

مطالعه عددی تأثیر ایجاد شیار درون اریفیس انژکتور موتور احتراق تراکمی بر رفتار اسپری و کیفیت پودر سازی سوخت‌های دیزل و کراسین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱

امیرحمزه فرج‌الهی^{۱*}، رضا فیروزی^۲، محسن رستمی^۳، محمدرضا سلیمی^۴، فرید باقرپور^۵

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، a.farajollahi@sharif.edu

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی (ع)، تهران

۴- استادیار، پژوهشکده سامانه‌های فضاوردی، پژوهشگاه هوافضا، تهران

۵- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام علی (ع)، تهران

چکیده

در مطالعه حاضر، رفتار پاشش سوخت دیزل و کراسین درون محفظه احتراق استوانه‌ای حجم ثابت برای اریفیس انژکتور بررسی شده است. مشخصات هندسی انژکتور بر مشخصات اسپری و کیفیت اتمیزاسیون از هندسه‌های مختلف به صورت عددی در نرم‌افزار فایر مدل سازی و تحلیل شده است. جریان سوخت مایع درون انژکتور دارای اریفیس استوانه‌ای و مخروطی همگرا مدل سازی شده و از سوخت دیزل و کراسین در سوراخ نازل دارای شیار استفاده شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که اسپری کراسین دارای طول نفوذ کمتر، قطر ذرات و زاویه مخروطی بیشتری نسبت به سوخت دیزل است. در مدت زمان انتهایی پاشش، ایجاد شیار به افزایش ضریب تخلیه به میزان ۷۳ درصد، افزایش سرعت متوسط و دبی جرمی خروجی به میزان ۸۰ درصد، کاهش طول نفوذ به میزان ۶ درصد، کاهش قطر متوسط ذرات به میزان ۱۸/۵ درصد برای سوخت دیزل و کاهش ضریب تخلیه به میزان ۵۴ درصد، کاهش سرعت متوسط خروجی به میزان ۵۲ درصد، کاهش دبی جرمی خروجی به میزان ۴۹ درصد، کاهش طول نفوذ به میزان ۲۲ درصد و افزایش قطر متوسط ذرات به میزان ۵/۵ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای منجر می‌شود. کنترل مشخصات اسپری سوخت به منظور افزایش راندمان احتراق موتور و کاهش آلاینده‌های آن‌ها اهمیت زیادی دارد و با تغییر هندسه اریفیس انژکتور سوخت قابل انجام است.

واژه‌های کلیدی: اریفیس انژکتور، خان، دیزل، کراسین، مشخصات اسپری

۷۱

سال ۱۰- شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

نشریه علمی دانش و

فناوری هوا فضا



مطالعه عددی تأثیر ایجاد شیار درون اریفیس انژکتور موتور احتراق تراکمی بر رفتار اسپری و کیفیت پودر سازی سوخت‌های دیزل و...

Numerical investigation on the effect of creating grooves inside the compression ignition injector orifice on spray behavior and atomization quality of diesel and kerosene fuels

Amir Hamzeh Farajollahi¹, Reza Firuzi², Mohsen Rostami³, MohammadReza Salimi⁴, Farid Bagherpor⁵

1- Assistant Professor, Engineering Department, Imam Ali university, Tehran, a.farajollahi@sharif.edu

2- Msc Student, Mechanical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Ghazvin

3- Assistant Professor, Engineering Department, Imam Ali university, Tehran

4- Assistant Professor, Astronautical Systems Research Institute Aerospace Research, Tehran

5- Phd Student, Engineering Department, Imam Ali university, Tehran

Abstract

In the present study, the spraying behavior of diesel and kerosene fuel in a cylindrical fixed volume combustion chamber for a injector orifice has been investigated. In order to investigate the effect of injector geometry on fuel spray characteristics and atomization quality, different geometries have been used. For this purpose, the microscopic and macroscopic properties of the diesel and kerosene fuel spray for different geometries of orifice compression ignition injectors are modeled and investigated using AVL-Fire. Firstly, the liquid fuel flow inside the injector with cylindrical and converged conical nozzle holes have been modeled and then in the following diesel and kerosene fuels have been used in the grooved nozzle hole. Numerical results show that in this case, the kerosene spray has smaller penetration length and bigger cone angle than diesel fuel. Controlling the properties of the fuel spray is important to increase the combustion efficiency of the engine and also to reduce their pollution, and can be done by changing the geometry of the fuel injector nozzle.

Keywords: Injector Orifice, groove, diesel, kerosene, spray characteristics.

۱. مقدمه

در هر مولکول ۶ تا ۱۶ اتم کربن موجود است. نقطه اشتعال نفت چراغ بین ۳۷ تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه فارنهایت) و دمای اشتعال خودکار آن ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد (۴۲۸ درجه فارنهایت) است.



