشانۀ mini-sac، پنج سوراخی که در آن سوراخ‌ها با فاصله یک‌سانی از هم قرار گرفته‌اند، استفاده شده است.

نام‌گذاری قسمت‌های مختلف افشانه در شکل ۱ نشان داده شده است. هندسه افشانه در دو حالت دارای افشانه معمولی و دارای افشانه با خان در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: نامگذاری قسمت‌های مختلف افشانه

اختلاف فشار موثر شامل اثرات نوسانات فشار است و برابر است با:

$$\Delta p = p_{sat} - \left( p - \frac{2}{3} C_E \rho_c k_c \right) \quad (3)$$

در معادله فوق،  $C_E$  ضریب اگلر بوده و وابسته به سطح آشفتهگی محلی است. این ضریب به بررسی تأثیر آشفتهگی بر روی فشار محلی می پردازد.

### ۲-۲-۲- تبادل بین حالتی لختی

تبادل لختی بین دو حالت مایع و بخار با در نظر گرفتن تأثیر نیروهای پسا و پخش آشفتهگی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$M_c = \frac{1}{8} C_D \rho_c A_i'' |v_r| v_r + C_{TD} \rho_c k_c \nabla \alpha_d = -M_d \quad (4)$$

$C_D$  ضریب پسا،  $v_r$  سرعت نسبی بین دو حالت مایع و بخار،  $C_{TD}$  ضریب پخش آشفتهگی و  $K$  انرژی جنبشی آشفتهگی است.  $A_i''$  بیانگر چگالی سطح مشترک بین دو حالت است و برای شبیه سازی حفره زائی پسا به صورت زیر محاسبه می شود:

$$A_i'' = \pi D_b^2 N''' = (36\pi N''')^{\frac{1}{3}} \alpha_d^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

ضریب پسا تابعی از عدد رینولدز حباب بوده و به صورت زیر محاسبه می شود [۱۰]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{192}{Re_b} (1 + 0.1 Re_b^{0.75}) & Re_b \leq 1000 \\ 0.438 & Re_b > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

عدد رینولدز حباب نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re_b = \frac{|v_r| D_b}{\nu_c} \quad (7)$$

### ۲-۳- معادلات حاکم بر شبیه سازی فواره

در شبیه سازی فواره، رویکرد اوپلری- لاگرانژی به کار برده شده است. البته در رابطه با حالت مایع، امروزه عملاً تمامی محاسبات مربوط به فواره در محیط مهندسی بر پایه روش آماری قطره گسسته صورت می گیرد. این روش با حل کردن معادلات دیفرانسیل معمولی برای مسیر، لختی، انتقال جرم و حرارت قطرات واحد که هر کدام از آنها عضو یک گروه قطرات بدون فعل و انفعال داخلی یکسان که یک دسته نامیده می شود، انجام می شود [۱۱]. معادلات حاکم عبارتند از:

$$m_d \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{ig} + F_{ip} + F_{ib} \quad (8)$$

که در آن،  $F_{idr}$  نیروی پسا است و برابر است با:

$$F_{idr} = \frac{1}{2} \rho_g A_d C_d |u_{rel}| u_{rel} \quad (9)$$

$$+ \alpha_k \rho_k \vec{f} + \sum_{l=1, k \neq l}^N \Gamma_{lk} + \nu_k \sum_{l=1, k \neq l}^N \Gamma_{lk}, k = 1, \dots, N$$

که در آن،  $f$  بردار نیروی حجمی شامل نیروی جاذبه و اینرسی است. بردار تنش بر شی،  $T^t$  بردار تنش رینولدزی،  $M$  بیانگر اندرکنش لختی بین حالتها و  $p$  فشار استاتیکی است.

معادله انرژی جنبشی آشفتهگی

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \nu_k K_k = \nabla \cdot \alpha_k \left( \mu_k + \frac{\mu_k^t}{\sigma_k} \right) \nabla K_k \quad (4)$$

$$+ \alpha_k p_k - \alpha_k \rho_k \epsilon_k + \sum_{l=1, k \neq l}^N K_{lk} + K_k \sum_{l=1, k \neq l}^N \Gamma_{lk}$$

معادله تلفات آشفتهگی

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k \epsilon_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \nu_k \epsilon_k &= \nabla \cdot \alpha_k \left( \mu_k + \frac{\mu_k^t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_k \\ + \alpha_k C_1 p_k \frac{\epsilon_k}{K_k} - \alpha_k \rho_k C_2 \frac{\epsilon_k^2}{K_k} + \alpha_k C_4 \rho_k \epsilon_k \nabla \cdot \nu_k &+ \sum_{l=1, k \neq l}^N D_{lk} + \epsilon_k \sum_{l=1, k \neq l}^N \Gamma_{lk} \end{aligned} \quad (5)$$

### ۲-۲- معادلات حاکم بر شبیه سازی اندرکنش بین حالتی

معادلات حاکم بر شبیه سازی اندرکنش بین حالتی شامل معادلات تبادل جرم و تبادل لختی بین دو حالت اند.

#### ۲-۲-۱- تبادل بین حالتی جرم

تبادل جرم بین دو حالت مایع و بخار با شبیه سازی حفره زائی خطی شبیه سازی شده است. معادله حاکم به صورت زیر است:

$$\Gamma_c = \rho_d N''' 4\pi R^2 \dot{R} = -\Gamma_d \quad (1)$$

که در آن،  $N'''$  چگالی عددی حباب و  $R$  شعاع حباب است. مشتق زمانی شعاع حباب با کمک معادله رایلی بدین شکل محاسبه می شود:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{\Delta p}{\rho_c} \quad (2)$$

که در آن  $\Delta p$  اختلاف فشار موثر و  $\rho_c$  چگالی حالت پیوسته (مایع) است.

چگالی عددی حباب،  $N'''$ ، با توجه به رمپ خطی نزولی فرض شده به صورت زیر محاسبه می شود:

$$N''' = \begin{cases} N_0'' & \alpha_d \leq 0.5 \\ 2(N_0'' - 1)(1 - \alpha_d) + 1 & \alpha_d > 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

$N_0''$  چگالی عددی اولیه حباب است که به مشخصات حالت مایع وابسته است و برای سوخت دیزل که اکثراً مورد استفاده قرار می گیرد برابر  $10^{12}$  است [۹].

در معادلات فوق  $K$  انرژی جنبشی اغتشاش،  $\varepsilon$  نرخ تلفات اغتشاش و  $C$  ثابت شبیه سازی است و تأثیر حفره زائی توسط ترم  $S_k$  اعمال شده است. زیرالگوی استفاده شده برای فروپاشی ثانویه، شبیه سازی موج است. در این شبیه سازی نرخ کاهش شعاع قطره نسبت به زمان به صورت زیر ارائه می شود:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{(r - r_{stable})}{\tau_a} \quad (20)$$

که در آن،  $\tau_a$  زمان فروپاشی شبیه سازی است و برابر است با:

$$\tau_a = \frac{3.726 \cdot C_2 \cdot r}{\Lambda \cdot \Omega} \quad (21)$$

ثابت  $C_2$  زمان فروپاشی شبیه سازی را تصحیح می کند.  $r_{stable}$  شعاع نهایی قطره و متناظر با طول موج  $\Lambda$  مربوط به موج با سریع ترین رشد روی سطح قطره است.

$$r_{stable} = C_1 \cdot \Lambda \quad (22)$$

طول موج  $\Lambda$  و نرخ رشد موج  $\Omega$  وابسته به مشخصات محلی سیال بوده و به صورت زیر بیان می شوند:

$$\Lambda = 9.02 \cdot r \frac{(1 + 0.45 \cdot oh^{0.5})(1 + 0.4 \cdot T^{0.7})}{(1 + 0.87 \cdot We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (23)$$

$$\Omega = \left(\frac{\rho_d r^3}{\sigma}\right)^{-0.5} \frac{0.34 + 0.38 \cdot We_g^{1.5}}{(1 + Oh)(1 + 1.4 \cdot T^{0.6})} \quad (24)$$

در معادلات فوق،  $We$  عدد وبر و  $Oh$  عدد اونسورگ است و داریم:

$$T = Oh \cdot We^{0.5} \quad (25)$$

### ۳- محاسبات عددی

#### ۳-۱- افشانه

افشانه مورد استفاده در مطالعه حاضر، افشانه دیزل CRI1 تولید شده توسط شرکت بوش متعلق به گروه افشانه های Mini-sac، پنج سوراخی که در آن سوراخ ها با فاصله یکسانی از هم قرار گرفته اند، است. به منظور افزایش دقت و کاهش مدت زمان محاسبات عددی با توجه به شرط مرزی متقارن افشانه، در سوراخ افشانه های استوانه ای و مخروطی شبیه سازی تنها یک دهم و در افشانه دارای خان شبیه سازی تنها یک پنجم از کل هندسه افشانه صورت گرفته است.

