



# Numerical Investigation of the Effect of Changing the Geometry and Creating Swirly Flow Inside the Injector Nozzle on the Engine Performance

Amir Hamzeh Farajollahi<sup>1</sup>, Reza Firuzi<sup>2</sup>, Mohammad Reza Salimi<sup>3\*</sup> and Mohsen Rostami<sup>4</sup>

1. Assistant Professor, Department of Aerospace Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran
2. M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Emam Khomeini International University, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran
4. PhD Student, Department of Aerospace Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran

\*Corresponding Author's E-mail: mohammadsalimi@ari.ac.ir

## Abstract

In this study, the effects of geometry and spiral rifling like guides inside the injection nozzle on the performance of an engine are investigated, using AVL Fire software. To do so, firstly injectors with different nozzle geometries and their resultant spray patterns were simulated. Numerical results of this step show that creation of spiral rifling like guides inside the nozzle increases the spray cone angle and improves fuel atomization quality. In the next step, effects of using forgoing nozzle geometries on sample engine characteristics were studied and the related results compared to those of common cylindrical injectors. Numerical results of this step clearly show the superior performance of nozzles with spiral rifling like guides. In this case, SFC reduces up to 32 percent while the engine power rises more than 63 percent. Also the amount of pollutants like NOx reduces 12 percent with respect to common cylindrical nozzles.

**Keywords:** Injector nozzle geometry, Swirly flow, Engine performance, Pollutants



## COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## How to cite this article:

A. H. Farajollahi, R. Firuzi, M. R. Salimi and M. Rostami, "Numerical study on the effects of nozzle geometry and creating swirly flow inside the injector nozzle on the performance of an engine," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 107-121, 2022 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1303>.



# بررسی عددی تأثیر تغییر هندسه و ایجاد جریان چرخشی درون نازل انژکتور بر روی عملکرد یک موتور

امیر حمزه فرج‌الهی<sup>۱</sup><sup>ID</sup>, رضا فیروزی<sup>۲</sup><sup>ID</sup>, محمدرضا سلیمی<sup>۳\*</sup><sup>ID</sup> و محسن رستمی<sup>۴</sup><sup>ID</sup>

۱- گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

\*ایمیل نویسنده مخاطب: mohammadsalimi@ari.ac.ir

## چکیده

در این مقاله، تأثیر شکل هندسی و ایجاد خان درون نازل یک انژکتور سوخت روی عملکرد موتور و آلاینده‌های ناشی از احتراق با استفاده از نرم افزار فایر بررسی شده است. در این راستا ابتدا افسانه حاصل از انژکتور با هندسه‌های مختلف نازل شبیه‌سازی شده است. نتایج عددی حاصل نشان می‌دهند که ایجاد خان درون نازل منجر به افزایش زاویه مخروطی افسانه و بهبود کیفیت اتمیزاسیون سوخت می‌گردد. در ادامه، احتراق داخل موتور همراه با انژکتورهای اصلاح شده شبیه‌سازی و نتایج با داده‌های موجود مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که نازل دارای خان نسبت به سایر هندسه‌ها دارای عملکرد مناسب‌تری می‌باشد. به این شکل که مصرف سوخت ویژه نسبت به انژکتور استوانه‌ای حدود ۳۲ درصد کاهش یافته و همچنین توان تولیدی بیشتر از ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای نیتروژن به مقدار ۱۲ درصد کاهش می‌یابند.

**واژه‌های کلیدی:** هندسه نازل انژکتور، جریان چرخشی، عملکرد موتور، آلاینده‌ها

سوخت‌های فسیلی تأمین شود. تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی توسط فرآیند احتراق آن‌ها صورت می‌گیرد. با توجه به تجدید ناپذیر بودن منابع سوخت‌های فسیلی و همچنین آلاینده‌گی ناشی از آن‌ها و وضع قوانین سختگیرانه، بهبود فرآیند احتراق به‌منظور کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی ناشی از انواع موتورها (هوایی و زمینی) الزامی است. استفاده از پروفیل‌های مختلف پاشش، سوخت‌های جایگزین و ترکیبی، به کارگیری فشارهای پاشش بالا، پاشش‌های چندمرحله‌ای، بهینه‌سازی زمان بندی پاشش، تغییر مکان و زاویه قرارگیری انژکتور، تغییر پارامترهای هندسی محفوظه احتراق، به کارگیری گازهای خروجی بازخورانی شده، ایجاد جریان چرخشی حول محور سیلندر و محور عمود بر آن، بهبود پدیده اتمیزاسیون سوخت و ایجاد مخلوط سوخت

## علائم و اختصارات

f	بردار نیروی حجمی
$\tau$	بردار تنش بر بشی
$T^t$	بردار تنش رینولدزی
M	بیانگر اندرکنش مومنتوم بین حالتها
p	شار استاتیکی

## مقدمه

تأمین انرژی یکی از اساسی‌ترین نیازهای بشر در طول تاریخ می‌باشد. این نیاز می‌تواند از طریق منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و یا

۱. استادیار

۲. دانشجوی کارشناس ارشد

۳. دانشجوی دکتری



## COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌های CO و HC به مقدار ۱۷/۶۷ درصد و ۱۷/۱۸ درصد می‌شود. در حالی که آلاینده‌های NO<sub>x</sub> و CO<sub>2</sub> به مقدار ۴۲/۸۵ درصد و ۱۴/۱۳ درصد افزایش داشتند [۵].

حسین پور و همکاران با استفاده از کد KIVIAII تاثیر پارامترهای پاشش سوخت از جمله زمان بندی پاشش، فشار پاشش و استفاده از خنک کن میانی را بر روی عملکرد و تولید آلاینده‌ها در یک موتور پاشش مستقیم و تاثیر حالت خاصی از پاشش چند مرحله‌ای بر روی تولید آلاینده اکسیدهای نیتروژن مورد بررسی قرار دادند و در این حالت آلاینده اکسیدهای نیتروژن تا ۶ درصد کاهش یافت [۶].

امی و همکاران در تحقیق خود به بررسی چگونگی کاهش آلاینده‌ای دوده و مونوکسید نیتروژن در پاشش چند مرحله‌ای سوخت به عنوان یک راهکار مؤثر در کنترل آلاینده‌ی موتور دیزل MT\_4.244 پرداخته‌اند. آن‌ها مقدار سوخت در هر پالس پاشش و فاصله زمانی بین دو پالس را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها برای بررسی عددی و شبیه‌سازی فرآیند احتراق موتور از مدل آشفتگی-E-K برای جریان متلاطم داخل محفظه سیلندر، مدل احتراق ماتگونس- هرتاگر، مدل زلدوویج توسعه یافته برای محاسبه مونوکسید نیتروژن و مدل هیروپیاسو برای محاسبه دوده استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل شده حاکی از آن است که حالت بهینه پاشش چند مرحله‌ای برای موتور، حالت ۲۵(۳۵) ۷۵ است که در آن مونوکسید کربن ۱۱ درصد و دوده ۳۳ درصد کاهش یافته‌اند [۷].

فرج‌الهی و فیروزی به بررسی تاثیر ایجاد شیار درون اریفیس انژکتور دیزل و افزایش فشار تزریق سوخت بر روی شدت وقوع کاویتاپسیون و خصوصیات افسانه سوخت پرداختند. نتایج عددی نشان می‌دهند که استفاده از شیار منجر به افزایش زاویه مخروطی افسانه و کاهش طول نفوذ و قطر متوسط ذرات می‌گردد. همچنین افزایش فشار تزریق منجر به افزایش طول نفوذ افسانه و قطر متوسط ذرات می‌شود [۸].

قبادیان و همکاران به بهینه‌سازی نسبت EGR، سوخت بیودیزل و شرایط کاری یک موتور دیزل تک سیلندر چهارزمانه با روش RSM پرداختند. در این بررسی، با استفاده از سامانه EGR، آلاینده اکسیدهای نیتروژن حداقل تا ۶۳/۷ درصد برای سوخت B10 و نسبت ۳۰ EGR درصد کاهش یافت. همچنین استفاده همزمان از سوخت بیودیزل و سامانه EGR موجب کاهش آلاینده CO در دور موتورهای مختلف می‌شود [۹]. امروزه توجه به انژکتورهای گریز از مرکز در مقایسه با انژکتورهای جریان مستقیم در موتورهای سوخت مایع رو به افزایش می‌باشد. دلیل این موضوع کیفیت بهتر اتمیزاسیون و قابلیت کنترل روی چتر پاشش در این نوع انژکتور می‌باشد. با توجه به اینکه انژکتور طراحی شده در تحقیق حاضر رفتاری مشابه با انژکتورهای گریز از دارد، انتظار می‌رود که همان کارایی را در موتورهای سوخت مایع داشته باشد. با این تفاوت که ساخت انژکتور معرفی شده در این تحقیق ساده‌تر می‌باشد.