سوخت دیزل سوخت کروزنه
شکل ۱- سوخت‌های دیزل و کروزنه

در مقاله‌های گذشته مشخصات جریان سوخت مایع در انژکتور و خصوصیات اسپری حاصل برای شرایط مختلف هندسه سوراخ نازل و انواع سوخت جایگزین یا ترکیبی بررسی و تحلیل شده است. مساح و همکاران به بررسی عددی و تجربی سامانه پاشش سوخت لوله مشترک و ارزیابی تأثیر فشار پاشش سوخت بر ویژگی‌های پاشش و نوسانات فشار پرداختند. اثر فشار سوخت بر نوسانات فشار سوخت در ورودی افشانه، نرخ پاشش، جرم سوخت پاشیده شده، زمان پاشش و جابه‌جایی میله مهار بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد فشار تزریق قوی‌تر به نوسانات فشار بیشتر منجر می‌شود. به دلیل تراکم سوخت، چگالی سوخت با افزایش فشار افزایش می‌یابد و درنهایت به انتشار سریع‌تر نوسانات فشار می‌انجامد. مدت زمان پاشش نیز با وجود یکسان بودن مدت زمان تحریک سیم‌پیچ در فشارهای مختلف، متفاوت است که به دلیل تأخیری است که در بسته شدن گلوگاه و حرکت سوزن به سمت پایین وجود دارد. مقدار تأخیر در بسته شدن با افزایش فشار بیشتر می‌شود [۱].

اکبری مشخصه‌های عملکردی انژکتور

موتورهای دیزل به دلیل توان و گشتاور تولیدی بالا و مصرف سوخت نسبتاً کم و راحت‌تر بودن تعمیرات و نگهداری آن‌ها در انواع صنایع حمل‌ونقل زمینی، دریایی، نظامی، تولید الکتریسیته (دیزل ژنراتورها) و کشاورزی کاربرد گسترده‌ای دارند. امروزه استفاده از سوخت‌های جایگزین و ترکیبی به جای سوخت رایج در موتورهای دیزل گسترش پیدا کرده است. از جمله این سوخت‌ها می‌توان به بیودیزل، کراسین و ... اشاره کرد. بیودیزل سوخت حاصل از ضایعات روغن‌های گیاهی بوده و از منابع سوخت‌های تجدیدپذیر به شمار رفته و خواص مشابه سوخت‌های فسیلی دارد. کراسین یا نفت سفید یک هیدروکربن مایع قابل اشتعال است و بیشتر به عنوان سوخت اغلب تراکتورها و ماشین‌های مورد استفاده در کشاورزی و سوخت جت در هواپیماهای دارای موتور جت (موتورهای توربینی)، همچنین برخی راکت‌ها و محفظه تراست موتورهای موشکی سوخت مایع به‌کار می‌رود. در برخی موارد نیز از کراسین به‌عنوان سوخت قایق‌های موتوری استفاده می‌کنند. کراسین شامل هیدروکربن‌های ده تا چهارده کربنه است. در شکل ۱ سوخت‌های دیزل و کراسین نشان داده شده است. نقطه ۶۵ درصد تقطیر این برش باید کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و نقطه جوش ۸۰ درصد آن نیز پایین‌تر از ۲۸۵ درجه سانتی‌گراد باشد. رنگ طبیعی این فرآورده بی‌رنگ بوده و با توجه به تصفیه‌های ویژه‌ای که روی آن انجام می‌گیرد، فاقد هرگونه بوی تند و نامطبوع است. این ماده با روش تقطیر جزءبه‌جزء نفت در درجه ۱۵۰ تا ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست می‌آید و در نتیجه این کار زنجیره‌های کربنی با یکدیگر ترکیب می‌شوند که



فشاری-پیچشی دوگانه توربین گاز هوایی جی ۸۵-۲۱ را بررسی نظری و تجربی کرد. نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز ابتدا حالت پاشش اسپری 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].

مهدی و سالاری تأثیر فاصله سوزن و شکل نشیمنگاه بر وقوع پدیده کاویتاسیون درون سوراخ نازل انژکتور را بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که ارتفاع سوزن انژکتور و شکل نشیمنگاه علاوه بر ضریب تخلیه، بر محل وقوع کاویتاسیون و تشکیل حباب نیز تأثیرگذار است [۳].

فرج‌الهی و فیروزی به بررسی تأثیر تغییر هندسه اریفیس انژکتور دیزل و افزایش فشار تزریق سوخت بر شدت وقوع کاویتاسیون و خصوصیات افشانه سوخت پرداختند. نتایج عددی نشان می‌دهند که استفاده از شیار به افزایش زاویه مخروطی افشانه و کاهش طول نفوذ و قطر متوسط ذرات منتهی می‌شود. همچنین افزایش فشار تزریق به افزایش طول نفوذ افشانه و کیفیت پودرسازی سوخت و کاهش زاویه مخروطی افشانه و قطر متوسط ذرات منجر می‌شود [۴].

زو و همکاران تأثیر متغیرهای هندسی سوراخ نازل انژکتور را بر جریان و پدیده کاویتاسیون به صورت عددی بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که نسبت طول به قطر اریفیس و شعاع انحنا سوراخ ورودی نازل، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب جریان و کسر حجمی فاز بخار سوخت دارد [۵].