به منظور بررسی تأثیر ایجاد چرخش درون سوراخ افشانه و نحوه جابجایی سوزن بر ایجاد پدیده حفره زائی و مشخصات فواره از سوراخ افشانه استوانه ای و مخروطی دارای خان و دو نحوه متفاوت استفاده شده است. در سوراخ افشانه مخروطی یک افشانه، ضریب  $k$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$k - factor = \frac{D_{in} [\mu m] - D_{out} [\mu m]}{10 [\mu m]} \quad (32)$$

که در آن،  $D_{in}$  قطر ورودی و  $D_{out}$  قطر خروجی سطح مقطع دایروی سوراخ افشانه است. معمولاً در کاربردهای مربوط به صنعت خودرو، این ضریب بین اعداد ۱،۱ تا ۲ است [۱۳]. مشخصات هندسی سوراخ

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d C_p} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}) & Re_d < 1000 \\ \frac{0.44}{C_p} & Re_d \geq 1000 \end{cases} \quad (10)$$

عدد رینولدز ذره به صورت زیر محاسبه می شود که در آن  $\mu_g$  لزجت سیال است.

$$Re_d = \frac{\rho_g |u_{rel}| D_d}{\mu_g} \quad (11)$$

در معادله (۱۴)، تمامی نیروهای سطحی و بدنی روی قطره فواره لحاظ شده اند. از آنجایی که بزرگی نیروهای فشاری و سایر نیروها در مقایسه با نیروهای پسا و گرانشی قابل اغماض است، فقط نیروی پسا روی قطره فواره (شامل مؤلفه های فشار و ویسکوز) برای فروپاشی اولیه و ثانویه فواره سوخت مایع لحاظ شده است [۱۲]. شتاب قطره در محیط گازی نیز به صورت زیر است:

$$\frac{du_{id}}{dt} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{1}{D_d} |u_g - u_d| (u_{ig} - u_{id}) + \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_d}\right) g_i \quad (12)$$

زیرالگوهای استفاده شده شامل شبیه سازی دو کوویچ در تبخیر، شبیه سازی ارورکه در برهم کنش میان ذرات، شبیه سازی تزریق گلوله در فروپاشی اولیه است. در این شبیه سازی مشخصه شعاع قطره  $r_A$  و مشخصه زمان فروپاشی  $\tau_a$  است.  $R$  بیانگر شعاع واقعی قطره و نرخ فروپاشی آیرودینامیکی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_a = R_a = -\frac{(r - r_a)}{C_2 \cdot \tau_a} \quad (13)$$

$$r_a = C_1 \cdot \Lambda \quad (14)$$

ضرایب ثابت شبیه سازی،  $C_1$  و  $C_2$  به منظور تنظیم زمان فروپاشی و مشخصه شعاع قطره مورد استفاده قرار می گیرند. نرخ فروپاشی اغتشاش از مقیاس های طول اغتشاش  $r_T$  و زمان اغتشاش  $\tau_T$  محاسبه می شود.

$$r_T = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{\varepsilon} \quad (15)$$

$$\tau_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (16)$$

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{r - C_3 r_T}{C_4 \tau_T} \quad (17)$$

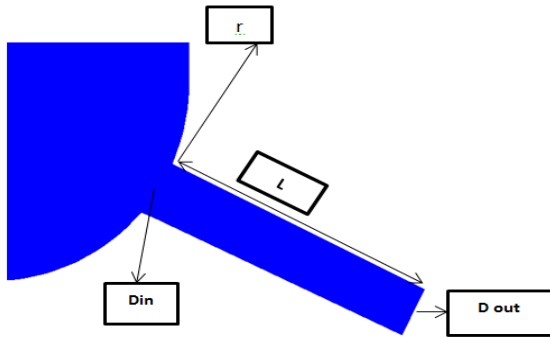
در معادله (۲۲)،  $C_3$  و  $C_4$  ثابت های مسئله اند.

با صرف نظر کردن از تأثیر پخش شدگی، معادله اغتشاش برای سوخت مایع می تواند به صورت زیر نوشته شود:

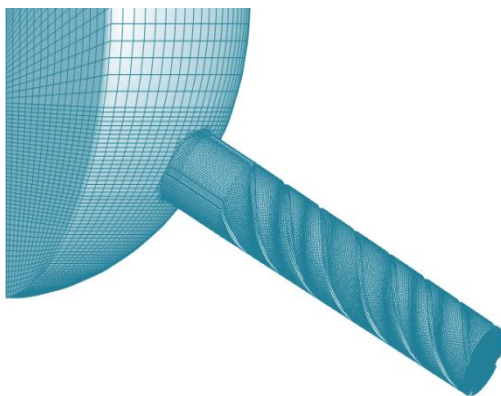
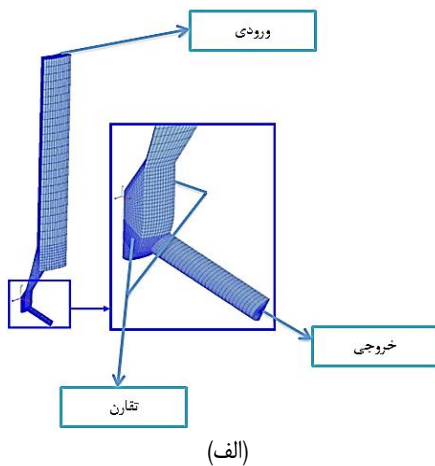
$$\frac{dk}{dt} = -\varepsilon + S_k \quad (18)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -C \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot (\varepsilon - S_k) \quad (19)$$

نمودار جابجایی سوزن بر حسب زاویه میل لنگ در نحوه‌های مختلف مورد نظر در شکل ۶ نشان داده شده است که در آن نحوه یک حالت پایه است. نحوه‌های ۲ و ۳ به منظور بررسی تأثیر تغییر شیب نمودار جابجایی سوزن در زمان باز و بسته‌شدن آن و همچنین تأثیر مدت‌زمان بازبودن سوزن افشانه بر روی رفتار جریان سوخت مایع درون افشانه، مقدار شار جرمی خروجی از افشانه، شدت وقوع پدیده حفره‌زایی و رفتار هیدرودینامیکی فواره سوخت دیزل انتخاب شده‌اند. همچنین سرعت دورانی موتور برابر ۳۷۵۰ دور بر دقیقه است.