و هوای بهتر از راههای بهینه‌سازی و بهبود احتراق سوخت، کاهش آلاینده‌های تولیدی و افزایش راندمان در موتورها می‌باشد. در مطالعات گذشته تاثیر عوامل اشاره شده فوق به منظور بررسی مشخصات افسانه سوخت و بهبود احتراق در موتورها به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

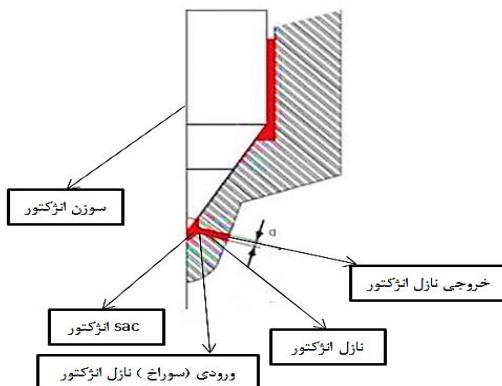
شروعی تبار و همکاران به بررسی اثر تابع پاشش سوخت بر روی عملکرد موتور به صورت عددی پرداختند. بدین منظور شش تابع پاشش سوخت مختلف انتخاب گردید. نتایج نشان داد که با استفاده از توابع پاششی مناسب سوخت، توان موتور افزایش و مقدار آلاینده‌های تولیدی آن کاهش می‌یابد. پاشش سوخت شبه مثلى در مقایسه با نرخ پاشش ثابت دارای عملکرد مناسب‌تری می‌باشد و مصرف سوخت ویژه در آن تا ۰/۴۳ کیلوگرم بر کیلوژول و ۱۴ درصد کاهش و مقدار توان تولیدی آن در این حالت تا ۲۷/۵ درصد افزایش افزایش می‌یابد. همچنین در این تابع، مقدار آلاینده اکسید نیتروژن به میزان ۳۱/۵ درصد افزایش می‌یابد [۱].

محمدی و همکاران از شیار درون اریفیس انژکتور استفاده کردند. نتایج نشان داد که زاویه مخروطی افسانه افزایش ولی طول نفوذ آن کاهش می‌یابد [۲].

میشل و کارلو به بررسی جریان درون نازل و مشخصات افسانه برای سوخت‌های دیزل و بیودیزل در یک انژکتور به صورت عددی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی جریان درون انژکتور نشان داد که پدیده کاویتاپسیون برای سوخت دیزل در نواحی نسبتاً بیشتری نسبت به سوخت بیودیزل درون نازل انژکتور رخ می‌دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی افسانه نشان داد که سوخت دیزل طول نفوذ افسانه بیشتر و قطر متوسط ساتر کمتری نسبت به سوخت بیودیزل دارد [۳].

احمدی و همکاران به بررسی تاثیر جایگزینی مقادیر مختلف هیدروژن به جای دیزل بر عملکرد و آلاینده‌ی موتور پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که جایگزینی هیدروژن موجب تاخیر در شروع احتراق و رشد نرخ افزایش فشار و افزایش حرارت آزادشده خواهد شد ولی این افزایش فشار منجر به پدیده کوبش نخواهد گردید. همچنین در بهترین حالت جایگزینی هیدروژن به جای دیزل، آلاینده‌های اکسید نیتروژن، دی‌اکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته، دوده و مونوکسید کربن به ترتیب به میزان ۸، ۱۴، ۵۴، ۱۴ و ۷۰ درصد کاهش می‌یابند [۴].

باشکور و همکاران مطالعه آزمایشگاهی در مورد تأثیر نسبت تراکم روی مشخصه‌های احتراقی، آلاینده‌ها و عملکرد موتور دیزل در حالت دوگانه سوز با سوخت زیست گاز- زیست دیزل انجام دادند. موتور به ازای نسبت‌های تراکم ۱۷/۵، ۱۷/۵، ۱۸ و لحظه شروع پاشش ثابت ۲۳ درجه قبل از نقطه مرگ بالا تحت بارگذاری‌های مختلف قرار گرفت. آن‌ها دریافتند نسبت تراکم قوی در حالت دوگانه، منجر به بهبود



شکل ۱- هندسه و نامگذاری قسمت‌های مختلف انژکتور

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

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

### معادله بقای مومنتوم

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

که در آن  $f$  بردار نیروی حجمی شامل نیروی جاذبه و اینرسی است.  $\bar{\tau}$  بردار تنفس برشی،  $T'$  بردار تنفس رینولوزی،  $M$  بینگر اندرکنش مومنتوم بین حالتها و  $p$  فشار استاتیکی است.

معادله انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن

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

### معادلات حاکم بر شبیه‌سازی اندرکنش بین حالتی

مهم‌ترین تفاوت بین جریان تک‌فازی و چندفازی، اندرکنش بین حالتی کیمیت‌های جرم، مومنتوم و آنتالپی است. با توجه به فرض هم‌دما بودن از آوردن معادلات حاکم بر اندرکنش بین حالتی آنتالپی صرف‌نظر شده است.

### تبادل بین حالتی جرم

تبادل جرم بین دو حالت مایع و بخار با مدل کاویتاسیونی غیرخطی مدل شده است. معادله حاکم به صورت رابطه (۵) است:

$$\Gamma_c = \rho_d N^{-1} 4\pi R^2 \dot{R} = -\Gamma_d \quad (5)$$

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

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مطالعات زیادی بر روی کاهش آلایندگی موتور و بهبود عملکرد آن انجام شده است ولی تاکنون تأثیر ترکیب تغییر هندسه نازل و ایجاد خان درون آن بر روی عملکرد موتور و آلایندگی‌های ناشی از آن انجام نشده است. هدف و نوآوری این مقاله، بررسی تأثیر تغییر هندسه و ایجاد جریان چرخشی درون نازل انژکتور CRII ساخت شرکت بوش آلمان بر روی عملکرد موتور و آلایندگی ناشی از آن است. ابتدا به مدل سازی جریان دو فازی درون انژکتور و افشهای حاصل از آن پرداخته شده و سپس در ادامه به منظور بررسی تأثیر تغییرات ایجاد شده بر عملکرد موتور، به مدل سازی آن پرداخته شده است.

### شبیه‌سازی انژکتور و افشهای

مدل اوبل-اوبل برای شبیه‌سازی جریان چندفازی درون انژکتور به کاربرده شده است. نتایج حاصل از محاسبات جریان داخل انژکتور در مقطع خروجی نازل و در شبیه‌سازی افشهای و موتور به عنوان داده‌های ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل استفاده شده در شبیه‌سازی افشهای، مدل اوبل-لاگرانژ می‌باشد. انژکتور مورد نظر از نوع نازل‌های Mini-sac می‌باشد. هندسه انژکتور در آن سوراخ‌ها با فاصله یکسانی از هم قرار گرفته‌اند، می‌باشد. هندسه انژکتور مورد نظر و نام‌گذاری قسمت‌های مختلف آن در شکل ۱ نشان داده شده است. ایجاد هندسه با کمک نرم‌افزار سالیدورکز صورت گرفته است. به منظور افزایش دقت و کاهش مدت زمان محاسبات عددی با توجه به تقارن هندسی، در انژکتور با نازل‌های استوانه‌ای و مخروطی همگرا، شبیه‌سازی تنها یک دهم (قطع با زاویه ۳۶ درجه) و در انژکتور با نازل مخروطی همگرا دارای خان، شبیه‌سازی تنها یک پنجم (قطع با زاویه ۷۲ درجه) از کل هندسه انژکتور صورت گرفته است. در این مقاله برای شبیه‌سازی عددی از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی ابیوال فایر<sup>۵</sup> که برپایه روش حل عددی حجم محدود می‌باشد، استفاده شده است.

### معادلات حاکم بر شبیه‌سازی انژکتور

تغییر فاز یک سیال در دمای ثابت از حالت مایع به بخار به علت دارابودن فشار پایین‌تر از فشار بخار، کاویتاسیون یا حفره‌زایی نام دارد. در این نوع انژکتورها کاویتاسیون معمولاً در ورودی سوراخ نازل رخ می‌دهد. لذا در شبیه‌سازی انژکتور با جریان دوفازی مواجه هستیم معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم دل توربولانس می‌باشند. با توجه به فرض هم‌دما بودن، از آوردن معادله انرژی صرف نظر شده است.

### معادله بقای جرم

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

### 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 می باشد و برابر است با:

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

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

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

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

در معادله (۱۲)، تمامی نیروهای سطحی و بدنی روی قطره افشاره لحاظ شده اند. از آنجاکه بزرگی نیروهای فشاری و سایر نیروها در مقایسه با نیروهای پسا و گرانشی قابل اغماض است، فقط نیروی پسا روی قطره افشاره (شامل مولفه های فشار و ویسکوز) برای فروپاشی اولیه و ثانویه افشاره سوخت مایع لحاظ شده است [۲].

شتانه قطره در محیط گازی به صورت زیر است:

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

زیر مدل های استفاده شده شامل مدل دو کووییج<sup>۷</sup> در تبخیر، مدل ارور که در بر هم 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:

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

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

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

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

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

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{\Delta p}{\rho_c} - R \ddot{R} \right) \quad (6)$$

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

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

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

$N_0'''$  چگالی عددی اولیه حباب می باشد که به مشخصات فاز مایع وابسته است و برای سوخت رایج مورد استفاده برابر  $10^{12}$  می باشد [۱۰].