شروانی تبار و همکاران در مطالعه‌ای دیگر به صورت عددی تأثیر شرایط فیزیکی بر رفتار

اسپری سوخت‌های مختلف (دی متیل اتر، سوخت زیستی و دیزل) را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که افزایش فشار محفظه احتراق در هر سه نوع سوخت، باعث کاهش طول نفوذ اسپری و افزایش فشار تزریق باعث کاهش قطر ریز ذرات می‌شود. همچنین در شرایط فیزیکی یکسان برای هر سه سوخت، دی متیل اتر کمترین و دیزل بیشترین مقدار طول نفوذ اسپری را دارد [۶].

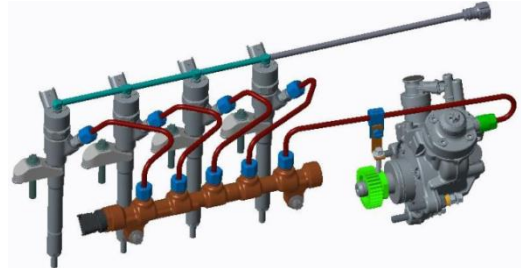
مرور مقاله‌های گذشته نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات زیادی درباره عوامل تأثیرگذار بر جریان درون سوراخ نازل انژکتور و اسپری سوخت حاصل انجام شده است، ولی نقش تأثیر ایجاد شیار بر شدت وقوع کاویتاسیون و تأثیر آن بر مشخصات اسپری سوخت‌های دیزل، کراسین و کیفیت پودرسازی آن‌ها انجام نشده است. هدف و نوآوری تحقیق حاضر، بررسی عددی تأثیر ایجاد شیار بر شدت وقوع کاویتاسیون و رفتار اسپری سوخت‌های دیزل و کراسین در انژکتور دیزل ریل مشترک (CRII) تولیدی شرکت بوش آلمان است.

۲. بررسی تئوری و ارائه معادلات حاکم

در این مقاله، در دو قسمت تأثیر ایجاد شیار بر شدت وقوع کاویتاسیون، رفتار اسپری برای سوخت‌های دیزل و کراسین بررسی شده است. در قسمت اول، رویکرد اویلر-اویلر برای شبیه‌سازی جریان دو فازی درون انژکتور به کار برده شده است. در ادامه در قسمت دوم با رویکرد اویلر-لاگرانژی، شبیه‌سازی اسپری به کمک داده‌های ذخیره شده در مقطع خروجی نازل از قسمت اول بررسی شده است. شماتیک سامانه سوخت‌رسانی ریل مشترک دارای انژکتور در شکل ۲ نشان داده شده است [۱]. به منظور افزایش دقت و کاهش مدت زمان محاسبات عددی با توجه به شرط مرزی متقارن انژکتور، شبیه‌سازی تنها یک پنجم



(یک سوراخ نازل انژکتور) از کل هندسه موردنظر با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی ای وی ال فایر که یک نرم افزار تخصصی در مدل سازی پاشش سوخت و موتورهای احتراق داخلی است، انجام شده است.



شکل ۲- شماتیک سیستم سوخت رسانی ریل مشترک با انژکتور [۱]

۲-۱. انژکتور

همان طور که اشاره شد، برای شبیه سازی جریان دوفازی و گذرا درون انژکتور از رویکرد اولیو- اولیو استفاده می شود. معادله های حاکم شامل معادله های بقای جرم، مومنتوم و انرژی جنبشی هستند [۷]. به دلیل فرض هم دما بودن از آوردن معادله انرژی صرف نظر شده است.

معادله بقای جرم

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

$$k=1, \dots, N$$

که در آن، α_k کسر حجمی فاز k ، ρ_k چگالی فاز k ، v_k سرعت فاز k و Γ_{kl} بیانگر تبادل جرمی بین دو فاز k و l است [۷]. همچنین مجموع کسر حجمی تمامی فازها (بخار و مایع) برابر یک است (شرط سازگاری).

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

معادله بقای مومنتوم

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k v_k = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot \alpha_k (\bar{\tau}_k + \bar{T}_k) + \alpha_k \rho_k \bar{f} + \sum_{l=1, k \neq l}^N M_{kl} + v_k \sum_{l=1, k \neq l}^N \Gamma_{kl}, \quad k=1, \dots, N \quad (3)$$

در معادله (۳)، f بردار نیروی حجمی شامل نیروی جاذبه و اینرسی، τ بردار تنش برشی، T^t بردار تنش رینولدزی، M بیانگر تبادل مومنتوم بین حالت ها (مربوط به جریان دوفازی) و p فشار استاتیکی است.

انرژی جنبشی آشفتگی

(۴)

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

در معادله (۴)، k انرژی جنبشی آشفتگی، μ لزجت دینامیکی، μ^t لزجت مولکولی، σ کشش سطحی و ε نرخ اضمحلال انرژی است [۷].

