

# بررسی عددی تأثیر تغییر هم‌زمان هندسه نازل انژکتور و پروفیل

## بالابری سوزن روی رفتار افشانه سوخت دیزل

مهدی پورسیفی<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه امام علی (ع)

رضا فیروزی<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

امیرحمزه فرج‌الهی<sup>۱</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه امام علی (ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵)

### چکیده

پدیده کاویتاسیون اثرات مخربی بر عملکرد توربوماشین‌ها دارد ولی وقوع این پدیده درون نازل انژکتور تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار هیدرودینامیکی افشانه سوخت دارد. هندسه نازل، پروفیل بالابری سوزن و نوع سوخت از عوامل تأثیرگذار در ایجاد این پدیده می‌باشند. هدف اصلی و نوآوری تحقیق حاضر بررسی تأثیر تغییر هم‌زمان هندسه نازل انژکتور و پروفیل بالابری سوزن بر روی ایجاد کاویتاسیون و رفتار هیدرودینامیکی افشانه سوخت دیزل می‌باشد. بنابراین، در قسمت اول جریان مایع و مشخصات افشانه نازل‌های استوانه‌ای و مخروطی همگرا دارای پروفیل بالابری سوزن یکسان با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی ای وی ال فایر به صورت عددی بررسی شده است. در مرحله دوم، نازل مخروطی همگرا با پروفیل‌های بالابری سوزن متفاوت شبیه‌سازی شده است. نتایج عددی حاصل در قسمت دوم این مطالعه نشان می‌دهند که نازل‌های مخروطی همگرا با پروفیل‌های متفاوت بالابری سوزن، دارای طول نفوذ افشانه بیشتر و قطر متوسط ذرات کوچکتری نسبت به نازل‌های شبیه‌سازی شده در قسمت اول این مطالعه می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** کاویتاسیون، هندسه نازل، پروفیل بالابری سوزن، دینامیک سیالات محاسباتی، افشانه سوخت

## Numerical Investigation on the Influence of the Nozzle Geometry and Needle Lift Profile Simultaneous Change on Spray Behavior of Diesel Fuel in Injector

A. H. Farajollahi  
Mechanical Engineering  
Department of  
Imam Ali University

R. Firuzi  
Mechanical Engineering Department of  
Imam Khomeini International  
University

M. Pourseifi  
Mechanical Engineering  
Department of  
Imam Ali University

(Received: 23/ July/2019 ; Accepted: 25/January/2020)

### ABSTRACT

Cavitation phenomenon has destructive effects on the turbomachines performance but the occurrence of this phenomenon inside the injector nozzle has significant effect on the fuel spray hydrodynamic behavior. The nozzle geometry, needle lift profile and fuel type are effective parameters in creation of this phenomenon. The main goal and novelty of the present study is to investigate the effect of simultaneous change of the injector nozzle geometry and the needle lift profile on the creation of cavitation and diesel fuel spray hydrodynamic behavior. Thus in the first part, the liquid flow and spray characteristics of the cylindrical and converged conical nozzles with the same needle lift profile are investigated numerically using AVL-Fire CFD code. In the second step the converged conical nozzles with different needle lift profiles are simulated. Numerical results of the second part of this study show that the converged conical nozzles with different needle lift profiles have a longer spray penetration length and smaller Sauter-mean diameter than nozzles simulated in the first part of this study.

**Keywords:** Cavitation, Nozzle Geometry, Needle Lift Profile, Computational Fluid Dynamics, Fuel Spray

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): a.farajollahi@sharif.edu

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: rezafiruzi@edu.ikiu.ac.ir

۳- استادیار: m\_pourseifi@yahoo.com

## ۱- مقدمه

سهرابی و همکاران تأثیر تعداد سوراخ‌های نازل بر جریان داخل نازل و پدیده کاویتاسیون را بررسی کردند. بدین منظور تعداد سوراخ‌های نازل را از ۲ تا ۸ تغییر دادند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد سوراخ‌های نازل، ساختار و قدرت جریان‌های گردابه‌ای درون کیسه و سوراخ‌های آن به شدت تغییر می‌کند. از دیدگاه مشخصه‌های جریان داخل افشانه، با افزایش تعداد سوراخ‌های افشانه، کاهش سرعت تزریق و شار جرمی جریان موجب افزایش شدت کاویتاسیون می‌شود. همچنین ضریب تخلیه و سطح مقطع مؤثر افشانه کاهش می‌یابد [۱۱].

محمدی و همکاران از خان درون اریفیس انژکتور دیزل استفاده کردند. نتایج نشان داد که زاویه مخروطی افشانه و قطر متوسط ذرات افزایش ولی طول نفوذ افشانه کاهش می‌یابد [۱۲].

برگ استراند ۵ نوع نازل با شکل‌های مختلف را بررسی نمود. نتایج نشان داد که نازل مخروطی همگرا به‌طور کلی دوده و گاز نیتروژن اکسید خروجی و مصرف سوخت کمتری نسبت به نازل استوانه‌ای دارد و نازل با قطر کوچک‌تر دوده کمتری نسبت به نازل با قطر بزرگ‌تر تولید می‌کند [۱۳].

سام و همکاران به مقایسه جریان انژکتور و مشخصه‌های افشانه برای دو سوخت دیزل و بیودیزل پرداختند. نتایج شبیه‌سازی انژکتور نشان داد که برای سوخت دیزل پدیده کاویتاسیون و تشکیل بخار در نواحی گسترده‌تری نسبت به سوخت بیودیزل درون نازل صورت می‌گیرد. همچنین نتایج شبیه‌سازی افشانه نشان داد که طول نفوذ و قطر متوسط ذرات افشانه سوخت بیودیزل نسبت به دیزل اندکی بیشتر می‌باشند [۱۴].

جبارزاده و همکاران به بررسی طول نفوذ افشانه دیزل در نازل‌های استوانه‌ای، مخروطی همگرا و واگرا پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که در زمان‌های ابتدایی پاشش، نوع نازل تأثیر چندانی روی طول نفوذ افشانه ندارد. ولی با گذشت زمان، در نهایت نازل مخروطی واگرا دارای طول نفوذ بیشتری نسبت به نازل مخروطی همگرا و آن نیز دارای طول نفوذ بیشتری نسبت به نازل استوانه‌ای می‌باشد [۱۵].

هیون کیو و همکاران به بررسی تأثیرات پدیده کاویتاسیون بر روی اتمیزاسیون سوخت دیزل پرداختند.

سامانه‌های پیشران یکی از نکات مهم و کلیدی در صنعت هر کشور به‌خصوص در صنایع نظامی و حمل و نقل محسوب می‌شوند و دستیابی به فناوری خاص در آن‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. تاکنون پیشران‌های مختلفی مانند موتورهای بخار، زغالی، دیزلی و هسته‌ای متناسب با نیازها و کاربردهای مختلف عرضه شده‌اند. در این میان پیشران‌های دیزل از مهم‌ترین سامانه‌های پیشران در جهان محسوب می‌شوند که به دلیل داشتن ویژگی‌هایی همچون نسبت تراکم، توان تولیدی و گشتاور بالا نسبت به سایر پیشران‌ها در وسایل مختلفی از جمله قطار، نفربرها، تانک‌ها و شناورهای بزرگ و کوچک کاربرد دارند. با توجه به کاربری روزافزون این موتورها و مشکلات ناشی از آلاینده‌های آن‌ها، تلاش برای کاهش آلاینده‌ها حائز اهمیت و الزامی است. فرآیند احتراق در موتورهای دیزل به شدت وابسته به مشخصه‌های پاشش سوخت و پدیده اتمیزاسیون جهت افزایش نرخ تبخیر و اختلاط سوخت و هوا می‌باشد. عوامل فشار پاشش سوخت، زمان شروع، نرخ پاشش، هندسه نازل و شرایط محیط داخل سیلندر تأثیر زیادی بر نرخ اختلاط، احتراق و میزان آلاینده‌های خروجی موتور دیزل پاشش مستقیم دارند [۱]. امروزه در کنار به‌کاربردن انواع سوخت‌ها و سامانه‌های مختلف به‌منظور کنترل و تنظیم گازهای آلاینده در موتورها، هندسه نازل انژکتور به‌عنوان یک عامل مهم در بهبود کیفیت سوخت و بازده موتور مطرح می‌شود [۴-۲]. جریان درون نازل می‌تواند توسط دینامیک، هیدرودینامیک و فاکتورهای هندسی که به‌صورت گسترده در ترم‌های فشار تزریق، جریان دوفازی سوخت مایع درون نازل، پروفیل بالابری سوزن و هندسه اریفیس مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، کنترل شود [۵ و ۶]. رفتار هیدرودینامیک جریان سوخت مایع میان گذرگاه درونی نازل شامل وقوع پدیده کاویتاسیون و آشفستگی می‌تواند اتمیزاسیون افشانه سوخت دیزل را بهبود بخشد [۲، ۷ و ۸] و زاویه مخروطی افشانه را افزایش دهد [۹ و ۱۰].