### تبدال بین حالتی مومنتوم

تبدال مومنتوم بین دو حالت مایع و بخار با در نظر گرفتن تاثیر نیروهای پسا و پخش آشفتگی به صورت زیر محاسبه می شود:

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

$C_{TD}$  ضریب پسا،  $v_r$  سرعت نسبی بین دو حالت مایع و بخار، ضریب پخش آشفتگی و  $K$  انرژی جنبشی آشفتگی 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 [۱۱]:

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

عدد رینولدز حباب نیز به صورت زیر تعریف می شود:

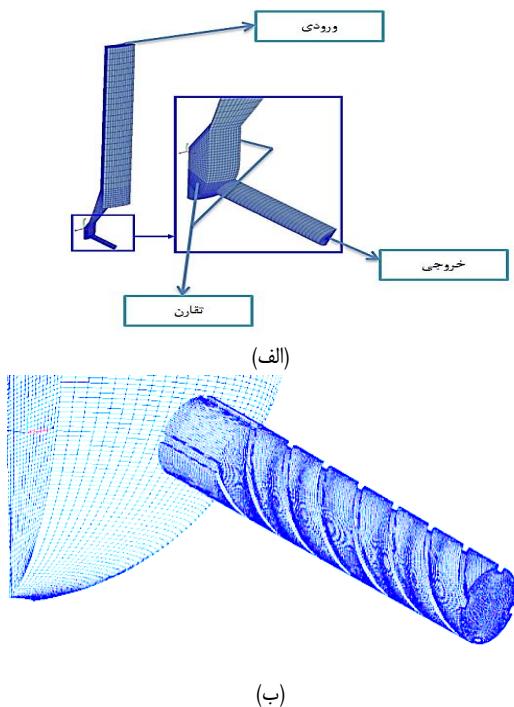
$$\text{Re}_b = \frac{|v_r| D_b}{v_c} \quad (11)$$

### معادلات حاکم بر افشاره

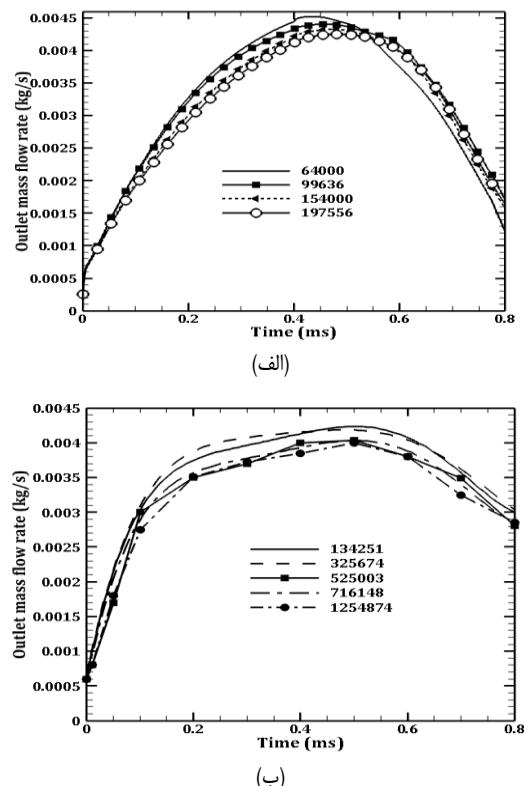
با توجه به وقوع پدیده کاویتاسیون درون نازل، در شبیه سازی افشاره با جریان دوفازی روبرو هستیم. در رابطه با فاز مایع، تمامی محاسبات مربوط به افشاره بر پایه روش آماری قطره گسسته<sup>۱۰</sup> انجام می گیرد. این روش با حل کردن معادلات دیفرانسیل معمولی برای مسیر، مومنتوم، انتقال جرم و حرارت قطرات واحد انجام می گیرد [۳]. معادلات حاکم در ادامه ذکر شده اند:

6. Discrete Droplet Method

7. Dukowicz1



شکل (۲): شبکه بندی اثرکتور، (الف) نازل معمولی، (ب) نازل دارای خان



شکل ۳- دبی جرمی خروجی نازل برای مقادیر مختلف سلول، (الف) نازل معمولی، (ب) نازل دارای خان

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

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

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

## مدل محاسباتی

مدل محاسباتی در ادامه شرح داده شده است.

## انژکتور

انژکتور مورد استفاده در مطالعه حاضر، انژکتوراز نوع Mini-sac، پنج سوراخ که در آن سوراخ‌ها با فاصله یکسانی از هم قرار گرفته‌اند، می‌باشد (شکل ۱). به منظور بررسی تاثیر هندسه نازل بر عملکرد موتور، نازل استوانه‌ای را به مخروطی همگرا و اگرا تغییر داده و به منظور ایجاد جریان چرخشی افشاره سوخت، از ۴ عدد خان راستگرد دارای ارتفاع ۰/۰۴ میلی متر و ۰/۰۱ میلی متر درون نازل مخروطی همگرا استفاده شده است. تمامی نازل‌ها دارای طول یکسان ۷/۰ میلی متر و قطر خروجی یکسان ۱۳/۰ میلی متر می‌باشند. نازل مخروطی همگرا و اگرا به ترتیب دارای قطر ورودی ۱۴۳/۰ و ۱۱۷/۰ میلی متر می‌باشند. در اریفیس مخروطی همگرا یک نازل ضریب  $k$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

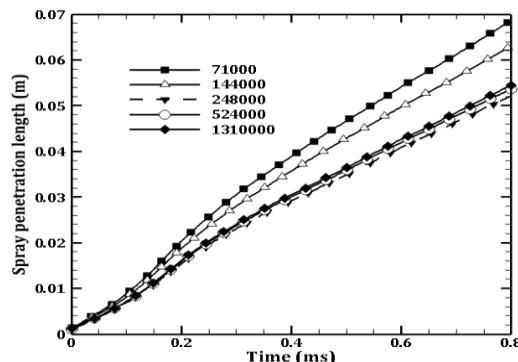
که در آن،  $D_{in}$  قطر ورودی و  $D_{out}$  قطر خروجی سطح مقطع دایروی نازل انژکتور می‌باشد. معمولاً در کاربردهای مربوط به صنعت موتور و پیشرانش، این ضریب بین اعداد ۱/۱ و ۲ می‌باشد [۱۲]. ضریب  $k$  در نازل مخروطی همگرا مورد استفاده در این مقاله برابر با ۱/۳ می‌باشد. شبکه‌بندی انژکتور به صورت شکل ۲ است که با کمک نرم‌افزار ای ال فایر انجام شده است.

برای بررسی استقلال حل از شبکه، به مطالعه تاثیر اندازه شبکه بر دبی جرمی جریان سوخت خروجی از افشاره پرداخته شده است. نتایج حاصل از بررسی استقلال حل از شبکه در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به این شکل، در نازل‌های استوانه‌ای و مخروطی در تعداد سلول ۱۵۴۰۰۰ و در نازل مخروطی همگرا دارای خان در تعداد سلول ۷۱۶۱۴۸ 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. خواص سوخت مورد استفاده در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد در جدول ۱ آورده شده است [۱۳-۱۵].

سوخت از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است. شبیه‌سازی افشاره حاصل با توجه به شکل ۶ در تعداد سلول ۵۲۴۰۰۰ صورت گرفته است. سیال مورد استفاده هوای فشرده دارای فشار ۱۰ بار و دمای ۳۰۰ کلوین می‌باشد. مدل آشفتگی مورد استفاده k-zeta-f است. اسکیم‌های گسسته‌سازی برای پیوستگی از نوع تفاضل مرکزی و برای مومنتوم، توربولانس و انرژی از نوع بالادست مرتبه دوم می‌باشد. همچنین برای کوپل فشار-مومنتوم الگوریتم سیمپل به کار برده شده است.



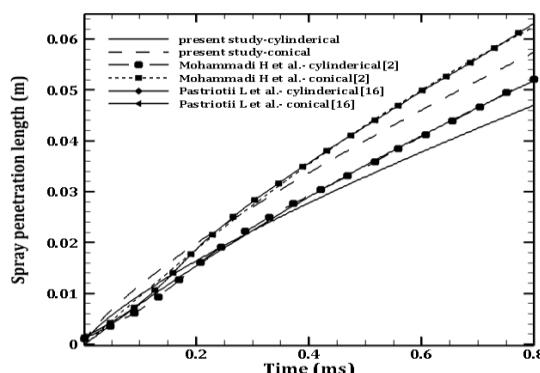
شکل ۵- محفظه احتراق استوانه‌ای حجم ثابت



شکل ۶- طول نفوذ افشاره برای مقادیر متفاوت سلول

## اعتبارسنجی روش عددی

به منظور بررسی دقیق نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی انژکتور و افشاره حاصل آن، به مقایسه داده‌های عددی مشخصه‌ی طول نفوذ نازل استوانه‌ای و مخروطی همگرا با نتایج عددی و تجربی موجود پرداخته شده است [۱۶, ۲]. با توجه به شکل ۷ تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

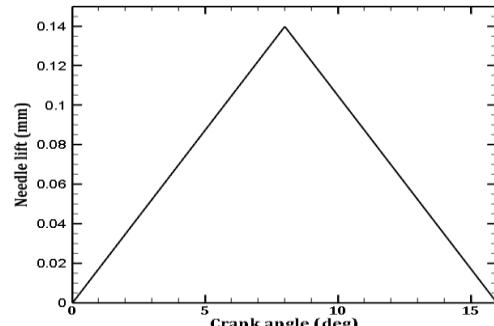


شکل ۷- اعتبارسنجی نتایج عددی طول نفوذ افشاره با مقادیر عددی و تجربی

جدول ۱- مشخصات سوخت مورد استفاده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