۲-۲. تبادل بین حالتی

مهم ترین تفاوت بین جریان دوفازی و تک فازی، تبادل بین حالتی مربوط به کمیت های جرم، مومنتوم و آنتالپی است. با توجه به ثابت در نظر گرفتن دمای سوخت، از ارائه معادله های حاکم بر تبادل بین حالتی کمیت آنتالپی صرف نظر شده است. تبادل جرم بین دو حالت مایع و بخار با مدل کاویتاسیونی غیرخطی مدل شده است. معادله حاکم بر این مدل به صورت زیر است:

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

که در آن، N^m چگالی عددی حباب و R شعاع حباب است. تغییرات شعاع حباب نسبت به زمان با کمک معادله رایلی به صورت زیر ارائه می شود [۷]:

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

که در آن Δp اختلاف فشار مؤثر و ρ_c چگالی حالت پیوسته (مایع) است. چگالی عددی حباب، N^m ، با توجه به رمپ خطی نزولی فرض



شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{idr} = \frac{1}{2} \rho_g A_d C_d |u_{rel}| u_{irel} \quad (12)$$

همچنین شتاب قطره در محیط گازی درون محفظه احتراق به صورت زیر ارائه و بیان می‌شود [۸]:

$$(13)$$

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

زیرمدل استفاده شده در تبخیر قطرات اسپری سوخت، مدل دو کوویچ است، که حتماً بر مبنای فرض کروی و متقارن بودن قطره، جریان نیمه آرام فیلم گاز اطراف قطره، دمای یکنواخت قطره در طول قطر قطره، خواص فیزیکی یکنواخت سیال احاطه کننده، تعادل گرمایی مایع - بخار روی سطح قطره شکل گرفته است [۸]. نرخ تغییرات دمای قطرات سوخت با معادله بالانس انرژی که بیانگر این است که انرژی هدایت شده به قطرات سوخت به افزایش دما یا تبخیر آنها منجر می‌شود، به صورت زیر ارائه می‌شود [۸]:

$$\dot{m}_d C_{pd} \frac{dT_d}{dt} = L \frac{dm_d}{dt} + \dot{Q} \quad (14)$$

در معادله (۱۴)، \dot{Q} شار حرارتی جابه‌جایی منتقل شده از سیال محیط اطراف به سطح قطره است و با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q} = \alpha A_s (T_\infty - T_s) \quad (15)$$

در معادله (۱۵)، α ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و A_s مساحت سطح قطره است. سایر زیر مدل‌های استفاده شده در شبیه‌سازی اسپری سوخت عبارت‌اند از: مدل ارورکه در برهم‌کنش میان ذرات، مدل تزریق گلوله در فروپاشی اولیه و مدل موج برای فروپاشی ثانویه. در مدل تزریق گلوله مشخصه شعاع قطره Γ_A و مشخصه زمان فروپاشی R, τ_A بیانگر شعاع واقعی قطره بوده و نرخ فروپاشی آیرودینامیکی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸]:

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

N_0''' چگالی عددی اولیه حساب است که به مشخصات فاز مایع وابسته است [۷]. تبادل مومنتوم بین دو حالت مایع و بخار برای سوخت با در نظر گرفتن تأثیر نیروهای پسا و پخش آشفته‌گی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

C_D ضریب پسا، v_r سرعت نسبی بین دو فاز، C_{TD} ضریب پخش آشفته‌گی و همچنین K انرژی جنبشی آشفته‌گی است. A_i''' نیز بیانگر چگالی سطح مشترک بین دو حالت مایع و بخار است و برای مدل کاویتاسیونی پسا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

ضریب پسا نیز تابعی از عدد رینولدز حساب بوده و در اعداد رینولدز مختلف به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸]:

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

رویکرد مورد استفاده در شبیه‌سازی اسپری سوخت، رویکرد اوپلری - لاگرانژی است. برای فاز مایع، محاسبات مربوط به اسپری در محیط مهندسی بر پایه روش آماری قطره گسسته با حل کردن معادله‌های دیفرانسیل معمولی برای مسیر، مومنتوم، انتقال جرم و حرارت قطرات واحد که هر کدام از آنها عضو یک گروه قطرات بدون فعل‌وانفعال داخلی یکسان‌اند، انجام می‌شود [۹]. معادله بقای مومنتوم به صورت زیر است:

$$m_d \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{ig} + F_{ip} + F_{ib} \quad (11)$$

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





$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_a = -\frac{(r-r_a)}{C \cdot \tau_a} \quad (16)$$

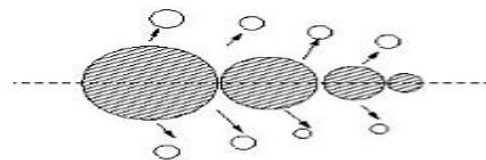
نرخ فروپاشی اغتشاش از مقیاس‌های طول اغتشاش r_T و زمان اغتشاش τ_T محاسبه می‌شود:

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

$$r_T = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{\varepsilon} \quad (18)$$

$$\tau_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (19)$$

در شکل ۳ شماتیک مدل تزریق گلوله در فروپاشی اولیه و در شکل ۴ شماتیک مدل موج مورد استفاده در فروپاشی ثانویه آورده شده است. در مدل موج مورد استفاده برای فروپاشی ثانویه توصیه شده است که قطر ابتدایی قطرات باید در حد قطر سوراخ نازل در نظر گرفته شود. در نازل با ورودی تیز به علت وقوع پدیده کاویتاسیون، قطر قطرات کوچک‌تر از قطر سوراخ نازل خواهد بود [۸].