در مطالعات گذشته تأثیر تغییر هندسه نازل و پروفیل بالابری سوزن بر روی ایجاد پدیده کاویتاسیون و مشخصات افشانه سوخت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل محاسباتی

در این مقاله، در دو مرحله به بررسی تأثیر هندسه نازل و پروفیل بالابری سوزن بر ایجاد پدیده کاویتاسیون و رفتار افشانه سوخت دیزل پرداخته شده است. مدل اویلر-اویلر برای شبیه‌سازی جریان چند فاز و کاویتاسیون درون انژکتور به کار برده شده است. نتایج حاصل از محاسبات جریان داخل انژکتور در مقطع خروجی نازل ذخیره شده و در شبیه‌سازی افشانه به‌عنوان داده‌های ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل استفاده‌شده در شبیه‌سازی افشانه، مدل اویلر-لاگرانژ می‌باشد. در این مطالعه از یک انژکتور دیزل CRI1 ساخت شرکت Bosch متعلق به گروه نازل‌های Mini-sac، پنج سوراخه که در آن سوراخ‌ها با فاصله یکسانی از هم قرار گرفته‌اند، با زاویه انحراف  $\theta=75^\circ$  استفاده شده است. نام‌گذاری مشخصات هندسی مجموعه سوزن، نشیمنگاه آن، نازل و کیسه انژکتور در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌منظور افزایش دقت و کاهش مدت‌زمان محاسبات عددی با توجه به شرط تقارن هندسی انژکتور، شبیه‌سازی تنها یک‌دهم (قطاع با زاویه  $36^\circ$  درجه) از کل هندسه انژکتور صورت گرفته است. در این شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی ای وی ال فایر<sup>۳</sup> که بر پایه روش حل عددی حجم محدود می‌باشد، استفاده شده است.

### ۲-۱- معادلات حاکم بر شبیه‌سازی جریان چند فازي درون نازل

تغییر فاز یک سیال از حالت مایع به بخار در دمای ثابت، کاویتاسیون نام دارد. این پدیده هنگامی که فشار استاتیکی محلی سیال پایین‌تر از فشار بخار آن باشد، رخ می‌دهد. کاویتاسیون می‌تواند در توربوماشین‌ها، اژدها، سرریزها و نازل انژکتور سوخت رخ دهد. هندسه نازل، پروفیل بالابری سوزن، نوع سوخت و دمای آن از عوامل مهم در ایجاد کاویتاسیون سوخت مایع محسوب می‌شوند. با وقوع پدیده کاویتاسیون درون نازل، حباب‌های گازی در نواحی دارای فشار پایین‌تر از فشار بخار تشکیل شده و در نواحی دارای فشار بیشتر می‌ترکند. اختلاف فشار بالا ما بین ابتدا و انتهای اریفیس انژکتور علاوه بر مشخصات هندسی نازل

نتایج نشان داد در حالتی که ضریب تخلیه در یک محدوده مشخصی باشد، کاویتاسیون به‌ازای مقادیر مختلف نسبت طول به قطر ( $\frac{L}{D}$ ) ظاهر شده و به‌ازای مقادیر کوچک‌تر این نسبت، توسعه خواهد یافت و منجر به فروپاشی بهتر می‌شود [۱۶].

دسانتس و همکاران از یک روش ویژه برای مشاهده  $1/5$  میلی‌متر اول افشانه سوخت دیزل به‌منظور آزمودن رابطه بین پدیده کاویتاسیون درون نازل و رفتار افشانه پرداختند. بدین منظور به بررسی یک نازل متقارن دیزل پرداختند. نتایج حاصل حاکی از افزایش قابل توجه زاویه مخروطی و بی‌نظمی‌های کانتور افشانه به‌دلیل وجود حباب‌های کاویتاسیون در خروجی اریفیس بود [۱۷].

شروانی‌تبار و همکاران تأثیر نسبت شعاع منحنی ورودی اریفیس به قطر اریفیس را بر روی پدیده کاویتاسیون بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که افزایش این نسبت منجر به کاهش ترکیدن حباب‌های کاویتاسیون می‌شود و در نتیجه باعث افزایش قطر متوسط ذرات می‌شود [۱۸].

پایری و همکاران به بررسی تأثیر پروفیل بالابری سوزن انژکتور بر روی رفتار افشانه سوخت دیزل به‌صورت تجربی پرداختند. بدین منظور آن‌ها از سه پروفیل مربعی، رمپ<sup>۱</sup> و بوت<sup>۲</sup> استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که طول نفوذ افشانه سوخت در حالت مربعی بیشتر از دو حالت دیگر می‌باشد [۱۹].

مرور مقالات گذشته در این قسمت نشان‌دهنده آن است که مطالعات زیادی بر روی عوامل تأثیرگذار بر جریان درون نازل انژکتور و ایجاد پدیده کاویتاسیون انجام شده است ولی تاکنون تأثیر ترکیب تغییر همزمان هندسه نازل انژکتور و پروفیل بالابری سوزن بر نحوه شکل‌گیری پدیده کاویتاسیون و در نتیجه تأثیر آن بر مشخصات افشانه سوخت دیزل انجام نشده است. هدف و نوآوری مقاله حاضر، بررسی عددی تأثیر تغییر همزمان هندسه و پروفیل بالابری سوزن روی شکل‌گیری پدیده کاویتاسیون و رفتار افشانه سوخت در انژکتور دیزل CRI1 ساخت شرکت Bosch متعلق به گروه نازل‌های Mini-sac می‌باشد.

1- Ramp  
2- Boot

معادله انرژی جنبشی آشفستگی

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k K_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k v_k K_k = \nabla \cdot \alpha_k \left( \mu_k + \frac{\mu_k'}{\sigma_k} \right) \nabla K_k + \alpha_k p_k - \alpha_k \rho_k \varepsilon_k + \sum_{l=1, k \neq l}^N K_{kl} + K_k \sum_{l=1, k \neq l}^N \Gamma_{kl}, k=1, \dots, N \quad (4)$$

## ۲-۲- معادلات حاکم بر شبیه‌سازی اندرکنش

### بین‌حالتی

معادلات حاکم بر شبیه‌سازی اندرکنش بین‌حالتی شامل معادلات تبادل جرم و تبادل مومنتوم بین دو حالت می‌باشند.

### ۱-۲-۲- تبادل بین‌حالتی جرم

تبادل جرم بین دو حالت مایع و بخار با مدل کاپیتاسیونی خطی مدل شده است. معادله حاکم به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\Gamma_c = \rho_d N'' 4\pi R^2 \dot{R} = -\Gamma_d \quad (5)$$

که در آن،  $N''$  چگالی عددی حباب و  $R$  شعاع حباب می‌باشد. مشتق زمانی شعاع حباب با کمک معادله رایلی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{\Delta p}{\rho_c} \quad (6)$$

که در آن،  $\Delta p$  اختلاف فشار مؤثر و  $\rho_c$  چگالی حالت پیوسته (مایع) می‌باشد.