شکل ۳: هندسه و ابعاد افشانه‌های مورد استفاده



(ب)

شکل ۴: شبکه‌بندی افشانه، (الف) افشانه بدون خان، (ب) افشانه دارای خان

افشانه‌های استوانه‌ای و مخروطی همگرا در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی سوراخ افشانه‌های افشانه

هندسه افشانه	استوانه	مخروط همگرا
ضریب k (-)	۰	۱,۳
قطر ورودی (mm)	۰,۱۳	۰,۱۴۳
قطر خروجی (mm)	۰,۱۳	۰,۱۳
طول افشانه (mm)	۰,۷	۰,۷
شعاع منحنی ورودی افشانه (mμ)	۲	۱۰

در شکل ۳ متغیرهای هندسی مربوط به سوراخ افشانه نشان داده شده است که در این شکل، D قطر در ورودی و خروجی سوراخ افشانه، L طول افشانه و r شعاع منحنی در ورودی سوراخ افشانه است.

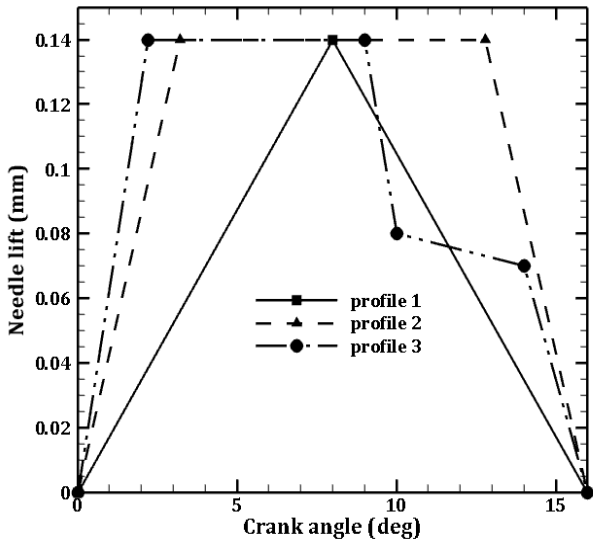
به منظور ایجاد مخلوط همگن سوخت و اکسیدکننده، افزایش شدت توربولانسی و بهبود کیفیت اتمیزه شدن سوخت، ۴ خان راستگرد دارای ارتفاع ۰,۰۴ میلی‌متر و گام ۰,۱ میلی‌متر درون سوراخ افشانه مخروطی همگرا ایجاد شده است.

شبکه‌بندی افشانه به صورت شکل ۴ است که با کمک نرم‌افزار ای وی ال فایر انجام شده است. با توجه به این شکل، به دلیل تغییرات زیاد جریان در ورودی سوراخ، در این ناحیه از شبکه بندی ریزتری استفاده شده است. برای بررسی استقلال حل از شبکه، به مطالعه تأثیر اندازه شبکه بر شار جرمی جریان سوخت خروجی از سوراخ افشانه دارای نحوه جابجایی سوزن حالت پایه و هندسه‌های افشانه مختلف پرداخته شده است.

با توجه به شکل ۵ در سوراخ افشانه‌های استوانه‌ای و مخروطی در تعداد سلول ۱۵۴۰۰۰ و در سوراخ افشانه دارای خان در تعداد سلول ۷۱۶۱۴۸ شار جرمی جریان سوخت خروجی افشانه به مقدار یکنواختی می‌رسد. لذا از این تعداد سلول محاسباتی برای حل جریان داخل افشانه استفاده شده است. در سوراخ افشانه‌های استوانه‌ای و مخروطی، تعداد سلول‌ها در افشانه و نزدیکی ورودی سوراخ برابر ۹۲۴۰۰ با اندازه متوسط دانه‌بندی ۱,۵ μm و تعداد سلول مورد استفاده در قسمت‌های باقی‌مانده نیز ۶۱۶۰۰ با اندازه متوسط دانه‌بندی ۵ μm است.

در سوراخ افشانه مخروطی دارای خان، تعداد سلول‌ها در افشانه و نزدیکی ورودی سوراخ برابر ۴۳۰۰۰۰ با اندازه متوسط دانه‌بندی ۱ μm و تعداد سلول مورد استفاده در قسمت‌های باقی‌مانده نیز ۲۸۶۱۴۸ با اندازه متوسط دانه‌بندی ۵ μm است. به منظور جلوگیری از صفر شدن ضخامت سلول‌ها حداقل مقدار جابجایی سوزن در شبکه‌بندی افشانه برابر با ۲۰ μm در نظر گرفته شده است.

سوخت مورد استفاده در این شبیه سازی دیزل رایج در کشورهای اروپایی است که خواص آن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۲ نشان داده شده است [۸ و ۱۴].



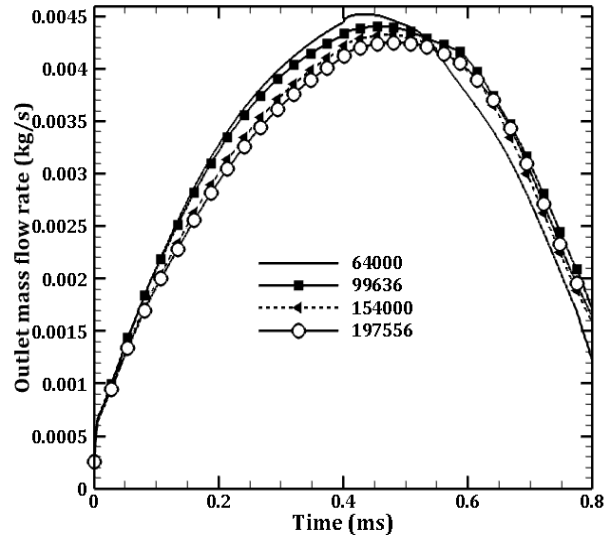
شکل ۶: نحوه جابجایی سوزن بر حسب زاویه میل لنگ در حالت پایه [۱۵] و متغیر

شبیه سازی آشفته‌گی مورد استفاده k-ε است. شرایط مرزی و اولیه برای شبیه سازی افشانه در حالت پایه در جدول ۳ نشان داده شده است. در حال حاضر عموماً از فناوری تغذیه مشترک<sup>۱</sup> در افشانه‌های دیزل استفاده می‌شود که در آن فشار تزریق در طول فرایند پاشش سوخت تقریباً ثابت است [۱۶]. بنابراین شرط مرزی در ورودی و خروجی افشانه از نوع فشار ثابت در نظر گرفته شده است.

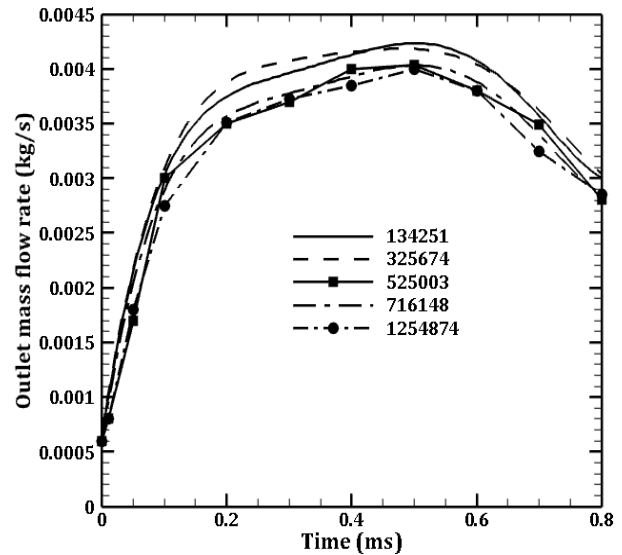
جدول ۳: شرایط اولیه و مرزی جریان سیال درون افشانه

شرایط	فشار	دما
شرایط اولیه	۱۳۵۰ بار	۳۱۳ کلوین
شرایط مرزی	فشار ورودی: ۱۳۵۰ بار فشار خروجی: ۱۰ بار	-

شرایط مرزی در طرفین قطاع نیز از نوع تقارن است. گسسته سازی برای لختی، آشفته‌گی و کسر حجمی از نوع بالادست مرتبه دوم و برای پیوستگی از نوع تفاضل مرکزی اند. ضرایب مادون رهایی برای لختی، فشار، انرژی جنبشی آشفته‌گی، نرخ تلفات آشفته‌گی و کسر حجمی به ترتیب برابر ۰,۳، ۰,۱، ۰,۱۵، ۰,۱۵، ۰,۳ و ۰,۳ اند. بیشترین و کمترین تعداد تکرار برای معیار همگرایی به ترتیب ۱۶۰ و ۱۰ فرض شده است. تبادل جرم مابین دو حالت توسط شبیه‌سازی حفره‌زائی خطی شبیه سازی شده است. در این شبیه سازی ضریب آگلر، عدد چگالی، ضریب کاهش چگالش و فشار اشباع به ترتیب برابر با ۱,۲، ۱,۰<sup>۱۲</sup>، ۱ و ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.