شکل ۳- شماتیک مدل تزریق گلوله در فروپاشی اولیه [۸]



شکل ۴- شماتیک مدل موج در فروپاشی ثانویه [۸] با صرف نظر کردن از تأثیر پخش‌شدگی، معادله آشفتگی برای سوخت مایع به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{dk}{dt} = -\varepsilon + S_k \quad (20)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -C_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} (\varepsilon - S_\varepsilon) \quad (21)$$

در معادله‌های (۲۰) و (۲۱)، تأثیر وقوع کاویتاسیون با ترم S_k اعمال شده است. در مدل

موج (فروپاشی ثانویه) نرخ کاهش شعاع قطره اسپری نسبت به زمان به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{(r-r_{stable})}{\tau_a} \quad (22)$$

τ_a زمان فروپاشی مدل است و به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\tau_a = \frac{3.726 \cdot C_2 \cdot r}{\Lambda \cdot \Omega} \quad (23)$$

در معادله (۲۳)، ضریب ثابت C_2 زمان فروپاشی مدل را تصحیح می‌کند. r_{stable} شعاع نهایی قطره اسپری سوخت و متناظر با طول موج Λ مربوط به موج سریع‌ترین رشد را روی سطح قطره اسپری سوخت دارد. طول موج Λ و نرخ رشد موج Ω وابسته به مشخصات محلی سیال بوده و به صورت زیر بیان می‌شوند [۸]:

$$\Lambda = 9.02 \cdot r \frac{(1+0.45 \cdot oh^{0.5})(1+0.4 \cdot (Oh \cdot We^{0.5})^{0.7})}{(1+0.87 \cdot We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (24)$$

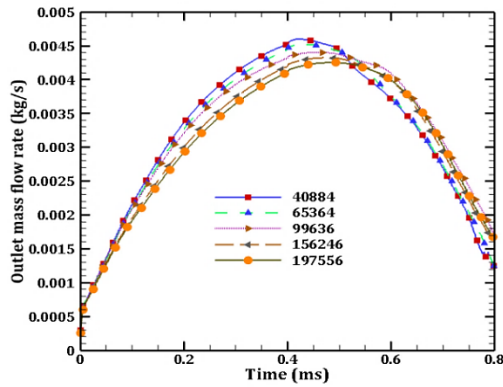
$$\Omega = \left(\frac{\rho_d r^3}{\sigma}\right)^{-0.5} \frac{0.34+0.38 \cdot We_g^{1.5}}{(1+Oh)(1+1.4 \cdot (Oh \cdot We^{0.5})^{0.6})} \quad (25)$$

در معادله‌های (۲۴) و (۲۵)، We عدد بدون بعد ویر و Oh عدد بدون بعد اونسورگ است [۹].

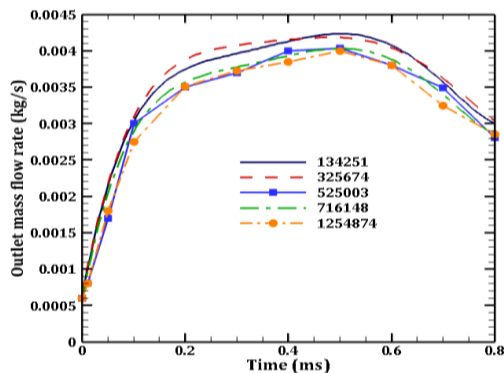
۳. محاسبه‌های عددی

۳-۱. انژکتور

به منظور بررسی تأثیر تغییر هندسه سوراخ نازل انژکتور بر شدت وقوع کاویتاسیون و مشخصات اسپری سوخت، ۴ عدد شیار دارای گام ۰/۱ میلی‌متر و ضخامت (ارتفاع) ۰/۰۴ میلی‌متر درون نازل انژکتور دیزل مورد نظر ایجاد شده است. سوراخ نازل مخروطی انژکتور CRII ساخت شرکت بوش آلمان به طول ۰/۷ میلی‌متر، قطر ورودی ۰/۱۴۳ میلی‌متر، قطر خروجی ۰/۱۳۰ میلی‌متر و همچنین شعاع منحنی ورودی سوراخ ۱۰ میکرومتر است. همچنین سوراخ نازل استاندارد انژکتور مورد نظر به قطر ورودی ۰/۱۳۰ میلی‌متر و شعاع منحنی ورودی ۲ میکرومتر

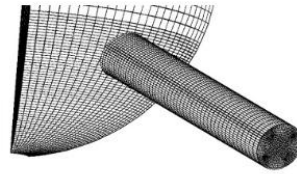


(الف)

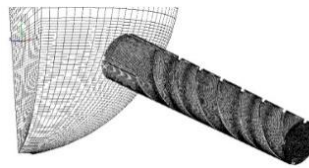


(ب)