چگالی عددی حباب،  $N''$ ، با توجه به رمپ خطی نزولی فرض شده به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N'' = \begin{cases} N_0'' & \alpha_d \leq 0.5 \\ 2(N_0'' - 1)(1 - \alpha_d) + 1 & \alpha_d > 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

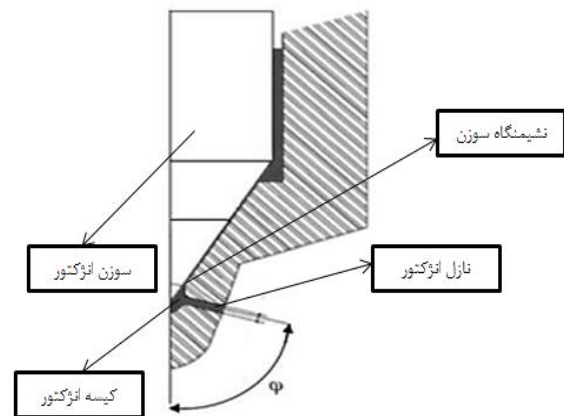
$N_0''$  چگالی عددی اولیه حباب می‌باشد که به مشخصات فاز مایع وابسته است و برای سوخت دیزل که اکثراً مورد استفاده قرار می‌گیرد برابر  $10^{12}$  می‌باشد [۲۰].

### ۲-۲-۲- تبادل بین‌حالتی مومنتوم

تبادل مومنتوم بین دو حالت مایع و بخار با در نظر گرفتن تأثیر نیروهای پسا و پخش آشفستگی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

انژکتور که سرعت جریان را در خروجی نازل افزایش می‌دهد، منجر به داشتن فشار دینامیکی بالاتر و فشار استاتیکی پایین‌تر در جریان داخلی نازل شده و در نهایت باعث رشد کاپیتاسیون می‌گردد [۱۲].



شکل (۱): نام‌گذاری قسمت‌های مختلف انژکتور

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی جنبشی آشفستگی می‌باشند. توجه به فرض هم‌دام بودن، از آوردن و حل معادله انرژی صرف نظر شده است.

معادله بقای جرم

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

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

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

معادله بقای مومنتوم

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k v_k = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{T}_k') + \alpha_k \rho_k \vec{f} + \sum_{l=1, k \neq l}^N M_{kl} + v_k \sum_{l=1, k \neq l}^N \Gamma_{kl}, k=1, \dots, N \quad (3)$$

که در آن،  $f$  بردار نیروی حجمی شامل نیروی جاذبه و اینرسی است.  $\tau$  بردار تنش برشی،  $T^t$  بردار تنش رینولدزی،  $M$  بیانگر اندرکنش مومنتوم بین حالت‌ها و  $p$  فشار استاتیکی می‌باشد.

معادله بقای مومنتوم

$$m_d \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{ig} + F_{ip} + F_{ib} \quad (12)$$

که در آن،  $F_{idr}$  نیروی پسا<sup>۵</sup> می باشد و برابر است با:

$$F_{idr} = \frac{1}{2} \rho_g A_d C_d |u_{rel}| u_{rel} \quad (13)$$

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_d C_p} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}) & Re_d < 1000 \\ \frac{0.44}{C_p} & Re_d \geq 1000 \end{cases} \quad (14)$$

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

$$Re_d = \frac{\rho_g |u_{rel}| D_d}{\mu_g} \quad (15)$$

در معادله (۱۲)، تمامی نیروهای سطحی و بدنی روی قطره افشانه لحاظ شده اند. از آن جایی که بزرگی نیروهای فشاری و سایر نیروها در مقایسه با نیروهای پسا و گرانشی قابل اغماض است، فقط نیروی پسا روی قطره افشانه (شامل مؤلفه های فشار و ویسکوز) برای فروپاشی اولیه و ثانویه افشانه سوخت مایع لحاظ شده است [۱۲].

شتاب قطره در محیط گازی به صورت زیر می باشد:

$$\frac{du_{id}}{dt} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{1}{D_d} |u_g - u_{id}| (u_{ig} - u_{id}) + (1 - \frac{\rho_g}{\rho_d}) g_i \quad (16)$$

زیرمدل های استفاده شده شامل مدل دو کوویچ<sup>۶</sup> در تبخیر، مدل ارورکه<sup>۷</sup> در برهم کنش میان ذرات، مدل تزریق گلوله<sup>۸</sup> در فروپاشی اولیه و مدل موج<sup>۹</sup> برای فروپاشی ثانویه می باشند. در این مدل نرخ کاهش شعاع قطره نسبت به زمان به صورت زیر ارائه می شود:

$$\frac{dr}{dt} = - \frac{(r - r_{stable})}{\tau_a} \quad (17)$$

که در آن،  $\tau_a$  زمان فروپاشی مدل می باشد و برابر است با:

$$\tau_a = \frac{3.726 \cdot C_2 \cdot r}{\Lambda \cdot \Omega} \quad (18)$$

$C_D$  ضریب پسا،  $v_r$  سرعت نسبی بین دو حالت مایع و بخار،  $C_{TD}$  ضریب پخش آشفته گی و  $K$  انرژی جنبشی آشفته گی می باشد.  $A'''$  بیانگر چگالی سطح مشترک بین دو حالت می باشد و برای مدل کاویتاسیونی پسا به صورت زیر محاسبه می شود:

$$A_i''' = \pi D_b^2 N''' = (36\pi N''')^{\frac{1}{3}} \alpha_d^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

ضریب پسا تابعی از عدد رینولدز حباب بوده و به صورت زیر محاسبه می شود [۲۱]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{192}{Re_b} (1 + 0.1 Re_b^{0.75}) & Re_b \leq 1000 \\ 0.438 & Re_b > 1000 \end{cases} \quad (10)$$

عدد رینولدز حباب نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re_b = \frac{|v_r| D_b}{\nu_c} \quad (11)$$

## ۲-۳- معادلات حاکم بر افشانه

در شبیه سازی افشانه دو رویکرد اولبری<sup>۱</sup> و لاگرانژی<sup>۲</sup> کاربرد دارند. در رویکرد اولبری، سیال همانند یک محیط پیوسته رفتار می کند ولی در رویکرد لاگرانژی، مدل سازی بر ردیابی مسیر قطرات متمرکز است. از آن جایی که در نزدیکی خروجی نازل افشانه غلیظ است، استفاده از رویکرد لاگرانژی در این قسمت مناسب نیست. همچنین شبیه سازی افشانه با رویکرد اولبری در نواحی دور از نازل که افشانه رقیق است توصیه نمی شود [۲۲]. با توجه به وقوع کاویتاسیون درون نازل انژکتور، در شبیه سازی افشانه با جریان دو فازی مایع و بخار مواجه هستیم. بنابراین، استفاده از رویکرد اولبری-لاگرانژی مناسب به نظر می رسد. در رابطه با فاز مایع، امروزه عملاً تمامی محاسبات مربوط به افشانه در محیط مهندسی بر پایه روش آماری قطره گسسته<sup>۳</sup> صورت می گیرد. این روش با حل کردن معادلات دیفرانسیل معمولی برای مسیر، مومنتوم، انتقال جرم و حرارت قطرات واحد که هر کدام از آن ها عضو یک گروه قطرات بدون فعل و انفعال داخلی یکسان که یک دسته<sup>۴</sup> نامیده می شود، انجام می شود [۲۳]. معادلات حاکم به صورت زیر می باشند:

5- Drag  
6- Dukowicz  
7- O-Rourke  
8- Blob injection  
9- Wave

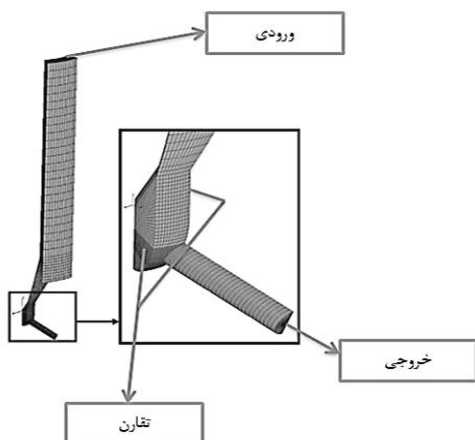
1- Eulerian  
2- Lagrangian  
3- Discrete Droplet Method  
4- Parcel

طول نازل و شعاع منحنی در ورودی نازل می‌باشند. به دلیل جابه‌جایی سوزن انژکتور، از یک شبکه متحرک در شبیه‌سازی آن از زمان بازشدن تا بسته‌شدن سوزن استفاده شده است. نحوه جابه‌جایی سوزن و مدت‌زمان باز و بسته شدن آن توسط پروفیل بالابری سوزن تعریف می‌شود. با توجه به تغییرات زیاد جریان در نزدیکی سوراخ انژکتور، در این ناحیه از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است. برای بررسی استقلال حل از شبکه، به مطالعه تأثیر اندازه شبکه بر دبی جرمی جریان سوخت خروجی از نازل انژکتور پرداخته شده است.