(الف)



(ب)

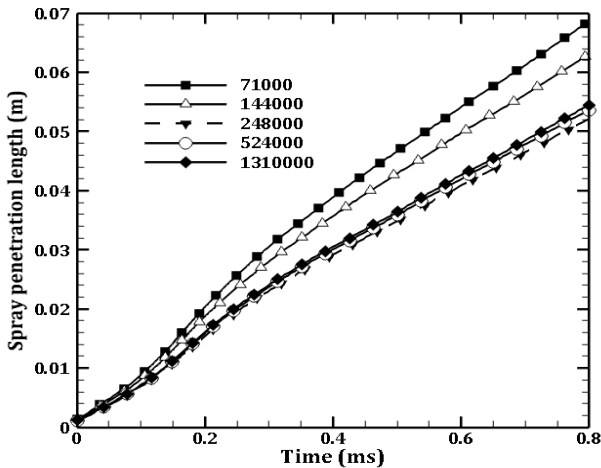
شکل ۵: شار جرمی خروجی برای مقادیر متفاوت سلول در افشانه با نحوه جابجایی سوزن حالت پایه، (الف) افشانه بدون خان، (ب) افشانه دارای خان

جدول ۲: خواص سوخت دیزل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

حالت سوخت	مایع	بخار
چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۸۲۵	۵
لزجت (Pa.s)	۰,۰۰۲۱	۰,۰۰۰۰۱
فشار بخار (Pa)	۱۰۰۰	-

افت فشار درون سوراخ سوراخ افشانه منجر به ایجاد پدیده حفره‌زائی می‌شود. به همین دلیل جریان دو حالتی (دیزل مایع و دیزل بخار) در نظر گرفته شده است.

<sup>۱</sup> Common rail



شکل ۸: طول نفوذ فواره برای مقادیر متفاوت سلول

#### ۴- اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی

به منظور بررسی دقت نتایج عددی حاصل، به مقایسه داده‌های عددی مشخصه طول نفوذ و قطر متوسط ذرات پاشیده شده حاصل از شبیه‌سازی سوراخ افشانه‌های استوانه‌ای و مخروطی همگرا با نحوه جابجایی سوزن در حالت پایه با نتایج تجربی [۱۵] و عددی موجود [۸] پرداخته شده است.

با توجه به شکل ۹ تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. علت تفاوت اندک مقادیر عددی حاصل از شبیه‌سازی مربوط به طول نفوذ در سوراخ افشانه‌های استوانه‌ای و مخروطی همگرا با مقادیر تجربی موجود، تفاوت چگالی گاز محفظه احتراق استوانه‌ای در حالت واقعی با عددی و در نظر گرفتن حداقل مقدار جابجایی سوزن برابر با  $20 \mu m$  است.

چگالی هوای متراکم با فشار ۱۰ بار و دمای ۳۰۰ کلوین، تقریباً برابر با  $11.6 \frac{kg}{m^3}$  است در صورتی که چگالی هوای فشرده مورد استفاده در این شبیه‌سازی  $19.19 \frac{kg}{m^3}$  در نظر گرفته شده است. چگالی کم گاز محفظه احتراق باعث می‌شود که در لحظات اولیه پاشش نیروی مقاوم کمتری از سمت گاز به فواره حاصل وارد شده و منجر به افزایش طول نفوذ آن گردد.

با گذشت زمان پاشش و افزایش مقدار سوخت پاشش شده به درون محفظه مورد نظر، طول نفوذ فواره افزایش یافته و به مقادیر تجربی مورد نظر نزدیک می‌شوند. همچنین با در نظر گرفتن حداقل جابجایی سوزن برابر با  $20 \mu m$  به منظور جلوگیری از صفر شدن ضخامت سلول‌ها، مقدار شار جرمی خروجی افشانه و در نتیجه مقدار جرم پاشش شده به درون محفظه احتراق در طول مدت زمان پاشش با حالت واقعی اندکی تفاوت دارد و به همین دلیل طول نفوذ فواره حاصل با مقادیر تجربی اندکی متفاوت خواهد بود.

تبادل لختی مابین دو حالت با شبیه‌سازی نیروی پسای حفره‌زائی، انجام شده است. در این شبیه‌سازی ضریب پراکندگی و ساتو به ترتیب برابر ۰٫۱ و ۰٫۰۶ در نظر گرفته شده است. برای محاسبه مقادیر مرزی از روش برون‌یابی و برای محاسبه جمله‌های مشتق موجود در معادلات از روش حداقل مربعات استفاده شده است. همچنین برای کوپل فشار-لختی از روش ساده<sup>۱</sup> استفاده شده است.

#### ۲-۳- فواره

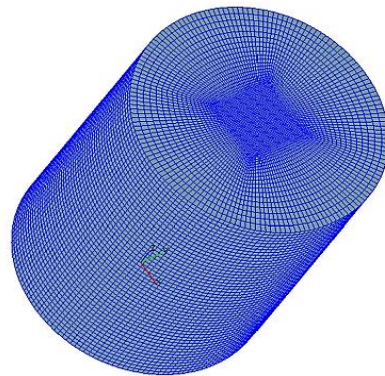
برای شبیه‌سازی و مشاهده نتایج فواره حاصل از هندسه‌های مختلف سوراخ افشانه و نحوه‌های متفاوت جابجایی سوزن از یک محفظه احتراق استوانه‌ای حجم ثابت با قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر که در شکل ۷ آورده شده، استفاده شده است [۱۲].

شبیه‌سازی فواره حاصل با توجه به نتایج بررسی استقلال حل از شبکه، در تعداد سلول ۲۴۸۰۰۰ صورت گرفته است. نتایج مربوط به این بررسی در شکل ۸ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۷، در محل پاشش سوخت به منظور افزایش دقت محاسبات عددی از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است. نتایج مربوط به بررسی استقلال حل از شبکه برای فواره در شکل ۸ نشان داده شده است. سیال مورد استفاده هوای متراکم دارای فشار ۱۰ بار و دمای ۳۰۰ کلوین است. مدت زمان کل تزریق سوخت ۰٫۸ میلی‌ثانیه است. گام زمانی مورد استفاده در حل از  $1 \times 10^{-8}$  ثانیه تا  $5 \times 10^{-7}$  ثانیه، با گام‌های کوچکتر در شروع حل است.

الگوی آشفته‌گی مورد استفاده k-ε است. گسسته‌سازی برای لختی و پیوستگی از نوع تفاضل مرکزی و برای آشفته‌گی، انرژی و کسر حجمی از نوع بالادست‌اند. ضرایب مادون‌رهایی برای لختی، فشار، انرژی جنبشی آشفته‌گی، نرخ تلفات آشفته‌گی، انرژی و معادلات انتقال گونه‌ها به ترتیب برابر ۰٫۶، ۰٫۲، ۰٫۴، ۰٫۴، ۰٫۴، ۰٫۸ و ۰٫۸ اند.