است. شبکه محاسباتی انژکتور موردنظر در دو حالت دارای شیار و بدون شیار به صورت شکل ۵ است که با نرم افزار ای وی ال فایر انجام شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- شبکه بندی انژکتور دیزل، (الف) نازل استوانه ای بدون شیار و (ب) نازل مخروطی همگرا دارای شیار

شکل ۶- نتایج مربوط به مطالعه تأثیر اندازه شبکه محاسباتی مختلف بر دبی جرمی جریان سوخت خروجی از نازل انژکتور، (الف) نازل بدون شیار، (ب) نازل دارای شیار

جدول ۱- خواص سوخت دیزل و کروزنه دمای ۳۱۳ کلوین [۱۱]

نوع سوخت	سوخت دیزل	سوخت کراسین	حالت	
چگالی (kg/m ³)	۸۲۵	۵	مایع	بخار
لزجت (pa.s)	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۰۷
کشش	۰/۰۲۴	-	۰/۰۲۶	-
سطحی (N/m)	۱۰۰۰	-	۵۰۰	-
فشار بخار (pa)	-	-	-	-

با توجه به اختلاف فشار بالا بین ورودی و خروجی انژکتور و وقوع کاویتاسیون، جریان

در بررسی استقلال جواب از شبکه محاسباتی، به مطالعه تأثیر اندازه شبکه محاسباتی مختلف بر دبی جرمی جریان سوخت خروجی از نازل انژکتور در هر حالت پرداخته شده و نتایج حاصل در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل، در شبیه سازی انژکتور با نازل دارای شیار از ۷۱۶۱۴۸ سلول محاسباتی و در نازل بدون شیار از ۱۵۶۲۴۶ سلول محاسباتی استفاده شده است. به منظور بررسی نوع سوخت بر شدت وقوع کاویتاسیون و خصوصیات اسپری حاصل از سوخت های دیزل رایج در کشورهای اروپایی و کراسین (نفت چراغ) استفاده شده است که خواص آن ها در دمای ۳۱۳ کلوین در جدول ۱ آورده شده است [۹-۱۱]. نمودار پروفیل جابه جایی سوزن برحسب زاویه میلنگ (۱۶ درجه) در شکل ۷ آورده شده و سرعت دورانی موتور برابر ۳۷۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است [۹].

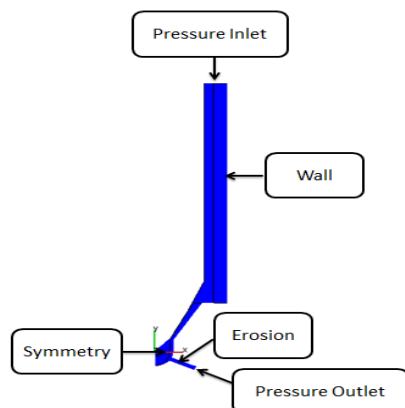
جدول ۲- شرایط اولیه و مرزی جریان سوخت درون انژکتور

شرایط	مقدار	مقدار/ نوع
شرایط اولیه	فشار: ۱۳۵۰ بار سرعت: ۰ متر بر ثانیه	دما: ۳۱۳ کلوین -
شرایط مرزی	فشار ورودی: ۱۳۵۰ بار فشار خروجی: ۱۰ بار	(نوع: فشار استاتیک) (نوع: فشار استاتیک)
	دما: ۳۱۳ کلوین	(نوع: حرارتی - دما)
	دیواره نازل: سایش	(نوع: دیواره - سایش)
	سایر دیواره‌ها: متقارن	(نوع: دیواره - متقارن)

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در سایش نازل انژکتور [۱۲]

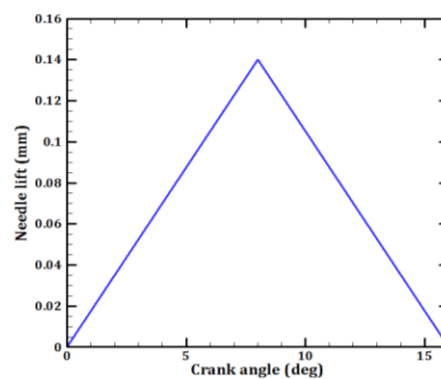
پارامتر	مقدار
جنس نازل انژکتور دیزل	Stainless Steel 316L
فاصله بحرانی برخورد حباب‌ها (متر)	5e-06
سرعت صوت (متر بر ثانیه)	1500
تنش تسلیم (پاسکال)	4e+08
تنش ماکزیمم (پاسکال)	1e+09

همچنین شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی انژکتور مورد نظر در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- شرایط مرزی در شبیه‌سازی انژکتور دیزل