جدول (۱): مشخصات هندسی انژکتور

نازل مخروطی همگرا		نازل استوانه‌ای	
۱/۳	ضریب k	۰	ضریب k
۱۴۳	قطر ورودی (میکرومتر)	۱۳۰	قطر ورودی (میکرومتر)
۷۰۰	طول (میکرومتر)	۷۰۰	طول (میکرومتر)
۱۰	شعاع منحنی ورودی (میکرومتر)	۲	شعاع منحنی ورودی (میکرومتر)

با توجه به شکل ۴ در تعداد سلول ۱۵۴۰۰۰، دبی جرمی جریان سوخت خروجی از نازل انژکتور به مقدار نسبتاً یکنواختی می‌رسد. لذا از این تعداد سلول محاسباتی برای حل جریان داخل انژکتور استفاده شده است.



شکل (۲): شبکه‌بندی انژکتور

ثابت  $C_2$  زمان فروپاشی مدل را تصحیح می‌کند.  $r_{stable}$  شعاع نهایی قطره و متناظر با طول موج  $\Lambda$  مربوط به موج با سریع‌ترین رشد روی سطح قطره می‌باشد.

$$r_{stable} = C_1 \cdot \Lambda \quad (19)$$

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

$$\Lambda = 9.02 \cdot r \frac{(1+0.45 \cdot oh^{0.5})(1+0.4 \cdot T^{0.7})}{(1+0.87 \cdot We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (20)$$

$$\Omega = \left(\frac{\rho_d r^3}{\sigma}\right)^{-0.5} \frac{0.34+0.38 \cdot We_g^{1.5}}{(1+Oh)(1+1.4 \cdot T^{0.6})} \quad (21)$$

در معادلات فوق،  $We$  عدد وبر و  $Oh$  عدد اونسورگ<sup>۱</sup> می‌باشد و داریم:

$$T = Oh \cdot We^{0.5} \quad (22)$$

### ۳- محاسبات عددی

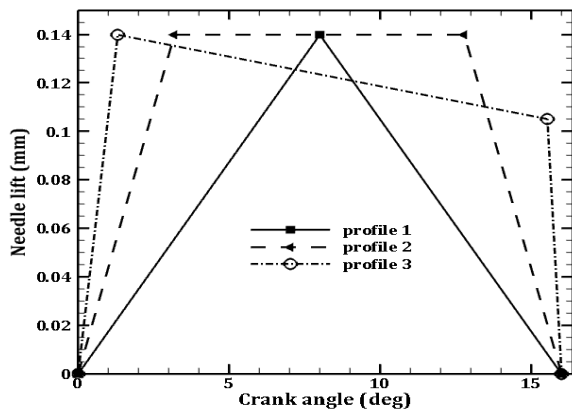
#### ۳-۱- انژکتور

به منظور بررسی تأثیر هندسه نازل و پروفیل بالابری سوزن انژکتور بر ایجاد پدیده کاویتاسیون و مشخصات افشانه، از دو نازل استوانه‌ای و مخروطی همگرا و دو پروفیل متفاوت استفاده شده است. در اریفیس مخروطی همگرای یک نازل، ضریب k به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_{-factor} = \frac{D_{in} [\mu m] - D_{out} [\mu m]}{10 [\mu m]} \quad (23)$$

که در آن،  $D_{in}$  قطر ورودی و  $D_{out}$  قطر خروجی سطح مقطع دایروی نازل انژکتور می‌باشد. معمولاً در کاربردهای مربوط به صنعت اتومبیل، این ضریب بین اعداد ۱/۱ و ۲ می‌باشد [۲۴]. مشخصات هندسی انژکتورهای مورد استفاده در این شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده است. شبکه‌بندی انژکتور به صورت شکل ۲ می‌باشد که با کمک نرم‌افزار ای وی ال فایر انجام شده است. شکل هندسی نازل‌های مورد استفاده در این مقاله و ابعاد آن‌ها در شکل ۳ آورده شده است. در این شکل،  $D_{in}$  قطر ورودی نازل،  $D_{out}$  قطر خروجی نازل،  $L$

نمودار بالابری سوزن<sup>۱</sup> بر حسب زاویه میل‌لنگ در پروفیل‌های مختلف مورد نظر در شکل ۴ آورده شده است که در آن پروفیل ۱ حالت پایه می‌باشد.



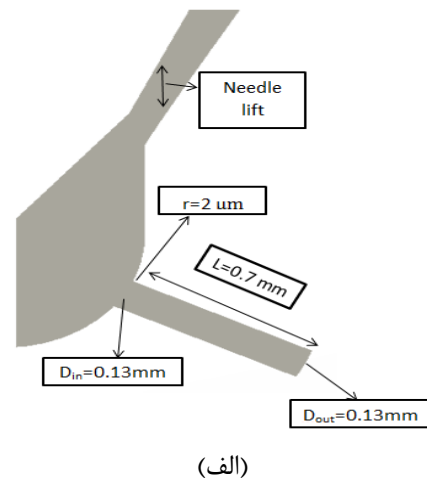
شکل (۵): پروفیل‌های بالابری سوزن بر حسب زاویه میل‌لنگ

زمان کل تزریق ۰/۸ میلی‌ثانیه و گام زمانی مورد استفاده در حل نیز از  $1 \times 10^{-8}$  ثانیه تا  $5 \times 10^{-7}$  ثانیه، با گام‌های کوچک‌تر در شروع حل می‌باشد. روش گسسته‌سازی زمانی مورد استفاده نیز روش ضمنی<sup>۲</sup> از مرتبه دوم می‌باشد. سوخت مورد استفاده در این شبیه‌سازی، دیزل می‌باشد که خواص آن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۲ آورده شده است [۲۵ و ۲۶].

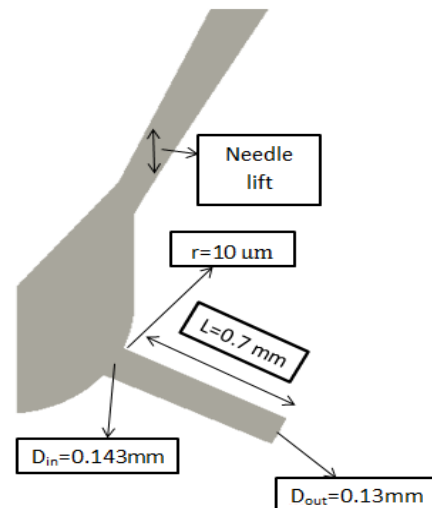
جدول (۲): مشخصات سوخت دیزل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

فاز سوخت	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	ویسکوزیته (Pa.s)	فشار بخار (Pa)
مایع	۸۲۵	۰/۰۰۲۱	۱۰۰۰
بخار	۵	۰/۰۰۰۰۱	-

سرعت دورانی موتور برابر ۳۷۵۰ دور بر دقیقه است. افت فشار بالا درون سوراخ نازل انژکتور منجر به ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌شود. به همین دلیل جریان دو فازی (دیزل مایع و بخار) در نظر گرفته شده است. مدل آشفستگی مورد استفاده k-ε می‌باشد. شرایط مرزی و اولیه برای شبیه‌سازی انژکتور در حالت پایه در جدول ۳ آورده شده

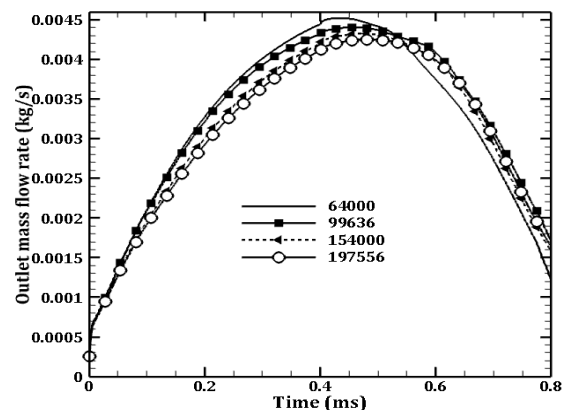


(الف)



(ب)