فشار بخار (Pa)	ویسکوزیته (Pa . s)	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	فاز سوخت
۱۰۰۰	۰/۰۰۲۱	۸۲۵	مایع
-	۰/۰۰۰۱	۵	بخار

با توجه به حرکت سوزن انژکتور، در تحلیل آن نیاز به شبکه عددی دینامیک (متحرک) وجود دارد. شبیه‌سازی انژکتور از زمان بازشدن سوزن تا بسته شدن آن انجام می‌گیرد. نمودار بالابری سوزن بر حسب زاویه میل لنگ در شکل ۴ آورده شده است. به دلیل ایجاد افت فشار بالا درون سوراخ نازل انژکتور و وقوع پدیده کاویتاشیون، جریان دو فازی در نظر گرفته شده است. مدل توربولانسی مورد استفاده k-zeta-f می‌باشد. شرایط مرزی و اولیه برای شبیه‌سازی انژکتور در حالت پایه در جدول ۲ آورده شده است. اسکیم‌های گسسته‌سازی برای مومنتوم، توربولانس و کسر حجمی از نوع بالادست مرتبه دوم و برای پیوستگی از نوع تفاضل مرکزی می‌باشد. مدت زمان پاشش سوخت ۰/۸ میلی‌ثانیه می‌باشد. اسکیم گسسته‌سازی زمانی نیز از نوع ضمنی مرتبه دوم و گام زمانی مورد استفاده از  $5 \times 10^{-7}$  ثانیه تا  $10^{-8}$  ثانیه با گام‌های کوچکتر در شروع حل می‌باشد. برای کوپل فشار-مومنتوم الگوریتم سیمپل به کار برده شده است.



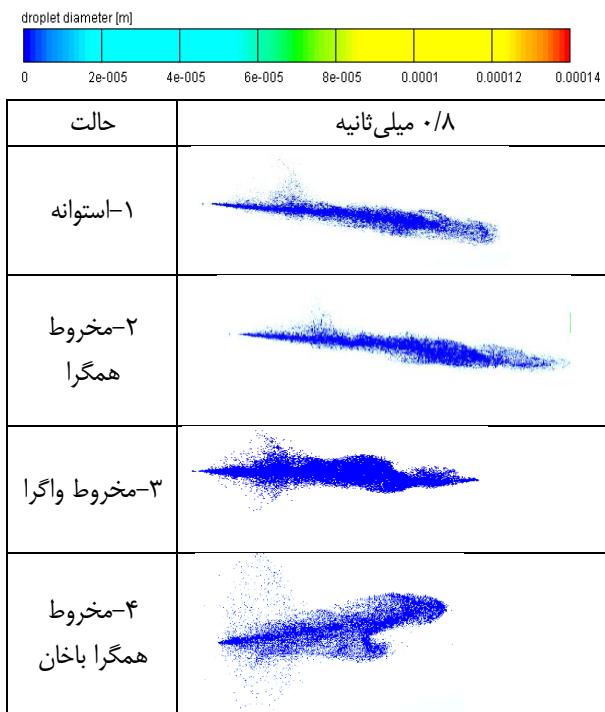
شکل ۴- بروفیل بالابری سوزن بر حسب زاویه میل لنگ [۱۶]

جدول ۲- شرایط اولیه و مرزی جریان سیال درون انژکتور

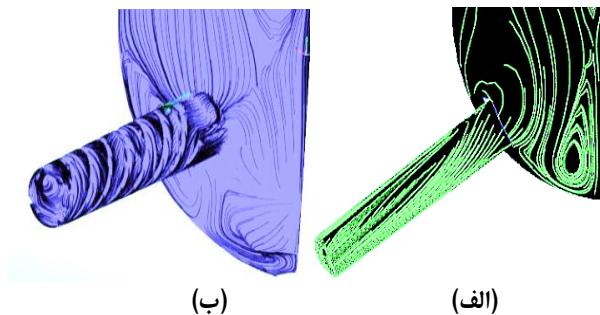
شرایط اولیه	شرایط مرزی
۱۳۵۰ bar	فشار بخار
۱۳۵۰ bar	۱۳۵۰ bar
۱۰ bar	فشار جریان
۳۱۳ k	۳۱۳ k
	دما سوخت

## افشاره

برای شبیه‌سازی و مشاهده نتایج افشاره حاصل از هندسه‌های مختلف نازل از یک محفظه احتراق استوانه‌ای حجم ثابت با قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر که در شکل ۵ آورده شده، استفاده شده است [۲]. با توجه به این شکل، به منظور افزایش دقیق شبیه‌سازی در محل پاشش



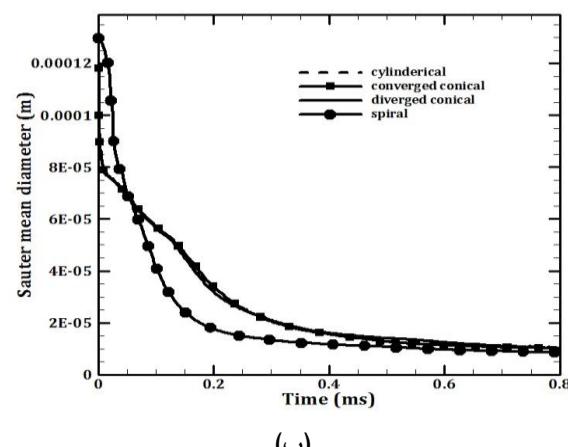
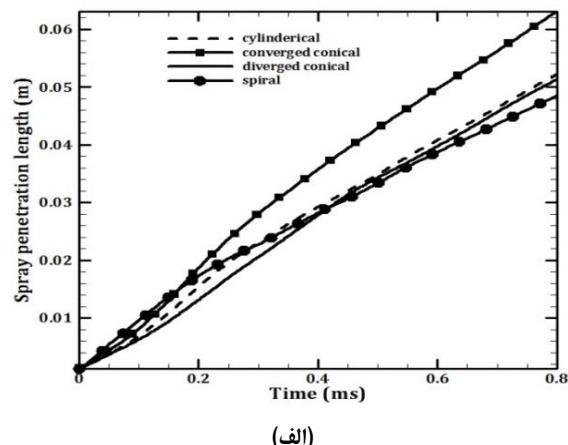
شکل ۹- ساختار افشاره محاسبه شده در هر حالت در مدت زمان انتهای پاشش



شکل ۱۰- خطوط جریان درون انژکتور، (الف) نازل مخروطی همگرا بدون خان و (ب) دارای خان

## بحث و بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی افشاره

در شکل ۸ نمودار طول نفوذ افشاره و قطر متوسط ساتر (ریز ذرات) برای حالت‌های موجود آورده شده است. همچنین ساختار افشاره محاسبه شده در هر حالت در مدت زمان انتهای تزریق سوخت در شکل ۹ آورده شده است. با افزایش قطر ورودی نازل انژکتور تلفات اصطکاکی در ورودی آن کاهش یافته و سرعت در خروجی نازل افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به افزایش طول نفوذ در نازل مخروطی همگرا نسبت به استوانه‌ای می‌گردد. همچنین ایجاد خان درون نازل مخروطی همگرا منجر به ایجاد جریان چرخشی افشاره سوخت گردیده و با افزایش تلفات درون نازل، سرعت در خروجی نازل کاهش یافته و در نهایت طول نفوذ آن کاهش می‌یابد. همچنین ایجاد جریان چرخشی درون نازل منجر به افزایش زاویه مخروطی افشاره و بهبود کیفیت اتمیزاسیون آن می‌گردد. همچنین خطوط جریان درون انژکتور در حالت نازل بدون خان و دارای خان در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به این شکل، ایجاد خان منجر به حرکت چرخشی جریان سوخت درون نازل گردیده است که تا خروجی آن ادامه دارد.



شکل ۸- طول نفوذ افشاره (الف) و قطر متوسط ساتر (ب) برای هندسه‌های مختلف نازل انژکتور

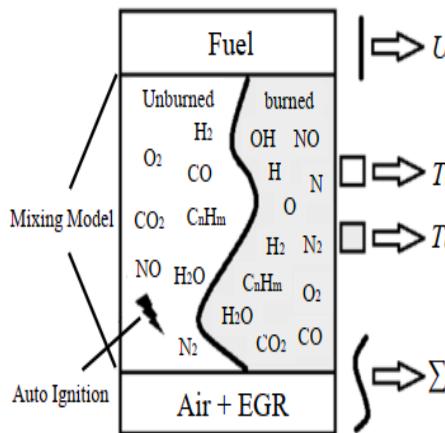
## شبیه‌سازی موتور

به منظور بررسی تاثیر تغییر هندسه نازل انژکتور و ایجاد جریان چرخشی درون آن بر روی عملکرد موتور، ابتدا به شبیه‌سازی موتور کاتریپیلار ۳۴۰۱ با انژکتور متداول آن پرداخته می‌شود. به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی از نرم‌افزار ای ال فایر استفاده شده است.