دوفازی در نرم‌افزار فایر فعال‌سازی شده است. مدل آشفستگی مورد استفاده روش $k-\epsilon-f$ با رفتار تابع دیواره استاندارد برای تمامی مقادیر γ^+ در مدل آشفستگی مورد نظر است. شرایط مرزی و اولیه برای شبیه‌سازی انژکتور در تمامی حالت‌های مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به وقوع کاویتاسیون درون نازل انژکتور و خوردگی ناشی از آن، شرط مرزی دیواره نازل انژکتور به صورت سایش در نظر گرفته شده است [۱۲]. با وقوع کاویتاسیون درون نازل انژکتور، حباب‌ها هنگام ورود به مناطق پرفشار و ترکیدن آن‌ها باعث ایجاد تنش در سطوح فلزی می‌شود، که نتیجه آن اثر پدیده خستگی بر سطح فلزات، ایجاد سایش، خوردگی و در نتیجه کاهش طول عمر نازل می‌شود. عوامل مورد نیاز در شبیه‌سازی سایش نازل انژکتور و مقادیر مورد استفاده برای آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. فاصله بحرانی برخورد حباب‌ها مشخص‌کننده فاصله‌ای است که هنوز برخورد حباب‌ها اثرات مخرب دارند. در صورتی که برخورد حباب‌ها در یک سلول در خارج از این فاصله که از دیواره اندازه‌گیری می‌شود، صورت گیرد، اثرات مخرب آن بررسی نمی‌شود [۱۲]. همچنین برای کوپل فشار-مومنوم نیز از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

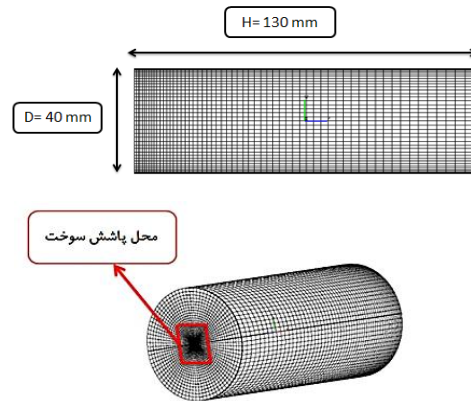


شکل ۷- پروفیل جابه‌جایی سوزن حسب زاویه میل‌لنگ [۱۰]



۳-۲. اسپری سوخت

به منظور مشاهده نتایج اسپری حاصل از هندسه‌های مختلف سوراخ نازل برای سوخت‌های متفاوت (دیزل و کراسین) از یک محفظه احتراق استوانه‌ای حجم ثابت که هندسه و ابعاد آن در شکل ۹ آورده شده، استفاده شده است [۹].



شکل ۹- هندسه و شبکه محاسباتی ایجاد شده برای محفظه احتراق

برای افزایش دقت محاسبات عددی در محل پاشش سوخت از شبکه‌بندی ریزتر و در نقاط دیگر از شبکه‌بندی نسبتاً درشتی استفاده شده است. مدت زمان کل تزریق سوخت ۰/۸ میلی ثانیه و گام زمانی مورد استفاده در حل از ۸-۱۰×۱۰ تا ۷-۱۰×۵ ثانیه با گام‌های کوچک‌تر در شروع مراحل ابتدایی شبیه‌سازی است [۷ و ۹ و ۱۳ و ۱۴]. شبیه‌سازی اسپری حاصل با توجه به نتایج بررسی استقلال حل از شبکه (طول نفوذ اسپری برای مقادیر متفاوت سلول محاسباتی) [۹ و ۱۳ و ۱۴]، در تعداد سلول محاسباتی ۲۴۸۰۰۰ صورت گرفته است. طول نفوذ فواره برابر فاصله بین سوراخ نازل و نوک فواره سوخت و قطر متوسط ساتر یک ذره برابر با قطر کره‌ای است که نسبت حجم به مساحت آن با نسبت حجم به مساحت ذره مورد نظر برابر است و کیفیت

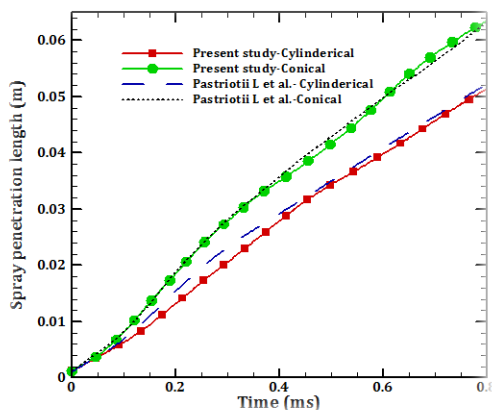
پودرسازی سوخت را نشان می‌دهد. سیال درون محفظه احتراق استوانه‌ای هوای متراکم (دارای فشار ۱۰ بار و دمای ۳۰۰ کلوین) است. مدل آشفتگی مورد استفاده روش k-zeta-f است. برای کوپل فشار-مومنتوم از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. شرایط ورودی و مرزی مورد نیاز برای شبیه‌سازی پاشش سوخت نیز در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- شرایط مرزی و مشخصات جریان سیال درون استوانه

مشخصه	توضیحات
نوع شرط مرزی	دیوار
تعداد سوراخ‌های نازل	۱
زاویه پاشش سوخت (درجه)	۰

۴. صحت‌سنجی نتایج مدل عددی

به منظور بررسی دقت نتایج عددی شبیه‌سازی انژکتور و اسپری حاصل، داده‌های طول نفوذ حاصل از شبیه‌سازی اسپری سوراخ نازل‌های استوانه‌ای و مخروطی همگرا با نتایج تجربی موجود [۱۵] مقایسه شده و نتایج حاصل در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به نتایج، تطابق خوبی بین نتایج حاصل به دست آمده و بیانگر دقت حل کد مورد نظر است.