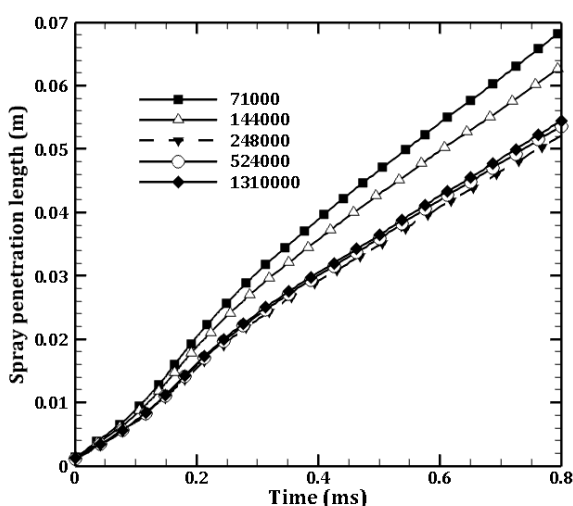
شکل (۳): هندسه و ابعاد نازل‌های مورد استفاده، (الف) نازل استوانه‌ای، (ب) نازل مخروطی همگرا



شکل (۴): دبی جرمی خروجی برای مقادیر متفاوت سلول

1- Needle Lift  
2-Implicit

شبیه‌سازی افشانه حاصل با توجه به نتایج بررسی استقلال حل از شبکه، در تعداد سلول ۲۴۸۰۰۰ صورت گرفته است. نتایج مربوط به این بررسی در شکل ۷ آورده شده است. سیال مورد استفاده هوای فشرده دارای فشار ۱۰ بار و دمای ۳۰۰ کلوین می‌باشد. مدل آشفتگی مورد استفاده  $k-\epsilon$  می‌باشد. اسکیم‌های گسسته‌سازی برای پیوستگی از نوع تفاضل مرکزی و برای مومنتوم، آشفتگی و انرژی از نوع بالادست از مرتبه دوم می‌باشند. بیشترین و کمترین تعداد تکرار برای معیار همگرایی به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰ و ضریب مادون رهایی برای مومنتوم، فشار و انرژی به ترتیب ۰/۶، ۰/۲ و ۰/۸ فرض شده است. همچنین برای کوپل فشار- مومنتوم الگوریتم سیمپل به کار برده شده است.



شکل (۷): طول نفوذ افشانه برای مقادیر متفاوت سلول

#### ۴- اعتبارسنجی مدل عددی

به منظور بررسی دقت نتایج عددی حاصل، به مقایسه داده‌های عددی مشخصه‌های طول نفوذ و قطر متوسط ذرات<sup>۵</sup> حاصل از شبیه‌سازی نازل استوانه‌ای و مخروطی همگرا با پروفیل بالابری سوزن در حالت پایه با نتایج تجربی و عددی موجود پرداخته شده است [۲۵ و ۲۷]. با توجه به شکل ۸ تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

است. اسکیم‌های<sup>۱</sup> گسسته‌سازی برای مومنتوم، آشفتگی و کسر حجمی از نوع بالادست<sup>۲</sup> از مرتبه دوم و برای پیوستگی از نوع تفاضل مرکزی<sup>۳</sup> می‌باشند.

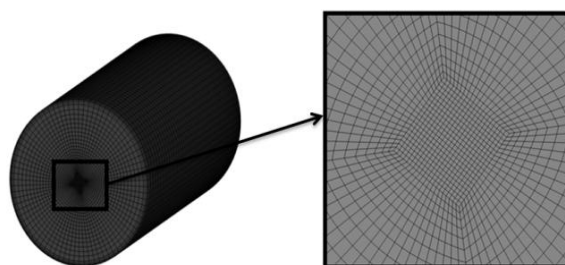
جدول (۳): شرایط اولیه و مرزی جریان سیال درون انژکتور

شرایط مرزی		شرایط اولیه	
۱۳۵۰ bar	فشار ورودی	۱۳۵۰ bar	فشار جریان
۱۰ bar	فشار خروجی	۳۱۳ k	دمای سوخت

بیشترین و کمترین تعداد تکرار برای معیار همگرایی به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰ و ضریب مادون رهایی برای مومنتوم، فشار و کسر حجمی به ترتیب ۰/۳، ۰/۱ و ۱ فرض شده است. برای کوپل فشار- مومنتوم الگوریتم سیمپل<sup>۴</sup> به کار برده شده است.

#### ۳-۲- افشانه

برای شبیه‌سازی و مشاهده نتایج افشانه حاصل از هندسه‌های مختلف نازل و پروفیل‌های متفاوت بالابری سوزن از یک محفظه احتراق استوانه‌ای حجم ثابت با قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر استفاده شده است [۱۲]. هندسه شبکه‌بندی شده محفظه احتراق در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به این شکل، در قسمت پاشش افشانه سوخت به منظور افزایش دقت حل عددی از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است.



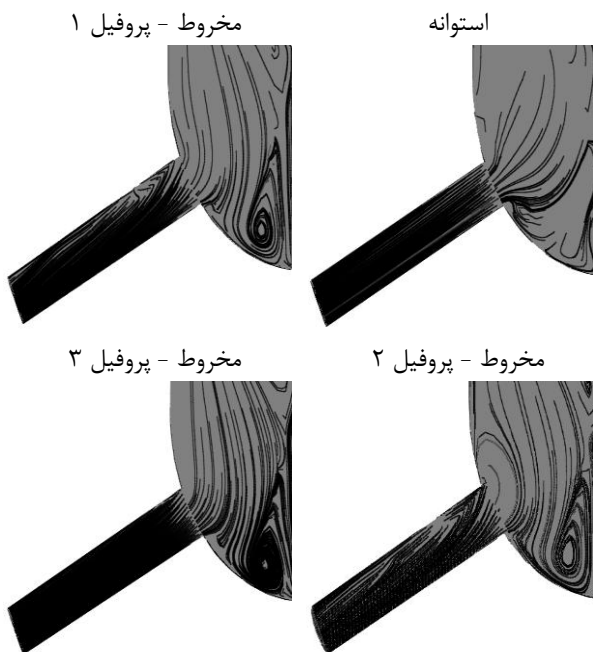
شکل (۶): شبکه‌بندی محفظه احتراق استوانه‌ای و جزئیات آن در مرکز استوانه

4- Sauter Mean Diameter

3- Scheme  
4- Upwind  
5- Central Differencing  
3- Simple

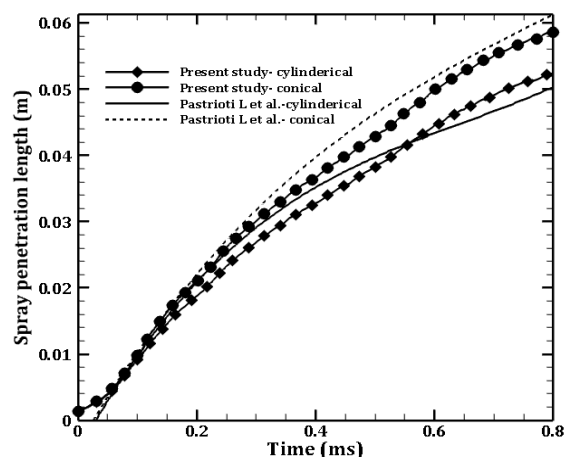


تمامی حالت‌ها می‌باشد. در پروفیل بالابری یکسان، در انژکتور با نازل مخروطی همگرا، با افزایش قدرت گردابه درون کیسه انژکتور و یکنواختی جریان نسبت به نازل استوانه‌ای، افت فشار در لبه ورودی سوراخ نازل کاهش یافته است. لذا درون نازل مخروطی همگرا میزان فاز مایع نسبت به نوع استوانه‌ای آن بیشتر است. تغییر پروفیل بالابری سوزن نیز منجر به افزایش قدرت گردابه و یکنواختی جریان در کیسه انژکتور و کاهش افت فشار در لبه ورودی سوراخ نازل گردیده است. در این حالت نیز شدت وقوع پدیده کاویتاسیون کاهش و میزان فاز مایع درون نازل افزایش یافته است.