بیشترین و کمترین تعداد تکرار برای معیار همگرایی به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰ فرض شده است. همچنین برای کوپل فشار-لختی از روش ساده استفاده شده است.



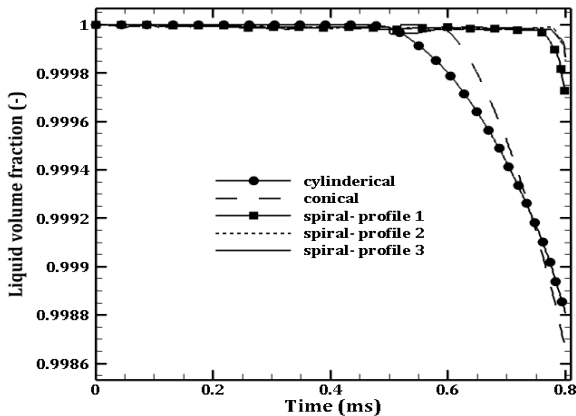
شکل ۷: شبکه‌بندی محفظه احتراق استوانه‌ای

<sup>۱</sup> Simple

هندسه سوراخ افشانه، نحوه جابجایی سوزن، نوع سوخت و دمای آن در شدت وقوع این پدیده تأثیرگذار اند.

بدین منظور هندسه سوراخ افشانه استوانه را به مخروطی همگرا تغییر داده و از دو نحوه جابجایی متفاوت استفاده گردیده است. همچنین به منظور ایجاد جریان چرخشی فواره سوخت، از خان درون افشانه استفاده شده است.

به منظور بررسی شدت وقوع پدیده حفره زائی درون سوراخ افشانه به بررسی کسر حجمی حالت مایع برای افشانه با هندسه‌ها و نحوه‌های جابجایی متفاوت در مدت زمان تزریق سوخت پرداخته شده است. نمودار کسر حجمی حالت مایع بر حسب مدت زمان تزریق در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این شکل پدیده حفره زائی درون سوراخ افشانه استوانه‌ای نسبت به سوراخ افشانه مخروطی همگرا با شدت نسبتاً بیشتری رخ داده است که دلیل آن کمربودن قطر و شعاع منحنی در ورودی سوراخ افشانه استوانه‌ای نسبت به مخروطی همگرا است.



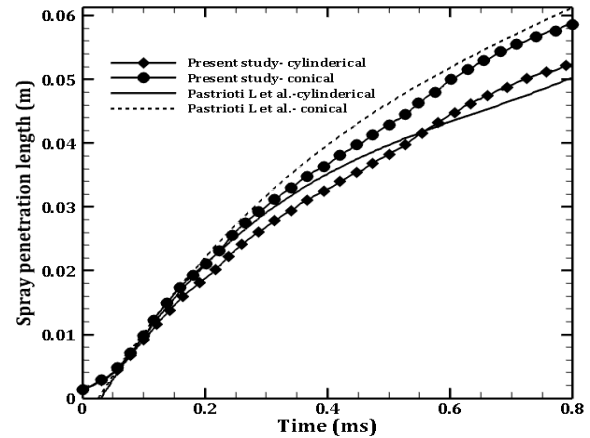
شکل ۱۰: کسر حجمی حالت مایع برای افشانه در حالات مختلف سوراخ افشانه

کمربودن قطر و شعاع منحنی ورودی افشانه منجر به افزایش افت فشار سیال درون سوراخ افشانه می‌شود و لذا حفره زائی درون آن با شدت بیشتری رخ می‌دهد. با ایجاد خان درون سوراخ افشانه مخروطی همگرا، پدیده حفره زائی با شدت کمتری نسبت به سایر هندسه‌ها رخ می‌دهد. دلیل این امر افزایش تلفات جریان سوخت مایع و افزایش فشار به مقدار کم درون افشانه دارای خان است که در نتیجه، این افزایش فشار باعث می‌شود تا حفره زائی با شدت کمتری نسبت به سایر حالات رخ دهد.

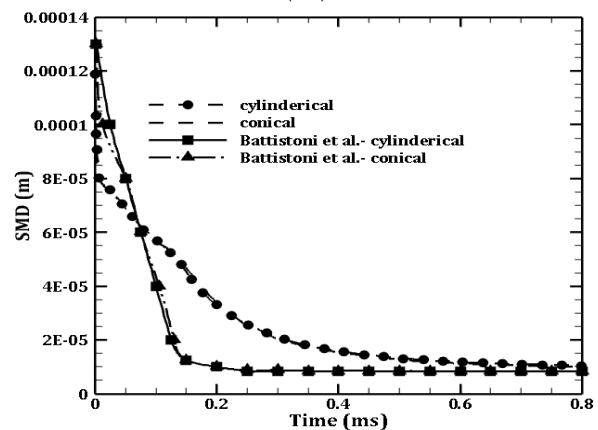
در تغییر نحوه جابجایی سوزن، شیب نمودار جابجایی سوزن در زمان باز و بسته شدن آن و همچنین مدت زمان بازبودن سوزن افشانه بر رفتار جریان سوخت مایع درون افشانه تأثیرگذار هستند.

با افزایش شیب نمودار نحوه جابجایی سوزن در هنگام باز و بسته شدن آن و همچنین افزایش مدت زمان بازبودن سوزن افشانه نسبت به نحوه جابجایی اولیه، پدیده حفره زائی به دلیل افزایش تلفات جریان سوخت

با توجه به گرا دیان فشار قوی در شبیه سازی جریان دو حالتی، به دلیل ثابت در نظر گرفتن دمای سوخت مایع درون افشانه در سرتا سر مدت زمان پاشش، مقدار جرم سوخت تبخیر شده در حالت دمای ثابت با حالت دمای غیر ثابت سوخت متفاوت بوده و در نتیجه قطر متوسط ذرات پاشیده شده برای این دو حالت با هم متفاوت هستند.



(الف)



(ب)

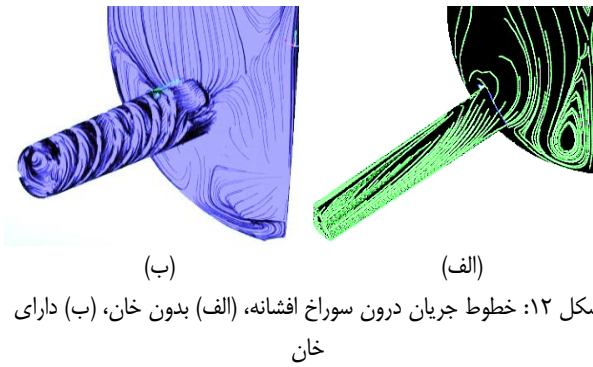
شکل ۹: اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج تجربی و عددی، (الف) نتایج تجربی طول نفوذ فواره، (ب) نتایج عددی قطر متوسط ذرات

در ضمن به دلیل کمربودن چگالی هوای درون محفظه احتراق نسبت به مقدار واقعی، مقدار نیروی مقاوم وارده بر فواره حاصل کاهش یافته و فرایند فروپاشی آن با شدت کمتری صورت می‌گیرد و پس از گذشت مدت زمان ابتدایی پاشش، قطر ذرات نسبت به مقادیر استخراج شده موجود افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، مقادیر عددی حاصل به مقادیر موجود نزدیک می‌شوند.

## ۴- بحث بر روی نتایج

### ۴-۱- افشانه

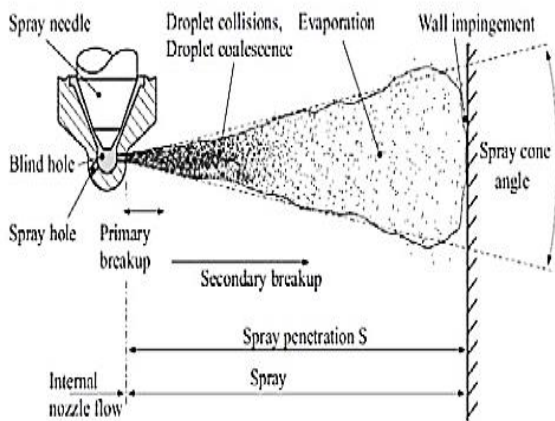
پدیده حفره زائی درون سوراخ افشانه یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در رفتار هیدرودینامیکی فواره سوخت و امتیزه شدن آن است.