## معادلات حاکم بر شبیه‌سازی موتور

معادلات حاکم شامل معادلات پایستگی جرم، مومنتوم و انرژی می‌باشند. در موتورهای پاشش مستقیم به دلیل پاشش افشاره سوخت درون محفظه احتراق، ترم‌هایی به روابط پایستگی جرم، مومنتوم و انرژی اضافه می‌گردد [۱۷]. فرم دیفرانسیلی معادلات به شکل (۲۴) تا (۲۷) است که در آن‌ها نیانگر جهت مختصات است.

فروپاشی ثانویه قطرات افسانه سوخت از روش موج استاندارد، برای پیش‌بینی مقدار تبخیر ایجاد شده در قطرات افسانه از روش تبخیر داکوویج، برای مدل اثر دیواره از جت دیواره ۱ و برای سرعت شعله آرام<sup>۱۰</sup> از مدل متقالچی وکک استفاده شده است. برای کوپل فشار-مومنتوم از الگوریتم SIMPLE-PISO استفاده شده است. این الگوریتم برای جریان‌های تراکم پذیر و گزرا مناسب می‌باشد. به همین علت در شبیه‌سازی احتراق مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱۱- شماتیک مدل احتراقی ECFM-3Z

به منظور کاهش مدت زمان محاسبات و شرط تقارن هندسه، شبیه‌سازی تنها یک ششم از کل هندسه موتور صورت گرفته است. مدل دوده مورد استفاده در این مقاله بر اساس الگوی آلاندگی هیرویاسو<sup>۱۱</sup> می‌باشد. این الگو شامل دو فرآیند شکل گیری و اکسایش دوده می‌باشد و بر اساس آن نرخ تغییر در جرم دوده برابر با اختلاف نرخ تشکیل دوده و نرخ اکسایش آن می‌باشد. دوده اکسایش یافته و به وجود آمده به صورت زیر مدل می‌شوند:

$$\frac{dM_{soot}}{dt} = \frac{dM_{form}}{dt} - \frac{dM_{oxide}}{dt} \quad (28)$$

که در آن تشکیل دوده و آهنگ اکسایش آن بر طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{dM_{form}}{dt} = A_f M_{fv} P^{0.5} \exp\left(-\frac{E_f}{RT}\right) \quad (29)$$

$$\frac{dM_{oxide}}{dt} = \frac{6MW_c}{\rho_s D_s} M_s R_{tot} \quad (30)$$

الگوی نیتروژن اکسید مورد استفاده نیز مدل زلدوفیچ توسعه یافته<sup>۱۲</sup> می‌باشد. این الگو به شدت وابسته به دما بوده و توسط واکنش نیتروژن و اکسیژن موجود در هوا در دمای‌های بالا تولید می‌شود. در این مدل کاهش شیمیایی چند مرحله‌ای بر اساس تعادل جزئی واکنش‌های مقدماتی به صورت معادلات (۳۱) تا (۳۴) هستند:

## معادله پایستگی جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = S_m \quad (24)$$

که  $S_m$  تولید جرم به واسطه تبخیر قطرات افسانه سوخت می‌باشد.

معادله پایستگی مومنتوم (معادله ناویر-استوکس)

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho F_{v,i} + F_{p,i} \quad (25)$$

در معادله فوق،  $F_{v,i}$  بیانگر نیروهای حجمی است.  $F_{p,i}$  نیز عدتاً به نیروی فشاری در جریان دوفاز اشاره دارد.  $\tau_{ij}$  بیانگر تنش برشی می‌باشد که برای سیالات نیوتونی از رابطه زیر به دست می‌آید که در آن  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر است.

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (26)$$

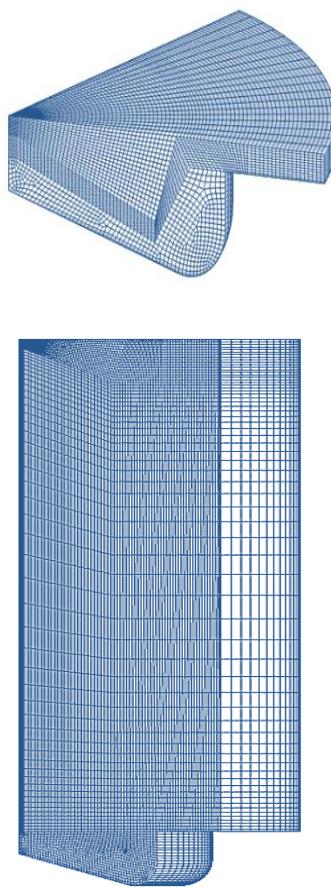
## معادله پایستگی انرژی

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial(\rho v_j h)}{\partial x_j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial t} + v_i \frac{\partial P}{\partial x_i} - \sum_i \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + S_h \quad (27)$$

که در رابطه فوق  $h$  آنتالپی بر واحد جرم و برابر با  $e + \frac{P}{\rho}$  است.  $q_i$  نیز انرژی داخلی بر واحد جرم است.  $S_h$  شار حرارتی در جهت  $i$  به واسطه گرادیان دما می‌باشد که از قانون فوریه برابر با  $k \frac{\partial T}{\partial x_i}$  است و  $k$  ضریب هدایت حرارتی سیال است. همچنین  $S_h$  تولید انرژی به واسطه جرم تبخیر شده قطرات افسانه سوخت می‌باشد.

## مدل محاسباتی

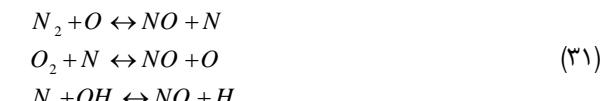
به منظور شبیه‌سازی احتراق در موتور کاتربیلار ۳۴۰۱ از نرم‌افزار فایر استفاده شده است. ایجاد هندسه و شبکه‌بندی آن با کمک مازول ای اس ای صورت گرفته است. مشخصات موتور و افسانه آن و همچنین شرایط هوای داخل محفظه احتراق در ابتدای تراکم به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. سوخت مورد استفاده، نرمال هپتان با ارزش حرارتی ۴۵/۱ مگاژول بر کیلوگرم می‌باشد. مدل احتراق مورد استفاده شعله منسجم و زیر شاخه ECFM-3Z می‌باشد. این مدل احتراقی شامل سه ناحیه است: ناحیه‌ای شامل سوخت، ناحیه‌ای شامل هوا و گازهای خروجی باز خورانی شده و قسمت سوم ناحیه اختلاط است که شامل گازهای سوخته و نسوخته می‌باشد. شبیه‌سازی این مدل احتراقی در شکل ۱۱ آورده شده است. مدل توربو لانسی مورد استفاده k-zeta-f، در فروپاشی اولیه قطرات افسانه سوخت از روش قطره ویسکوز، در



شکل ۱۳- شبکه‌بندی محفظه احتراق موتور در دو موقعیت نقطه مرگ بالا و پایین

جدول ۳- مشخصات موtor شبیه‌سازی شده [۱۸]

۱	تعداد سیلندر
۰/۱۳۷۱۹	قطر استوانه (m)
۰/۱۶۵۱	فاصله جابجایی (m)
۱۵/۱	نسبت تراکم
۰/۲۶۱۶۲	طول شاتون (m)
۱۲۵	زاویه افشاره سوخت (deg)
۱۶۰۰	سرعت (rpm)
۱۶۲/۲	میزان سوخت تزریقی در هر سیکل (mg)
۱۴۷	بسته شدن سویاپ ورودی (BTDC)
۱۳۴	بازشدن سویاپ خروجی (ATDC)
۷۱۱/۵	شروع پاشش سوخت (deg)
۲۱/۵	مدت پاشش سوخت (deg)
۶	تعداد سوراخ انژکتور
۲/۴۴	حجم جابجایی (lit)
Mexican hat	شكل کاسه سنبه
تغذیه مشترک	نوع انژکتور



واکنش کلی زیر از ضرب کردن طرفهای راست و چپ معادله فوق به دست می‌آید:



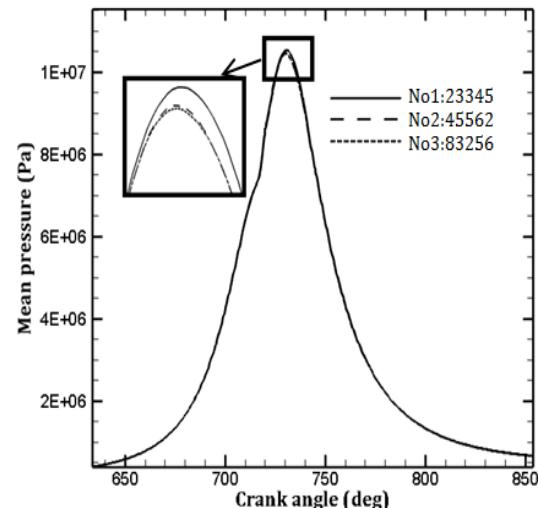
آهنگ تشکیل اکسید نیتروژن از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_f [N_2][O_2] \quad (۳۳)$$

آهنگ واکنش نیز از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k_f = \frac{a}{\sqrt{T}} \exp(-\frac{E_a}{RT}) \quad (۳۴)$$