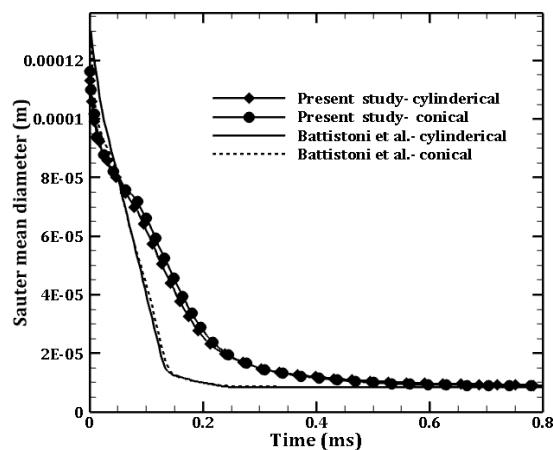


شکل (۹): خطوط جریان درون انژکتور برای هندسه‌ها و پروفیل‌های مختلف نازل و سوزن در مدت‌زمان انتهایی پاشش

به‌منظور بررسی شدت وقوع پدیده کاویتاسیون درون نازل انژکتور به بررسی کسر حجمی فاز مایع در هندسه‌ها و پروفیل‌های بالابری سوزن مختلف در شکل ۱۰ پرداخته شده است. با توجه به این شکل، در حالت پروفیل بالابری یکسان سوزن، در نازل استوانه‌ای پدیده کاویتاسیون با شدت بیشتری نسبت به نازل مخروطی همگرا رخ می‌دهد. دلیل



(الف)

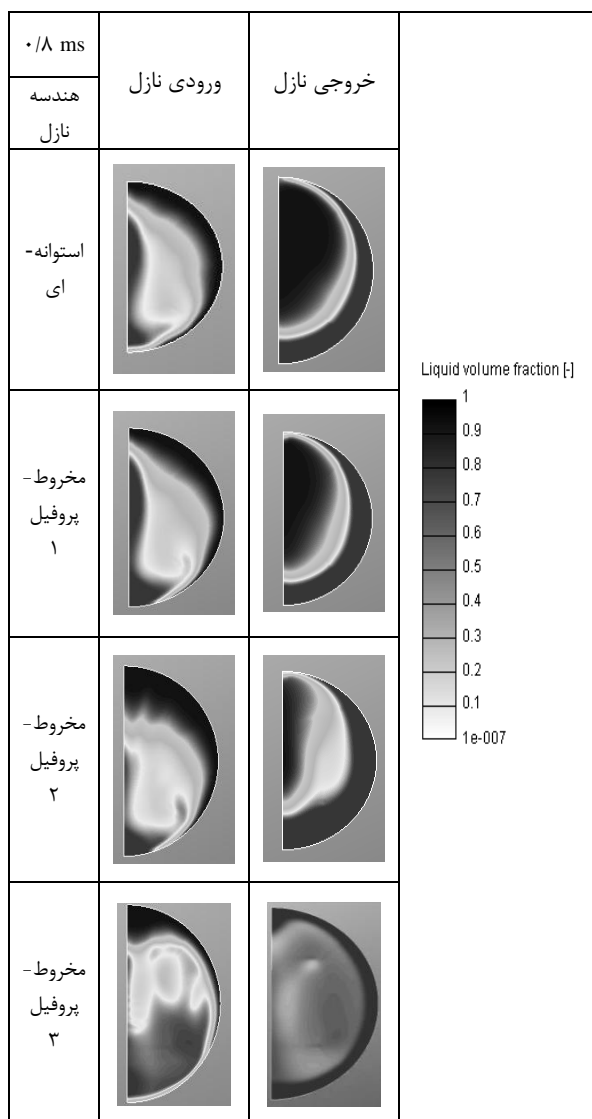


(ب)

شکل (۸): اعتبارسنجی با نتایج تجربی و عددی، (الف) طول نفوذ افشانه، (ب) قطر متوسط ساتر

### ۵- نتایج و بحث

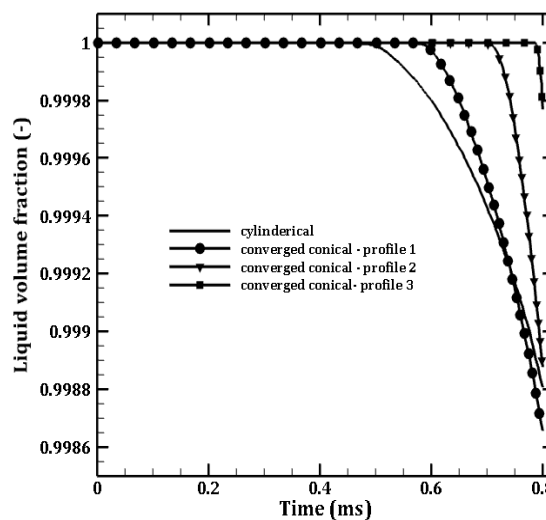
پدیده کاویتاسیون درون نازل انژکتور یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در رفتار هیدرودینامیکی افشانه سوخت می‌باشد که ایجاد این پدیده منجر به بهبود پدیده اتمیزاسیون سوخت و اختلاط بهتر سوخت و هوا می‌شود. تغییر هندسه نازل و پروفیل بالابری سوزن بر روی شدت وقوع این پدیده تأثیرگذار می‌باشند. بدین منظور نازل استوانه‌ای را به شکل مخروطی همگرا تغییر داده و از پروفیل‌های مختلف بالابری استفاده شده است. در شکل ۹ خطوط جریان برای انژکتور با هندسه‌ها و پروفیل‌های مختلف بالابری سوزن در مدت‌زمان انتهایی پاشش آورده شده است. این شکل بیانگر تشکیل جریان‌های گردابه‌ای در



شکل (۱۱): کسر حجمی فاز بخار درون نازل در حالات مختلف

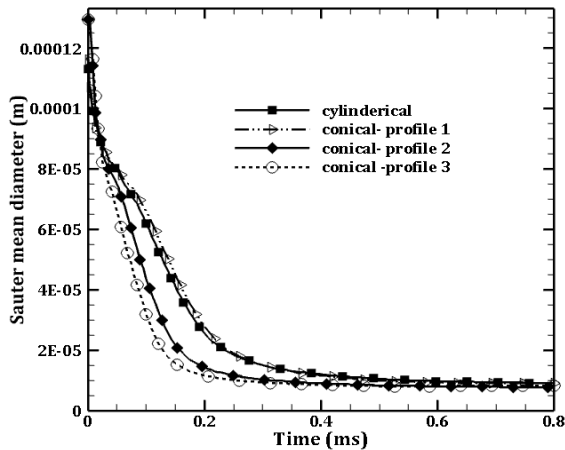
در ادامه به منظور بررسی تأثیر تغییر هم‌زمان هندسه و پروفیل بالابری سوزن بر روی افشانه سوخت، به مقایسه طول نفوذ و قطر متوسط ذرات که از مهم‌ترین مشخصه‌های افشانه سوخت می‌باشند در هر قسمت پرداخته شده است. در شکل ۱۲ نمودار طول نفوذ افشانه در مدت‌زمان پاشش یکسان در هر مورد آورده شده است. با توجه به این شکل طول نفوذ افشانه سوخت دیزل در نازل مخروطی همگرا نسبت به نازل استوانه‌ای بیشتر می‌باشد. دلیل این امر بیشتر بودن قطر و شعاع منحنی در ورودی نازل مخروطی همگرا می‌باشد که منجر به کاهش تلفات اصطکاکی و افزایش سرعت افشانه در خروجی نازل مخروطی شده است.

این امر کمتر بودن قطر و شعاع منحنی در ورودی نازل استوانه‌ای نسبت به نازل مخروطی همگرا می‌باشد. با کاهش قطر و شعاع منحنی ورودی، افت فشار درون نازل افزایش یافته و لذا کاویتاسیون با شدت بیشتری درون آن رخ می‌دهد. با تغییر پروفیل بالابری سوزن، شدت وقوع کاویتاسیون تغییر می‌کند. شیب نمودار بالابری سوزن در باز شدن و بسته شدن آن و همچنین میزان باز بودن سوزن در شدت تغییر فاز سوخت مایع تأثیرگذار هستند. با توجه به شکل ۱۰ با افزایش مدت‌زمان باز بودن سوزن و همچنین افزایش شیب نمودار بالابری در لحظات باز و بسته شدن سوزن، فشار جریان مایع درون نازل انژکتور با پروفیل‌های متفاوت نسبت به حالت پایه به مقدار نسبتاً کمی افزایش یافته و لذا پدیده کاویتاسیون با شدت کمتری درون نازل رخ می‌دهد.