شکل ۱۲: خطوط جریان درون سوراخ افشانه، (الف) بدون خان، (ب) دارای خان

## ۲-۴- فواره

به منظور بررسی تأثیر تغییر همزمان هندسه سوراخ افشانه، نحوه جابجایی سوزن و ایجاد جریان چرخشی بر روی رفتار هیدرودینامیکی فواره دیزل، به بررسی مشخصات آن پرداخته شده است. مهمترین مشخصات فواره سوخت عبارتند از: طول نفوذ، زاویه مخروطی و قطر متوسط ذرات پاشیده شده. شمای فروپاشی فواره و نامگذاری مشخصات آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: طرح‌های از فروپاشی فواره و مشخصات آن [۱۷]

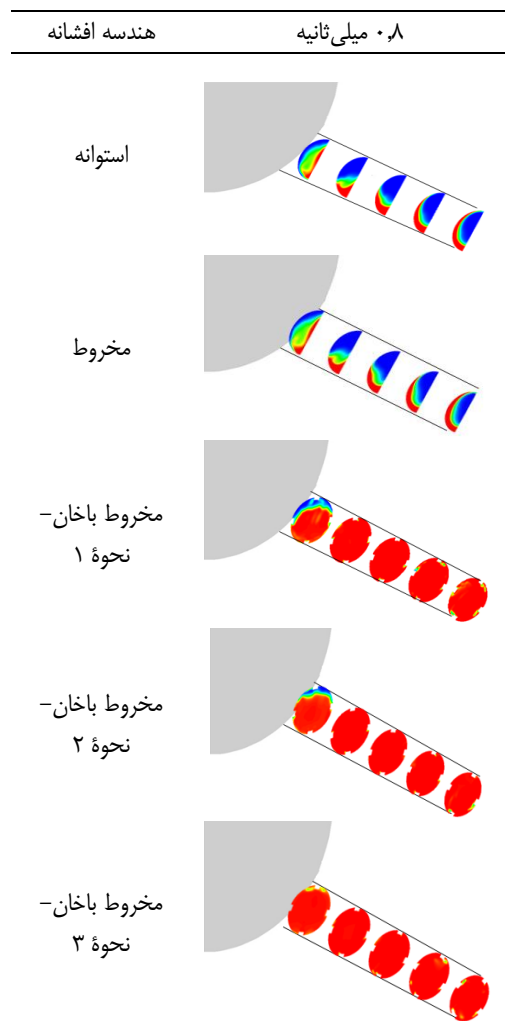
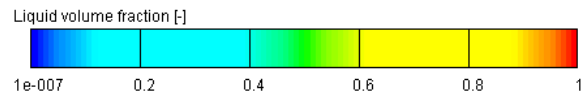
نمودارهای طول نفوذ فواره و قطر متوسط ذرات پاشیده شده در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همچنین نتایج شار جرمی و سرعت در خروجی افشانه در هر قسمت در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

نتایج حاصل نشان می‌دهند که سوراخ افشانه مخروطی همگرا نسبت به استوانه‌ای طول نفوذ فواره بیشتری دارد که دلیل آن افزایش سرعت در خروجی سوراخ افشانه مخروطی همگرا به علت کاهش تلفات اصطکاکی درون آن است ولی قطر متوسط ذرات پاشیده شده برای هر دو افشانه تقریباً یکسان است.

در سوراخ افشانه استوانه‌ای، وقوع پدیده حفره‌زایی و در سوراخ افشانه مخروطی همگرا، افزایش سرعت در خروجی افشانه منجر به بهبود فروپاشی فواره سوخت گردیده و در نتیجه قطر ذرات کاهش می‌یابد.

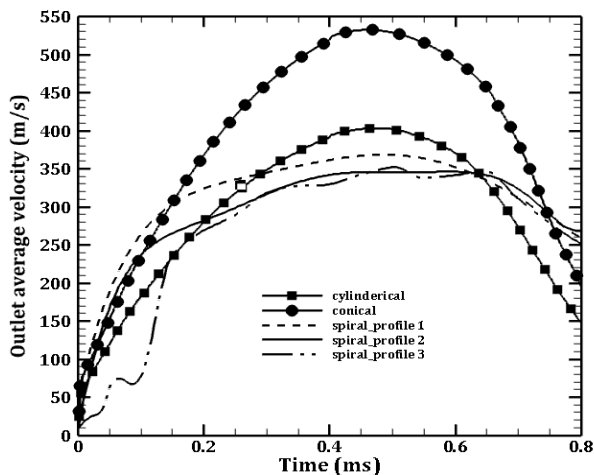
مایع و افزایش فشار به مقدار نسبتاً بیشتری، با شدت کمتری درون افشانه دارای خان و نحوه‌های جابجایی جدید رخ می‌دهد.

نتایج توزیع کسر حجمی حالت مایع درون سوراخ افشانه در پنج سطح مقطع متوالی در مدت زمان انتهای پاشش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در حالت ایجاد خان درون افشانه نسبت به سایر حالات، توزیع کسر حجمی حالت مایع در نقاط وسیعتری نسبت به سایر هندسه‌ها صورت گرفته است.



شکل ۱۱: توزیع کسر حجمی حالت مایع درون افشانه در هر حالت در مدت زمان انتهای پاشش

همچنین خطوط جریان درون سوراخ افشانه دارای خان و سوراخ افشانه مخروطی همگرای بدون خان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ایجاد خان درون افشانه منجر به حرکت چرخشی سوخت درون افشانه شده که تا خروجی آن ادامه دارد.



شکل ۱۶: سرعت متوسط در خروجی برای افشانه با هندسه و نحوه‌های جابجایی مختلف

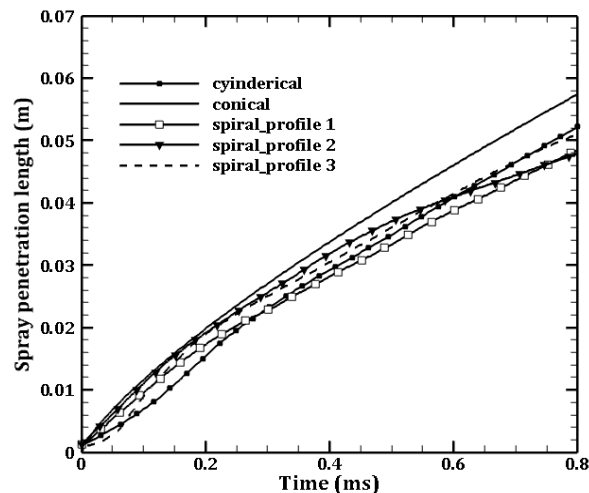
با افزایش سرعت در خروجی افشانه، سرعت نسبی بین ذرات فواره و هوای فشرده درون محفظه احتراق افزایش می‌یابد و در نتیجه نیروی پسای هوا که منجر به فروپاشی فواره سوخت می‌شود، افزایش یافته و منجر به کاهش قطر متوسط ذرات پاشیده شده می‌شود.

با کاهش تلفات اصطکاکی درون سوراخ افشانه مخروطی همگرا، سرعت در خروجی آن افزایش یافته و در نتیجه شار جرمی خروجی نیز نسبت به حالت استوانه‌ای افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت که با ایجاد خان و تغییر نحوه جابجایی سوزن، زاویه مخروطی فواره افزایش و طول نفوذ و قطر متوسط ذرات پاشیده شده آن نسبت به حالت بدون خان کاهش می‌یابد.