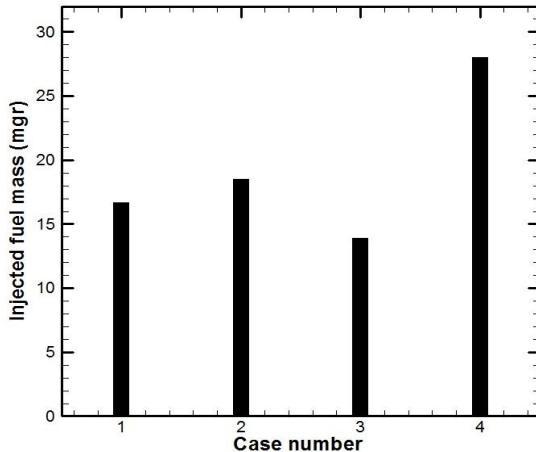
در روابط فوق،  $M_{fom}$  جرم دوده تشکیل شده،  $M_{oxide}$  جرم دوده اکسیدشده،  $M_{soot}$  تغییر جرم دوده، T دما بر حسب کلوین،  $A_f$  ثابت پیش توان آرنیوس، P فشار بر حسب بار، R ثابت عمومی گاز، E انرژی فعال سازی هیروپیاسو،  $M$  جرم دوده و  $k_f$  انرژی جنبشی آشفتگی مربوط به تشکیل دوده می‌باشد. در شبیه‌سازی موتور نیز از یک شبکه عددی دینامیک (متحرک) استفاده شده است. برای بررسی استقلال حل از شبکه‌بندی، سه شبکه‌بندی دارای تعداد سلول‌های مختلف ایجاد شده و نتایج حاصل از فشار متوسط داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ برای هر کدام در شکل ۱۲ آورده شده است. با توجه به این شکل، بین شبکه‌بندی‌های شماره ۲ و ۳ اختلاف بسیار ناچیزی وجود دارد. بنابراین از شبکه شماره ۲ که در شکل ۱۳ آورده شده، استفاده شده است. لازم به ذکر است که این شبکه محاسباتی دارای ۴۵۵۶۲ سلول می‌باشد.



شکل ۱۲- فشار متوسط درون سیلندر برای مقادیر متفاوت سلول

### بحث بر روی نتایج

در این قسمت به منظور بررسی تاثیر تغییر هندسه نازل انژکتور و ایجاد جریان چرخشی افسانه سوخت بر روی عملکرد موتور، نتایج عددی حاصل در قالب رفتار هیدرودینامیکی، پارامترهای عملکردی موتور و میزان تولیدآلیندهای خروجی ارائه شده است. در شکل ۱۵ مقدار جرم پاشش شده به درون محفظه احتراق در هر حالت آورده شده است. با توجه به این شکل بیشترین میزان جرم پاشش شده مربوط به نازل مخروطی همگرا دارای خان و کمترین مقدار آن مربوط به نازل مخروطی واگرا می‌باشد. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ تاثیر هندسه‌های مختلف نازل بر فشار و دمای متوسط داخل محفظه احتراق آورده شده است. چون تمام شرایط ابتدای تراکم و هندسه موتور برای حالات مختلف یکسان می‌باشند بنابراین دو عامل مقدار جرم سوخت پاشش شده و بازده احتراق موجب ایجاد اختلاف در فشار و بیشترین مقدار دما در حالات مختلف خواهد شد. افزایش بازده احتراق منجر به افزایش بهسوزی سوخت شده و در نتیجه آن مقدار دما و فشار درون محفظه احتراق افزایش خواهد یافت. همچنین جرم سوخت پاشش شده بیشتر درون محفوظه احتراق معادل با انرژی بیشتر بوده و در نتیجه دما و فشار درون محفوظه احتراق نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به تغییرات فشار و دما در حالات مختلف، بیشترین فشار و دما مربوط به نازل دارای خان می‌باشد که این به معنای رفتار احتراقی مناسب در این حالت نسبت به سایر حالات می‌باشد.



شکل ۱۵- میزان جرم پاشش شده درون سیلندر در هر حالت

در جدول ۵ مقدار توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه در هندسه‌های مختلف نازل برای یک سیکل کاری موتور به منظور مقایسه آورده شده است. با مقایسه نتایج عددی حاصل ارائه شده در این جدول می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر هندسه نازل استوانه‌ای به مخروطی همگرا و ایجاد خان درون آن، عملکرد موتور مربوطه بهبود یافته است. زیرا مقدار مصرف سوخت ویژه به مقدار نسبتاً قابل توجهی کاهش یافته

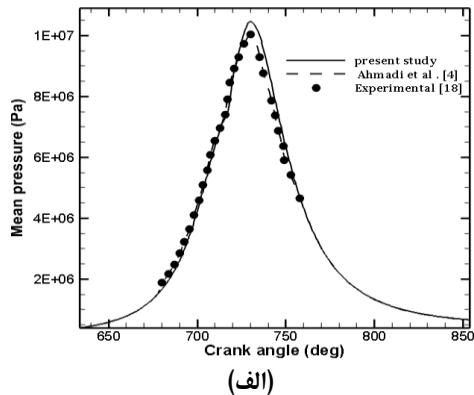
### جدول ۴- شرایط های داخل سیلندر در ابتدای تراکم [۱۸]

۳۴۴	(k)
۲۰۰	(KPa)
.	گاز خروجی بازخوارانی شده (%)

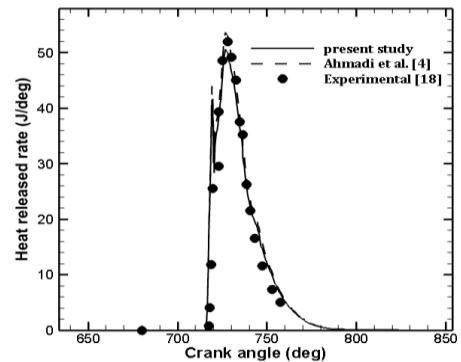
### اعتبارسنجی روش عددی

به منظور بررسی دقیق نتایج حاصل به مقایسه نتایج عددی با نتایج عددی و تجربی پرداخته شده است. شکل ۱۴ نمودار فشار متوسط داخل سیلندر و نرخ حرارت آزاد شده بر حسب زاویه میل لنگ را در حالت شبیه‌سازی شده و مرجع [۱۹, ۱۸] نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

شبیه‌سازی موتور با انژکتور دارای هندسه‌های مختلف نازل پس از شبیه‌سازی موتور با انژکتور متداول آن و اعتبارسنجی نتایج حاصل، به شبیه‌سازی موتور با هندسه‌های مختلف نازل انژکتور و دارای خان با کمک فایل ذخیره شده در خروجی نازل آن پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی‌ها، مشخصه‌های موتور مانند سرعت، زاویه افسانه سوخت، زمان شروع پاشش سوخت، نسبت تراکم و هندسه‌ی موتور ثابت ولی مدت زمان پاشش و جرم سوخت پاشش شده متغیر می‌باشند.



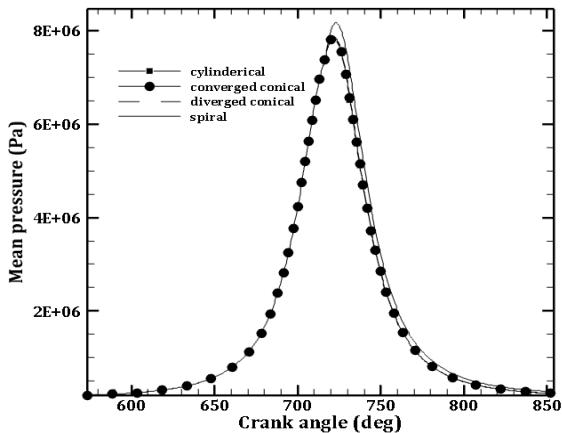
(الف)



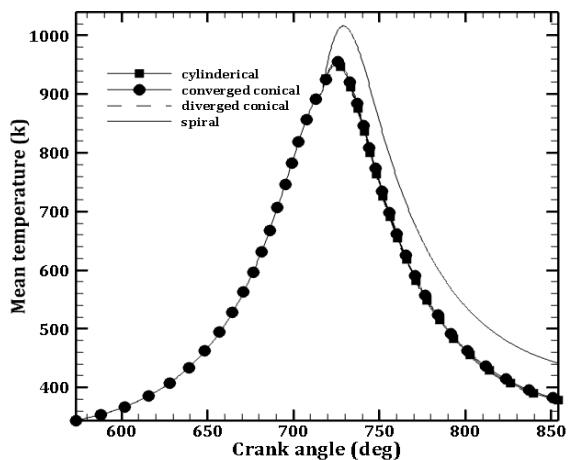
(ب)

شکل (۱۴): اعتبارسنجی نتایج عددی موتور با مقادیر تجربی، (الف) فشار متوسط درون سیلندر، (ب) نرخ حرارت آزاد شده

توجه به این شکل، در تمامی هندسه‌های مختلف نازل اثرکتور، دوده به خوبی در انتهای فرایند احتراق اکسایش یافته و از بین می‌رود ولذا موتور از لحاظ تولید آباینده دوده مشکلی ندارد.