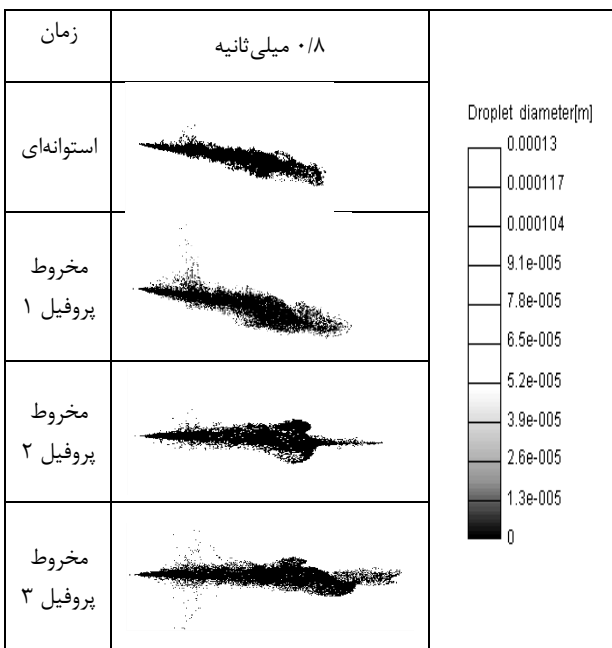
شکل (۱۰): نمودار کسر حجمی فاز مایع بر حسب زمان برای انژکتور با هندسه‌ها و پروفیل‌های بالابری مختلف

در شکل ۱۱ توزیع کسر حجمی فاز مایع در یک صفحه مرکزی مربوط به ورودی و خروجی نازل در مدت‌زمان انتهایی پاشش آورده شده است. با توجه به این شکل در نازل استوانه‌ای شاهد نواحی کمتری از فاز مایع نسبت به نازل مخروطی همگرا با پروفیل‌های بالابری مختلف هستیم و دلیل آن افت فشار بیشتر درون نازل و وقوع پدیده کاویتاسیون با شدت بیشتر در آن می‌باشد که در نتیجه آن میزان کسر حجمی فاز مایع کاهش یافته است.



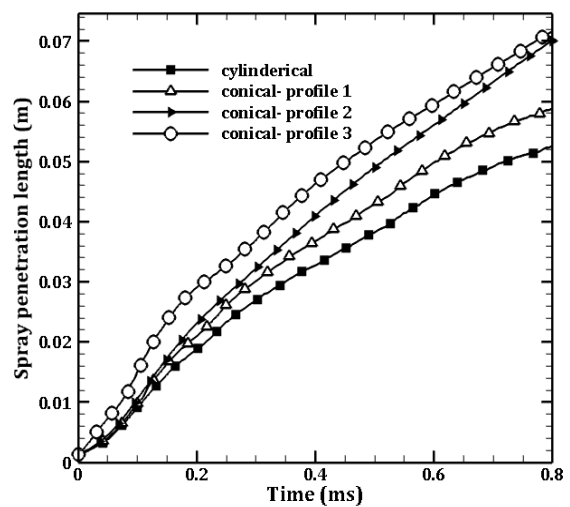
شکل (۱۳): قطر متوسط ذرات برای هندسه‌ها و پروفیل‌های مختلف نازل و سوزن

ساختار افشانه محاسبه شده در مدت زمان انتهایی پاشش در شکل ۱۴ آورده شده است. همچنین در شکل ۱۵ نمودار سرعت سیال در خروجی نازل و در شکل ۱۶ نمودار نرخ دبی جرمی خروجی از نازل انژکتور برای تمامی حالت‌های موجود در مدت زمان تزریق سوخت آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها با کاهش تلفات و همچنین افزایش سرعت در خروجی نازل، میزان دبی جرمی خروجی از آن نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۱۴): ساختار افشانه محاسبه شده در هر حالت در مدت زمان انتهایی پاشش

با افزایش سرعت در خروجی نازل، طول نفوذ افشانه نیز افزایش می‌یابد. تغییر پروفیل بالابری سوزن نیز منجر به تغییر در مشخصه‌های افشانه سوخت گردیده است. با افزایش شیب نمودار بالابری سوزن در زمان باز و بسته شدن و همچنین افزایش مدت زمان بازبودن سوزن انژکتور، تلفات اصطکاکی درون نازل مخروطی همگرا کاهش یافته و سرعت در خروجی نازل افزایش یافته است و در نتیجه منجر به افزایش طول نفوذ افشانه سوخت گردیده است. در شکل ۱۳ نمودار قطر متوسط ذرات در مدت زمان پاشش یکسان در هر حالت نشان داده شده است. با توجه به این نمودار قطر متوسط ذرات برای دو نازل استوانه‌ای و مخروطی همگرا دارای پروفیل بالابری سوزن یکسان تقریباً برابر است. در نازل استوانه‌ای، وقوع پدیده کاویتاسیون درون نازل و در نازل مخروطی همگرا، افزایش سرعت در خروجی نازل منجر به بهبود فروپاشی افشانه سوخت گردیده و در نتیجه قطر ذرات کاهش می‌یابد. تغییر پروفیل بالابری سوزن انژکتور منجر به افزایش سرعت در خروجی نازل گردیده است. با افزایش سرعت در خروجی نازل، سرعت نسبی بین ذرات افشانه و هوای فشرده درون محفظه احتراق افزایش می‌یابد و در نتیجه نیروی آیرودینامیکی پسا که منجر به فروپاشی افشانه سوخت می‌گردد، افزایش یافته و در نتیجه قطر ذرات کاهش می‌یابد. مقادیر بالای سرعت در خروجی نازل می‌تواند منجر به بهبود کیفیت اتمیزاسیون سوخت گردد.



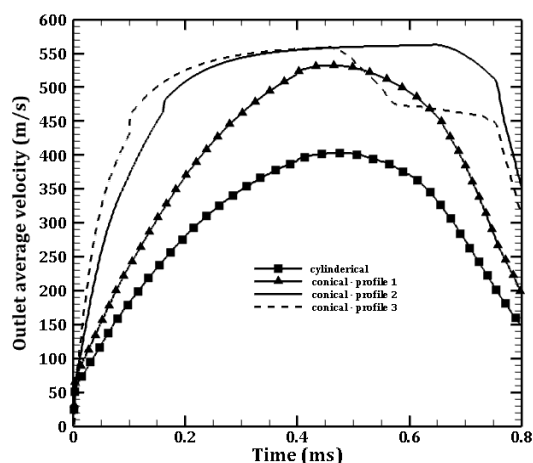
شکل (۱۲): طول نفوذ افشانه برای هندسه‌ها و پروفیل‌های مختلف نازل و سوزن

درون نازل صورت گرفته است که علت آن تغییر پروفیل بالابری سوزن می‌باشد. در ادامه در بررسی رفتار افشانه سوخت دیزل دو مشخصه مهم طول نفوذ و قطر متوسط ذرات بررسی شدند. در بررسی مشخصه طول نفوذ، نتایج نشان‌دهنده افزایش طول نفوذ افشانه در مرحله دوم نسبت به مرحله اول می‌باشند که دلیل آن افزایش سرعت افشانه سوخت در خروجی نازل مخروطی همگرا به علت تلفات اصطکاکی کمتر در سوراخ نازل و تغییر پروفیل بالابری سوزن می‌باشد. همچنین در بررسی مشخصه قطر متوسط ذرات نتایج نشان‌دهنده کاهش این مقدار در مرحله دوم نسبت به مرحله اول می‌باشند.