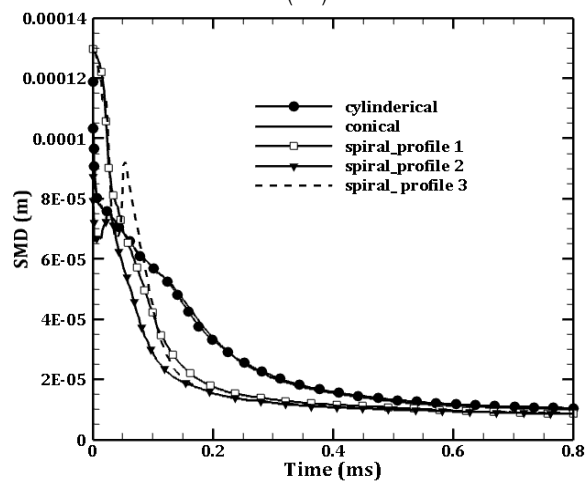
با ایجاد خان و تغییر نحوه جابجایی سوزن، تلفات اصطکاکی درون افشانه افزایش یافته و لذا سرعت در خروجی آن کاهش می‌یابد که در نهایت منجر به کاهش طول نفوذ فواره سوخت و شار جرمی خروجی آن می‌شود. طبق نمودار کسر حجمی حالت مایع بر حسب مدت‌زمان پاشش (شکل ۱۰)، در افشانه‌های دارای خان، مقدار کسر حجمی حالت مایع نسبت به افشانه‌های بدون خان در مدت‌زمان انتهایی پاشش بیشتر بوده و پدیده حفره‌زایی با شدت کمتری در آن‌ها رخ داده است.

به همین علت مقدار شار جرمی خروجی در افشانه‌های دارای خان (چرخشی) در مدت‌زمان انتهایی پاشش ( $t = 0.8 \text{ ms}$ ) همانند افشانه‌های بدون خان (غیرچرخشی) نزدیک صفر نبوده و بیشتر از آن‌ها است. همچنین چرخشی بودن جریان در افشانه‌های دارای خان منجر به افزایش شار جرمی خروجی افشانه نسبت به افشانه‌های بدون خان در مدت‌زمان انتهایی پاشش می‌شود.

ساختار فواره محاسبه شده در هر قسمت در مدت‌زمان انتهایی پاشش در شکل ۱۷ ارائه شده است. با توجه به این شکل، ایجاد جریان چرخشی منجر به افزایش زاویه مخروطی فواره می‌شود. همچنین در

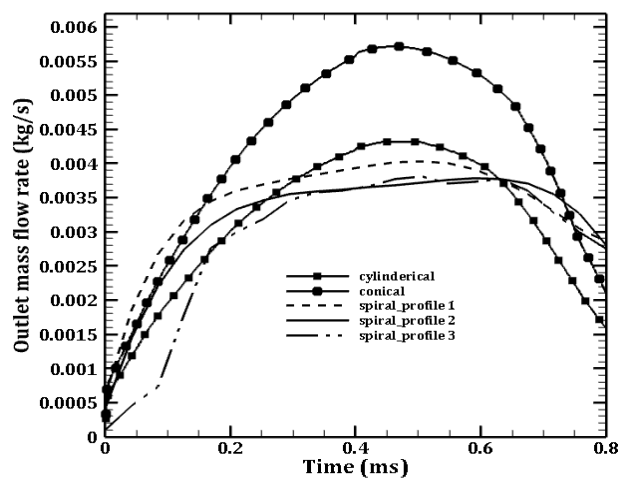


(الف)



(ب)

شکل ۱۴: طول نفوذ فواره (الف) و قطر متوسط ذرات پاشیده شده (ب) برای هندسه‌ها و نحوه‌های مختلف سوراخ افشانه و سوزن



شکل ۱۵: نرخ جریان جرمی خروجی برای افشانه با هندسه و نحوه‌های جابجایی مختلف

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر تغییر نحوه جابجایی سوزن و ایجاد جریان چرخشی درون سوراخ سوراخ افشانه بر روی جریان سوخت مایع درون آن و رفتار هیدرودینامیکی فواره سوخت دیزل بررسی شده است.

بدین منظور ابتدا افشانه با سوراخ افشانه‌های استوانه‌ای و مخروطی همگرا شبیه سازی شده است. در بررسی جریان داخلی سوخت مایع، نتایج عددی حاصل نشان می‌دهند که پدیده حفره‌زائی در سوراخ افشانه استوانه‌ای با شدت بیشتری نسبت به سوراخ افشانه مخروطی همگرا رخ می‌دهد.

همچنین سرعت فواره سوخت در خروجی سوراخ افشانه مخروطی همگرا نسبت به استوانه‌ای به دلیل کمتر بودن تلفات اصطکاکی بیشتر بوده و لذا طول نفوذ فواره بیشتری دارد ولی قطر متوسط ذرات پاشیده شده برای هر دو افشانه تقریباً یکسان است.

عدد حاصل در این مرحله نشان می‌دهند که پدیده حفره‌زائی درون افشانه دارای خان نسبت به نوع بدون خان با شدت کمتری رخ می‌دهد. در بررسی مشخصات فواره مشخص گردید که ایجاد خان درون افشانه منجر به افزایش زاویه مخروطی فواره و کاهش طول نفوذ و قطر متوسط ذرات پاشیده شده به دلیل حرکت چرخشی سوخت می‌شود.

در موتورهای دیزل، افزایش زاویه مخروطی فواره می‌تواند منجر به بهبود اختلاط سوخت و هوا و کیفیت اتمیزه شدن سوخت شود. با توجه به این که افزایش طول نفوذ فواره سوخت می‌تواند منجر به برخورد ذرات بیشتری از فواره با سر سمبۀ موتور احتراق داخلی دیزل گردد و در نتیجه منجر به افزایش هیدروکربن‌های نسوخته گردد، ایجاد جریان چرخشی و افزایش زاویه مخروطی فواره می‌تواند از افزایش طول نفوذ و برخورد فواره سوخت با دیواره محفظه احتراق جلوگیری کند.

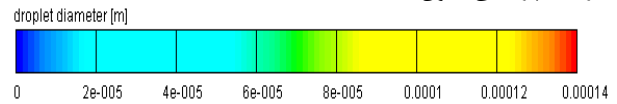
مشخصات فواره سوخت می‌توانند از طریق تغییر هندسه و نحوه جابجایی سوزن و همچنین تغییر مشخصات خان ایجادشده درون افشانه مانند تعداد دورها، گام و ارتفاع، مهار و تنظیم بشوند.

## فهرست علائم

$C$	ضریب ثابت، -
$C_D$	ضریب پسا، -
$C_p$	ضریب کانینگهام، -
$D$	قطر افشانه، m
$f$	نیروی حجمی، N
$g$	بردار شتاب جاذبه، $ms^{-2}$
$L$	طول افشانه، m
$M_{kl}$	تبادل لختی بین حالت $k, l$ ، $kgm^{-2}s^{-2}$
$p$	فشار، pa

حالت افشانه دارای خان با نحوه جابجایی ۲، زاویه مخروطی فواره نسبت به سایر حالات بیشتر است.