شکل ۱۶ - تغییرات فشار متوسط درون سیلندر برای حالات مختلف



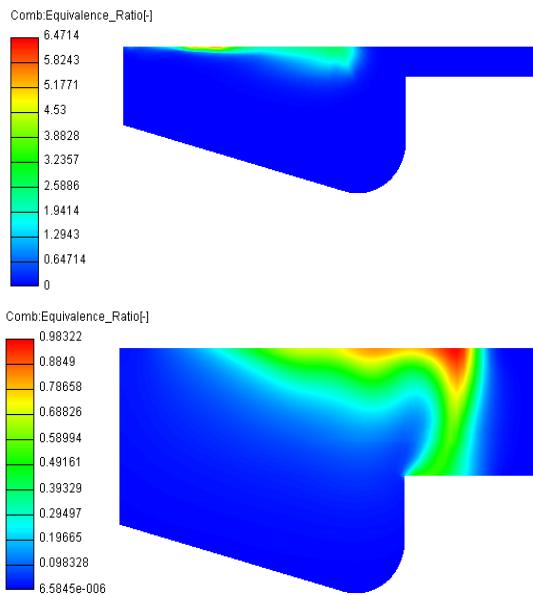
شکل ۱۷ - تغییرات دمای متوسط درون سیلندر برای حالات مختلف

جدول ۵ - نتایج عملکرد کلی موتور

صرف سوخت ویژه [Kg/kwh]	توان [Kw]	گشتاور [Nm]	حال	هندسه نازل (حال)
۰/۳۱۶۶	۱/۹۲	۱۱/۴۷	۱	- استوانه
۰/۳۰۷۳	۲/۱۰	۱۲/۵۶	۲	- مخروط همگرا
۰/۳۲۵۴	۱/۷۵	۱۰/۴۷	۳	- مخروط واگرا
۰/۲۱۴۳	۳/۱۳	۱۸/۷۱	۴	- مخروط همگرا با خان

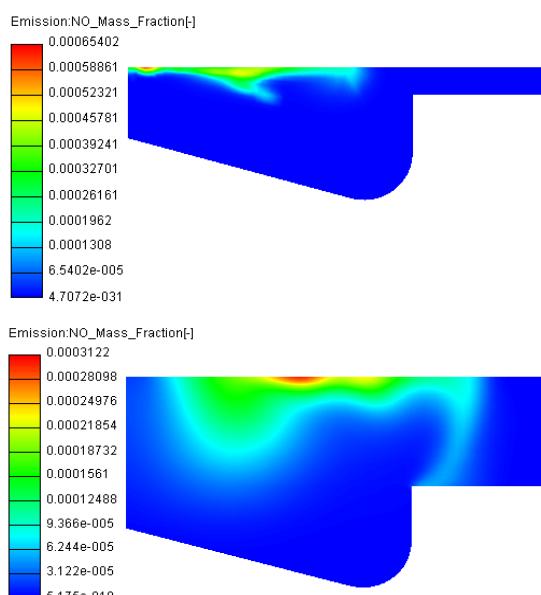
است. مصرف سوخت ویژه با تغییر هندسه و ایجادخان درون نازل به مقدار  $۳۲/۳۱$  درصد کاهش یافته است. همچنین میزان توان و گشتاور تولیدی موتور به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. این افزایش قابل توجه به دلیل افزایش جرم ورودی به درون محفظه احتراق و افزایش زاویه مخروطی افسانه می‌باشد که منجر به بهبود فرایند احتراق گردیده است. با تغییر هندسه نازل استوانه‌ای و ایجاد خان درون آن، توان تولیدی موتور از  $۱/۹۲$  کیلووات به  $۳/۱۳$  کیلووات رسیده است و این یعنی میزان توان تولیدی  $۶۳$  درصد افزایش یافته است. همچنین مقدار گشتاور تولیدی از  $۱۱/۴۷$  نیوتن متر در حالت نازل استوانه‌ای به  $۱۸/۷۱$  نیوتن متر رسیده است و این به معنی آن است که گشتاور تولیدی نیز  $۶۳$  درصد نسبت به حالت معمولی افزایش یافته است. با مقایسه عملکرد موتور برای هندسه‌های مختلف نازل در این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که اثرکتور با نازل دارای خان بهترین عملکرد را در میان سایر نازل‌ها دارد. با شروع فرآیند احتراق و بالارفتن دمای داخل سیلندر مقدار اکسید نیتروژن تولیدی افزایش می‌یابد. زیرا با شروع احتراق دمای موضعی داخل سیلندر افزایش یافته و نیتروژن شروع به تجزیه شدن در نقاط دما بالا می‌کند. مقدار این آباینده پس از چند درجه از نقطه مرگ بالا به مقدار ثابت می‌رسد. چون در این حالت تمام سوخت می‌سوزد و نقاط دما بالا از بین می‌روند [۱]. در شکل ۱۸ میزان تولید آباینده اکسید نیتروژن در حالات مختلف بر حسب زاویه میل لنگ آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نازل دارای خان موجب بهبود رفتار موتور از لحاظ تولید آباینده اکسیدنیتروژن شده است. حداقل مقدار اکسید نیتروژن در نازل استوانه‌ای مقدار این آباینده به مقدار  $۱۲/۳$  درصد کاهش یافته است. این بنابراین در میزان توان تولیدی در این حالت  $۶۳$  درصد افزایش یافته است. میزان توان نازل دارای خان به علت افزایش زاویه مخروطی افسانه، سوخت را به صورت یکنواخت‌تری درون سیلندر توزیع نموده است. در حالت نازل مخروط همگرا نسبت به نازل استوانه‌ای، میزان توان موتور و گشتاور تولیدی به ترتیب  $۹/۳۷$  درصد و  $۹/۵$  درصد افزایش و میزان مصرف سوخت ویژه  $۲/۹۳$  درصد کاهش یافته است. در حالت نازل مخروط واگرا نسبت به نازل استوانه‌ای، میزان توان موتور و گشتاور تولیدی به ترتیب  $۸/۸۵$  درصد و  $۸/۷۱$  درصد کاهش و میزان مصرف سوخت ویژه  $۲/۷۷$  درصد افزایش یافته است. در شکل ۱۹ میزان تولید آباینده دوده در حالات مختلف بر حسب زاویه میل لنگ آورده شده است. با پاشش سوخت به درون محفظه احتراق و شروع فرآیند احتراق و به تبع آن بالارفتن دمای محفوظه، بهدلیل عدم اکسیژن‌رسانی کافی و مناسب به سوخت در حال احتراق، ابتدا مقدار دوده افزایش یافته ولی با اتمام احتراق به علت انبساط محفوظه و دما و شدت توربولانسی ایجادشده مناسب، دوده ایجادشده اکسید شده و لذا کاهش می‌یابد. با

در شکل ۲۱ کاتورهای دوبعدی توزیع نسبت هم‌ارزی درون محفظه احتراق در نقطه مرگ بالا و ۳۰ درجه پس از آن آورده شده است.

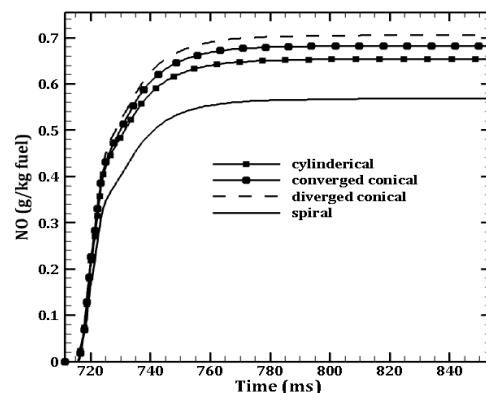


شکل ۲۱- توزیع نسبت هم‌ارزی درون محفظه احتراق در دو زاویه متفاوت پس از شروع پاشش

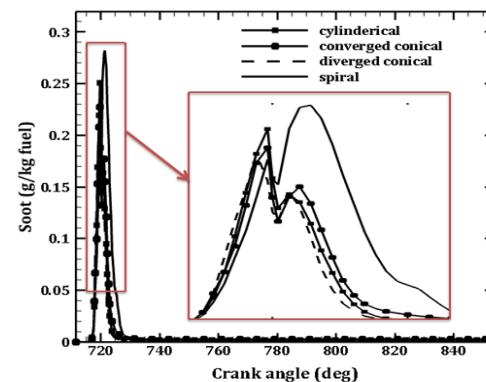
در شکل ۲۲ کاتورهای دوبعدی توزیع اکسید نیتروژن و در شکل ۲۳ کاتورهای دوبعدی مربوط به توزیع دوده درون محفظه احتراق در نقطه مرگ بالا و ۳۰ درجه پس از آن آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها، آلاینده اکسیدنیتروژن بیشتر در نقاط دما بالا و آلاینده دوده بیشتر در نقاط دما پایین تشکیل می‌شود. این دو آلاینده دارای رفتار متضاد می‌باشند و با کاهش یکی، دیگری افزایش می‌یابد.