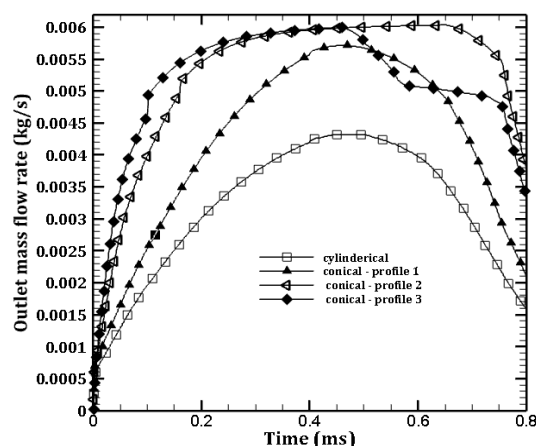
بهبود مشخصات افشانه سوخت می‌تواند منجر به بهبود عملکرد موتور دیزل مانند افزایش توان، گشتاور تولیدی و راندمان موتور و همچنین کاهش مصرف سوخت و آلایندگی‌های ناشی از احتراق آن گردد. لازم به ذکر است که طول نفوذ افشانه سوخت به منظور ایجاد مخلوط سوخت و هوای بهتر و جلوگیری از برخورد آن با دیواره محفظه احتراق بایستی متناسب با هندسه موتور باشد؛ زیرا در صورت برخورد آن با دیواره محفظه احتراق، میزان هیدروکربن‌های نسوخته افزایش می‌یابد؛ بنابراین، مشخصه‌های افشانه سوخت به منظور افزایش بازده احتراق از طریق تغییر هندسه نازل و پروفیل بالابری سوزن قابل کنترل می‌باشند.

#### ۶- مراجع

1. Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, Inc., New York, 1998.
2. Salvador, F.J., Martínez-López, J., Caballer, M., and De Alfonso, C. "Study of the influence of the needle lift on the internal flow and cavitation phenomenon in diesel injector nozzles by CFD using RANS methods", *Energ. Convers. Manage*, Vol. 66, No. 2, pp. 246-256, 2013.
3. Yao, C., Cheung, C., Cheng, C., and Wang, Y. "Reduction of smoke and NOx from diesel engines using a diesel/methanol compound combustion system", *Energ. Fuels*, Vol. 21, No. 2, pp. 686-691, 2007.
4. Yao, C., Geng, P., Yin, Z., Hu, J., Chen, D., and Ju, Y. "Impacts of nozzle geometry on spray combustion of high pressure common rail injectors in a constant volume combustion chamber", *Fuel*, Vol. 179, No. 1, pp. 235-245, 2016.



شکل (۱۵): سرعت متوسط جریان در خروجی نازل انژکتور برای هندسه‌ها و پروفیل‌های مختلف نازل و سوزن



شکل (۱۶): نرخ دبی جرمی خروجی از نازل انژکتور برای هندسه‌ها و پروفیل‌های مختلف نازل و سوزن

#### ۶- نتیجه‌گیری

مشخصات افشانه سوخت یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تشکیل آلایندگی‌های خروجی و عملکرد موتور دیزل می‌باشند. در مقاله حاضر، در دو مرحله به بررسی تأثیر تغییر هندسه نازل انژکتور و پروفیل بالابری سوزن بر روی جریان داخلی سوخت دیزل و رفتار هیدرودینامیکی افشانه آن پرداخته شده است. در مرحله اول هندسه نازل استوانه‌ای را به مخروطی همگرا تغییر داده و در مرحله دوم از دو پروفیل بالابری متفاوت در نازل مخروطی همگرا استفاده شده است. در بررسی جریان داخل نازل برای هندسه‌ها و پروفیل‌های بالابری مختلف سوزن مشخص گردید که در مرحله دوم پدیده کاویتاسیون با شدت کمتری

16. Hyun, K.S., and Chang, S.L. "Effects of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics", *Int. J. Heat. Fluid. FL*, Vol. 29, pp. 1001–1009, 2008.
17. Desantes, J.M., Payri, R., Salvador, F.J., and De la Morena, J., "Influence of cavitation phenomenon on primary break-up and spray behavior at stationary conditions", *Fuel*, Vol. 89, pp. 3033–3041, 2010.
18. Shervani-Tabar, M.T., Parsa, S., and Ghorbani, M. "Numerical study on the effect of the cavitation phenomenon on the characteristics of fuel spray", *Math. Comput. Model*, Vol. 56, No. 5, pp. 105-117, 2012.
19. Payri, R., Gimeno, J., Viera, J.P., and Plazas, A.H. "Needle lift profile influence on the vapor phase penetration for a prototype diesel direct acting piezoelectric injector", *Fuel*, Vol. 113, pp. 257–265, 2013.
20. Fujimoto, H., Mishikori, T., Tsumakoto, T., and Senda, J. "Modeling of atomization and vaporization process in flash boiling spray", *ICLASS-94 Conference, FRANCE*, 1994.
21. Avl List GmbH. *AVL Fire v. 2013, CFD solver, Eulerian multiphase*, 2013.
22. Edelbauer, W. "Coupling of 3D Eulerian and Lagrangian Spray Approaches in Industrial Combustion Engine Simulations", *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 190-200, 2014.
23. Avl List GmbH. "AVL Fire v. 2013, CFD solver, Spray", 2013.
24. Brusiani, F., Falfari, S., and Pelloni, P. "Influence of the Diesel injector hole geometry on the flow conditions emerging from the nozzle", *68<sup>th</sup> Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013, Energy Procedia*, Vol. 45, pp. 749 – 758, 2014.
25. Battistoni, M., and Grimaldi, C.N. "Numerical analysis of injector flow and spray characteristics from diesel injectors using fossil and biodiesel fuels", *Appl. Energy*, Vol. 97, No. 1, pp. 656-666, 2012 .
26. Perry, R.H., and Green, D.W. "Perry's chemical engineer's handbook", McGraw-Hill, 1997.
27. Postrioti, L., Grimaldi, C.N., Ceccobello, M., and Di Gioia, R. "Diesel common rail injection system behavior with different fuels", *SAE Technical paper 2004-01-0029*, 2004.
5. Som, S., Aggarwal, SK., El-Hannouny, EM., and Longman, DE., "Investigation of nozzle flow and cavitation characteristics in a diesel injector", *J. Eng. Gas. Turb. Power*, Vol. 132, pp. 1–12, 2010.
6. Som, S., Longman, DE., Ramirez, AI., and Aggarwal, SK. "Influence of nozzle orifice geometry and fuel properties on flow and cavitation characteristics of a diesel injector", In: *Lejda Kazimierz, editor, Fuel injection in automotive engineering*, InTech, ISBN: 978-953-51-0528-2, 2012.
7. Soteriou, C., Andrews, R., and Smith, M. "Direct injection diesel sprays and the effect of cavitation and hydraulic flip on atomization", *SAE Technical Paper 950080*, 1995.
8. Suh, HK., and Lee, CS. "Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics", *Int. J. Heat. Fluid. FL*, Vol. 29, pp.1001–1009, 2008.
9. Payri, F., Bermúdez, V., Payri, R., and Salvador, F.J. "The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles", *Fuel*, Vol. 83, pp. 419–431, 2004.
10. Payri, R., Salvador, F.J., Gimeno, J., and dela Morena, J. "Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing bubbles in a liquid pressurized chamber", *Int. J. Heat. Fluid. FL*, Vol. 30, pp. 768–777, 2009.
11. Sohrabi, S., Zandi, A., and Shams, M. "Numerical investigation of the effect of the number of injector holes on the flow inside the nozzle", *8<sup>th</sup> International Conference on Internal Combustion Engines & Oil, Tehran, IRAN*, 2013. (In Persian )
12. Mohammadi, H., Jabbarzadeh, P., Jabbarzadeh, M. and Shervani-Tabar, M.T. "Numerical investigation on the hydrodynamics of the internal flow and spray behavior of diesel fuel in a conical nozzle orifice with the spiral rifling like guides", *Fuel*, Vol. 196, No. 5, pp. 419-430, 2017.
13. Bergstrand, P. "The effects of orifice shape on diesel combustion", *SAE Technical Paper*, Vol. 13, No. 3, pp. 106-116, 2004.
14. Som, S., Longman, DE., Ramirez, AI., and Aggarwal, SK. "A comparison of injector flow and spray characteristics of biodiesel with petrodiesel", *Fuel*, Vol.89, pp. 4014–4024, 2010.
15. Jabbarzadeh, P., Jabbarzadeh, M., and Shervanitabar, M.T. "Numerical study on the diesel fuel penetration length in the cylindrical and conical nozzles", *8<sup>th</sup> International Conference on Internal Combustion Engines & Oil, Tehran, IRAN*, 2013. (In Persian )