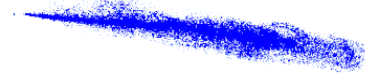
دلیل آن بیشتر بودن شار جرمی خروجی افشانه نسبت به سایر حالات است. افزایش شار جرمی سبب می‌شود که سوخت بیشتری وارد محفظه احتراق شود و لذا مقدار جرم بخار تولیدشده افزایش می‌یابد. در این حالت، بخارات تولیدشده با آزادی بیشتری از قطرات مایع مشابه حرکت خواهند کرد که منجر به افزایش زاویه مخروطی فواره می‌شود. با تغییر نحوه جابجایی سوزن، تلفات اصطکاکی برای سوراخ افشانه دارای خان نسبت به نحوه حالت پایه کاهش یافته و با افزایش سرعت متوسط در خروجی، طول نفوذ آن افزایش می‌یابد. با ایجاد خان، قطر متوسط ذرات پاشیده شده نسبت به حالت معمولی کاهش می‌یابد که دلیل آن پخش یکنواخت ذرات و افزایش سطح تماس آن‌ها با گاز متراکم درون محفظه احتراق و بهبود فرآیند تبخیر به دلیل ایجاد حرکت چرخشی درون افشانه است.



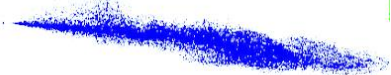
هندسه افشانه

۰.۸ میلی ثانیه

استوانه



مخروط



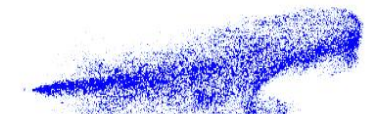
مخروط باخان -  
نحوه ۱



مخروط باخان -  
نحوه ۲



مخروط باخان -  
نحوه ۳



شکل ۱۷: ساختار فواره محاسبه شده در هر حالت در مدت زمان انتهای پاشش

Effects of Needle Lift and Seat on the Cavitation Flow in the Diesel Injector Nozzle, Journal of Fuel and Combustion, Vol. 2, 2016(in Persian).

[7]Y. S. Zuo, X. L. Guo, C. Chuan, S. Y. Yu and X. G. Guo, Numerical Investigation on Effects of Nozzle's Geometric Parameters on the Flow and the Cavitation Characteristics within Injector's Nozzle for a High-Pressure Common-Rail DI Diesel Engine, Energy Conversion and Management, Vol. 89, pp.843-861, 2015.

[8]M. Battistoni, C.M. Grimaldi, Numerical analysis of injector flow and spray characteristics from diesel injectors using fossil and biodiesel fuels, Applied Energy, Vol. 97, pp. 656-666, 2012.

[9]H. Fujimoto, T. Mishikori, T. Tsumakoto, J.Senda, Modeling of atomization and vaporization process in flash boiling spray, ICLASS-94 Conference, France, 1994.

[10]Avl List GmbH. AVL Fire v. 2013, CFD solver, Eulerian multiphase, 2013.

[11]Avl List GmbH. AVL Fire v. 2013, CFD solver, Spray, 2013.

[12]H. Mohammadi, P. Jabbarzadeh, M. Jabbarzadeh, M. T. Shrevani-Tabar, Numerical investigation on the hydrodynamics of the internal flow and spray behavior of diesel fuel in a conical nozzle orifice with the spiralfiring likeguides, Fuel, Vol. 196, No. 5, pp. 419-430, 2017.

[13]F. Brusiani, S. Falfari, P. Pelloni, Influence of the Diesel injector hole geometry on the flow conditions emerging from the nozzle, 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013, Energy Procedia, Vol. 45, pp. 749 - 758, 2014.

[14]R.H. Perry, D.W. Green, Perry's chemical engineer's handbook, McGraw-Hill, 1997.

[15]L. Postrioti, C.N. Grimaldi, M.Ceccobello, D. R. Gioia, Diesel common rail injection system behavior with different fuels, SAE Technical paper 2004-01-0029, 2004.

[16]G. Stumpp, M. Ricco, Common rail - An attractive fuel injection system for passenger car DI diesel engines, SAE International, Paper No. 960870, 1996.

[17]G. P. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch, F. Otto, Simulating Combustion: Simulation of combustion and pollutant formation forengine-development, First Edition, pp. 80, Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

$r_t$	مقیاس طول اغتشاش، m
$r$	شعاع حباب، m
$Re$	عدد رینولدز
$SMD$	قطر متوسط ذرات پاشیده شده، m
$t$	زمان، s
$u$	سرعت ذره، $ms^{-1}$
$v_k$	سرعت حالت k، $ms^{-1}$
$We$	عدد وبر

### علائم یونانی

$\alpha_k$	کسر حجمی حالت k
$\Gamma_{kl}$	تبادل جرم مابین دو حالت k, l، $kgm^{-3}s$
$\mu$	لزجت دینامیکی، pa.s
$\sigma$	کشش سطحی مایع، $Nm^{-1}$
$\rho$	چگالی، $kgm^{-3}$
$\tau$	تنش برشی، $kg m^{-1}s^{-2}$

### زیرنویس‌ها

$c$	حالت پیوسته
$d$	حالت گسسته
$D$	پسا

### مراجع و منابع

- [1]N. Akbari, S. Azizi Hasanakloo, Numerical investigation of the cavitation phenomenon on spray behavior of diesel fuel in injector, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 03, pp. 189-196, 2018.
- [2]N. Akbari, Experimental and Analytical Study of Performance Characteristics of Pressure-Swirl Duplex Injector, Journal of Mechanical Engineering, Vol.49,No.03, pp. 29-37, 2019
- [3]V. Dorfner, J. Domnick, F. Durst, R. Kohler, Viscosity and surface tension effects in pressure swirlatomization, Atomization and Sprays, Vol. 5, No. 3, 1995.
- [4]R. Payri, J. Gimeno, J. P. Viera, A. H. Plazas, Needle lift profile influence on the vapor phase penetration for a prototype diesel direct acting piezoelectric injector, Fuel, Vol. 113, pp. 257-265, 2013.
- [5]C. Bates, J. Hay, Pressure Atomizer PDA Measurement, Dantec information, No.11, June, 1992.
- [6]M. Mahdi, M. Salari, Numerical Analysis of the



## Numerical investigation of the effect of swirl and needle lift profile change on the diesel fuel spray behavior

A. H. Farajollahi<sup>1\*</sup>, R. Firuzi<sup>2</sup>, M. Pourseifi<sup>3</sup>, A. Mardani<sup>4</sup>, M. Rostami<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Imam Ali University, Tehran, Iran, [a.farajollahi@sharif.edu](mailto:a.farajollahi@sharif.edu)

<sup>2</sup> Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, [rezafiruzi@edu.ikiu.ac.ir](mailto:rezafiruzi@edu.ikiu.ac.ir)

<sup>3</sup> Imam Ali University, Tehran, Iran, [mpourseifi@gmail.com](mailto:mpourseifi@gmail.com)

<sup>4</sup> Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [amardani@sharif.edu](mailto:amardani@sharif.edu)

<sup>5</sup> Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, [cptrostami@gmail.com](mailto:cptrostami@gmail.com)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 18 December 2019

Accepted: 27 January 2020

#### Keywords:

Injector nozzle

Needle lift profile

Swirly flow

Spray penetration length

Spray cone angle

### ABSTRACT

In this paper, the effect of the creation of swirly flow and the needle lift profile change have been investigated on the behavior of the diesel fuel spray. To this end, two-phase flow inside the diesel injector was simulated using the CFD. Solidworks software has been used for geometry creation and AVL-Fire software has been used for meshing and simulating. Firstly, the liquid flow and the spray characteristics of the nozzle holes with cylindrical and conical geometries with the same needle lift profile have been considered numerically. The numerical results of this step show that the conical nozzle hole has a longer penetration length than the cylindrical nozzle hole, but Sauter means the diameter of these two nozzles is almost the same. In the second step, to increase the spray cone angle and improve the atomization quality, spiral rifling like guide has been used in conical nozzle hole and the needle lift profile has been changed. Numerical results of this step show that these new nozzles have more spray cone angle and less penetration length and Sauter mean diameter than nozzles simulated in the first step. Thus the fuel spray characteristics can be controlled by the creation of swirly flow and changing the nozzle hole geometry and needle lift profile. Numerical results and experimental data were validated from previous researches.