شکل ۲۲- توزیع اکسیدنیتروژن درون محفظه احتراق در دو زاویه متفاوت پس از شروع پاشش

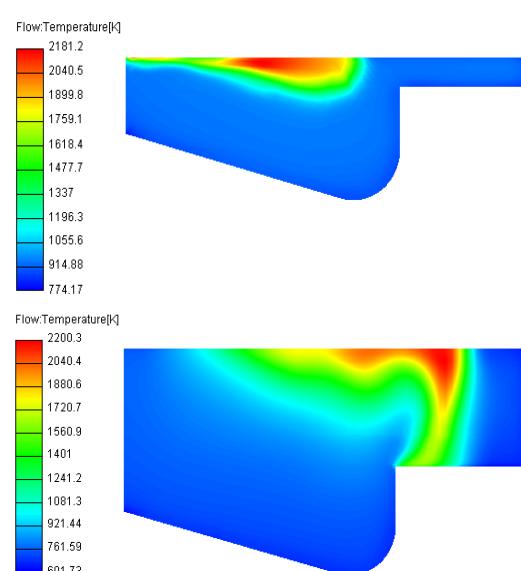


شکل ۱۸- تغییرات اکسید نیتروژن در حالات مختلف



شکل ۱۹- تغییرات دوده در حالات مختلف

در شکل ۲۰ کاتورهای دوبعدی توزیع دما درون محفظه احتراق در نقطه مرگ بالا و ۳۰ درجه پس از آن آورده شده است. با توجه به این شکل احتراق سوخت از قسمت مرکزی شروع شده و رفته رفته به سمت بدن سیلندر حرکت می‌کند.

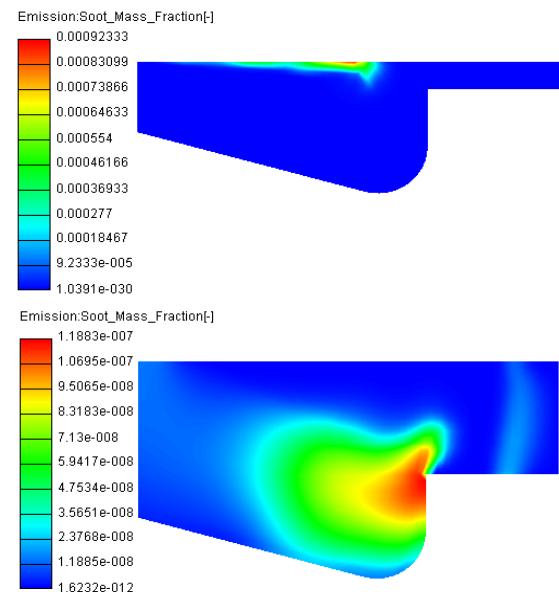


شکل ۲۰- توزیع دما درون محفظه احتراق در دو زاویه متفاوت پس از شروع پاشش

آلینده‌های تولیدی در موتورهای دیزل، مزیت اصلی تغییر هندسه نازل سوخت و ایجاد شیار درون آن کاهش همزمان مصرف سوخت و آلینده‌های تولیدی دوده و اکسیدهای نیتروژن به همراه افزایش توان و گشتاور تولیدی به دلیل افزایش زاویه مخروطی افشاره حاصل و کاهش برخورد آن با دیواره موتور می‌باشد که نسبت به سایر راهکارهای ارائه شده تاکنون می‌باشد که حائز اهمیت می‌باشد. همچنین کنترل مشخصات افشاره سوخت و موتور احتراق از طریق تنظیم مشخصات شیار ایجادشده درون نازل سوخت قابل انجام می‌باشد.

## مراجع

- [1] R. Esmaelnajad, M. T. Shervani-Tabar, M. Jafari, S. E. Razavi, Numerical study on the effects of different injection patterns in an annulus injector on the performance of a diesel engine, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 02, pp. 423-433, 2018 (in Persian).
- [2] H. Mohammadi, P. Jabbarzadeh, M. Jabbarzadeh, and 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 spiral rifling like guides", *Fuel*, vol. 196, no. 5, pp. 419-430, 2017.
- [3] M. Battistoni, C. Nazareno 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.
- [4] S. M. Hosseini, R. Ahmadi, M. Mohebi, 3D Simulation of Performance and Pollution of Hydrogen-Diesel Combustion in Heavy Duty Engine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 177-186, 2017 (in Persian).
- [5] B. J. Bora and U. K. Saha, "Experimental evaluation of a rice bran biodiesel-biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios," *Renewable energy*, vol. 87, pp. 782-790, 2016.
- [6] S. Hossainpour, and H. Rahagh, "The Effect of Fuel Injection Type on Performance and Emissions in DI Diesel Engine with Mmultiple Injection", [MSc Thesis], Sahand University of Technology, 2005.
- [7] F. Ommi, K. Pourghasemi, V. Esfahanian, A. Mirmohammadi"Investigation on Effect of Multiple Injection on Performance and Emission Reduction in a DI Diesel Engine, Amirkabir *Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)*. AJSR - E, Tehran, Iran, 2011 (in Persian).
- [8] A.H. Farajollahi, and R. Firuzi, "Numerical investigation on the effect of creating swirl flow inside the nozzle and injection pressure increase on the cavitation and diesel fuel spray characteristics, *Mechanical Engineering of Tabriz University*, Vol. 51, No. 3, , pp. 155-164, 2021 (In Persian).
- [9] F. Jalilantabar, B. Ghobadian and G.Najafi, "Optimizing the EGR rate, biodiesel fuel ratio and engine working mode using RSM method", *Journal of fuel and combustion*, Vol. 10, No.03, pp. 15-31, 2016.
- [10] H. Fujimoto, T. Mishikori, T. Tsumakoto, J.Senda, Modeling of atomization and vaporization process in flash boiling spray, ICLASS-94 Conference, France, 1994.
- [11] Avl List GmbH. *AVL Fire v. 2013, CFD solver*, Eulerian multiphase, 2013.



شکل ۲۳- توزیع دوده درون محفظه احتراق در دو زاویه متفاوت پس از شروع پاشش

## تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافعی توسط نویسندهای بیان نشده است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عددی تاثیر تغییر هندسه و ایجاد جریان چرخشی درون نازل بر روی مشخصات افشاره سوخت، عملکرد موتور و آلینده‌های ناشی از آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار فایر برداخته شده است. نتایج عددی مربوط به افشاره و موتور با انتکتور متداول آن با نتایج تجربی موجود اعتبارسنجی شده‌اند. تطابق قبولی بین نتایج عددی و تجربی موجود به دست آمد. نتایج مربوط به توان تولیدی موتور، گشتاور، مصرف سوخت ویژه و انتشار آلیندگی در محفظه احتراق برای هندسه‌های مختلف نازل مورد مقایسه قرار گرفت. استفاده از نازل دارای خان منجر به کاهش دما در نقاط دما بالای درون محفظه احتراق می‌شود. این امر تاثیر بسزایی در کاهش آلینده‌ی اکسید نیتروژن داشت. مقدار مصرف سوخت ویژه با ایجاد خان درون نازل ۳۲ درصد کاهش یافت. با این تغییر مقدار آلینده‌های تولیدی نیز کاهش یافتند. استفاده از نازل دارای خان و تغییر جرم پاشش موجب تغییر مقدار دوده در ابتدای فرایند احتراق گردیده ولی در ادامه فرایند احتراق دوده تولیدشده به خوبی اکسایش یافت. افزایش توان و گشتاور تولیدی و همچنین دما و فشار متوسط درون سیلندر، به منظور بررسی بیشتر نیاز به آنالیز تنش حرارتی و دینامیکی پیستون، سیلندر و شاتون دارد. با توجه به راهکارهای پیشنهاد شده به منظور بهینه‌سازی احتراق و کاهش

- [16] L. Postrioti, C.N. Grimaldi, M. Ceccobello, R. Di Gioia, Diesel common rail injection system behavior with different fuels, SAE Technical paper 2004-01-0029, 2004.
- [17] M. Mhlbauer, Modelling wall interactions of a high-pressure, hollow cone spray, [PhD thesis], Technical University of Darmstadt, 2009.
- [18] A.H. Farajollahi, and R. Firuzi, "Numerical investigation on the effect of nozzle geometry and needle lift profile on the cavitation flow and efficiency of the marine diesel engine injector," *Marine-Engineering*, vol. 16, no. 23, 2020, pp. 47-58, URL:<http://marine-eng.ir/article-1-827-fa.html> (In persian).
- [19] R. Tatschl 3D-CFD simulation of IC-engine flow, mixture formation and combustion with AVL FIRE. Combustion Engines Development, Springer Berlin Heidelberg, pp. 601–630, 2012.
- [12] 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 ssociation, ATI2013, Energy Procedia*, vol. 45, pp. 749 – 758, 2014.
- [13] M. Battistoni, C.N. Grimaldi, Numerical analysis of injector flow and spray characteristics from diesel injectors using fossil and biodiesel fuels, *Applied Energy*, vol. 97, no. 1, pp. 656-666, 2012.
- [14] A.H. Farajollahi, R. Firuzi, M. Pourseifi, A. Mardani, M. Rostami, Numerical investigation of the effect of swirl and needle lift profile change on the diesel fuel spray behavior, *JER. 2019*, vol. 54, 2019, pp. 25-38 URL: <http://engineresearch.ir/article-1-692-fa.html>.
- [15] R.H. Perry, D.W. Green, *Perry's chemical engineer's handbook*, McGraw-Hill, 1997.