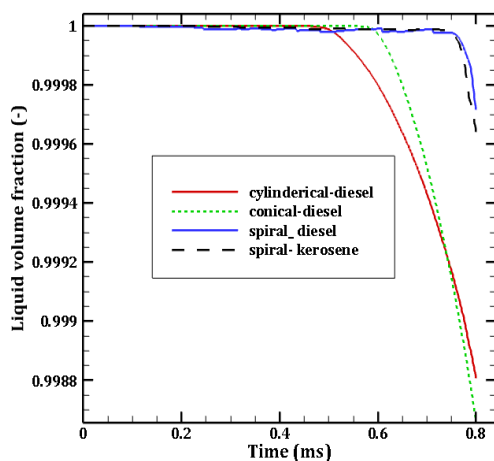


شکل ۱۰- اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج تجربی موجود [۱۵]

۵. بحث و بررسی نتایج

۵-۱. انژکتور

در نتیجه بیشتر بودن افت فشار جریان سوخت می‌باشد و لذا در این حالت با افزایش افت فشار درون نازل دارای شیار، پدیده کاویتاسیون با شدت نسبتاً بیشتری در آن رخ می‌دهد. همچنین در تمامی حالت‌ها، شدت وقوع کاویتاسیون برای نازل دارای شیار از سایر حالت‌ها کمتر است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از این نمودار، کاویتاسیون در نازل استوانه‌ای نسبت به سایر نازل‌ها (مخروطی دارای شیار و بدون شیار) سریع‌تر رخ داده (در زمان ۰/۵ میلی‌ثانیه) و بعد از آن در نازل مخروطی با اختلاف زمانی ۰/۱ میلی‌ثانیه (در زمان ۰/۶ میلی‌ثانیه) رخ می‌دهد. همچنین در نازل دارای شیار به دلیل افزایش تلفات اصطکاکی ناشی از حرکت چرخشی جریان سوخت مایع، فشار سیال رفته‌رفته افزایش یافته و در مدت زمان انتهایی پاشش سوخت کاویتاسیون به میزان اندکی رخ می‌دهد. در این حالت توزیع یکنواخت‌تری از فاز بخار را داریم.



شکل ۱۱- کسر حجمی فاز مایع محاسبه‌شده در حالت‌های مختلف هندسه نازل و نوع سوخت

می‌توان گفت در حالت کلی کاویتاسیون مهم‌ترین دلیل سایش، خوردگی، آسیب‌رسانی در لوله‌ها، پمپ‌ها و شیرها و نازل‌های سوخت است. ایجاد شیار و جریان چرخشی ناشی از آن، به کاهش شدت وقوع کاویتاسیون و به تأخیر

وقوع پدیده کاویتاسیون در فرایند پودرسازی سوخت مایع در انژکتورها بر خواص اسپری و عملکرد و آلاینده‌گی موتور تأثیرگذار و انکارناپذیر است. با وقوع کاویتاسیون و خوردگی ناشی از برخورد و ترکیدن حباب‌های آن، به نازل سامانه سوخت‌رسانی آسیب وارد شده و با افزایش شدت وقوع کاویتاسیون، آسیب وارد شده به نازل افزایش می‌یابد. بنابراین در مجموع می‌توان گفت که وقوع حد مطلوبی از کاویتاسیون مدنظر است. در این میان هندسه نازل سوخت تأثیر نسبتاً زیاد و قابل اهمیتی بر عملکرد سامانه سوخت‌رسانی و همچنین طول عمر نازل دارد. بدین منظور سوراخ نازل استوانه‌ای را به شکل مخروطی همگرا تغییر داده و از چهار شیار با مشخصات معلوم درون نازل مخروطی همگرا استفاده شده است. برای بررسی شدت وقوع کاویتاسیون درون سوراخ نازل انژکتور در هر حالت، کسر حجمی فاز مایع در در مدت زمان پاشش سوخت (۰/۸ میلی‌ثانیه) بررسی شده است. نمودار کسر حجمی فاز مایع درون نازل انژکتور برحسب مدت‌زمان پاشش برای انژکتور موردنظر در حالت‌های مختلف هندسه نازل سوخت در شکل ۱۱ آورده شده است. درصد فاز مایع مربوط (کسر حجمی فاز مایع در شکل ۱۱) مقدار میانگین از کل هندسه انژکتور در هر لحظه در طول مدت زمان پاشش سوخت است. با توجه به این نمودار در حالت‌های مختلف موردنظر کاویتاسیون با شدت‌های مختلفی رخ داده و با تغییر نوع سوخت، شدت وقوع کاویتاسیون تغییر کرده و در حالت نازل دارای شیار با سوخت کراسین نسبت به سوخت دیزل بیشتر رخ داده است. دلیل این امر بیشتر بودن لرزت سوخت کراسین نسبت به دیزل و



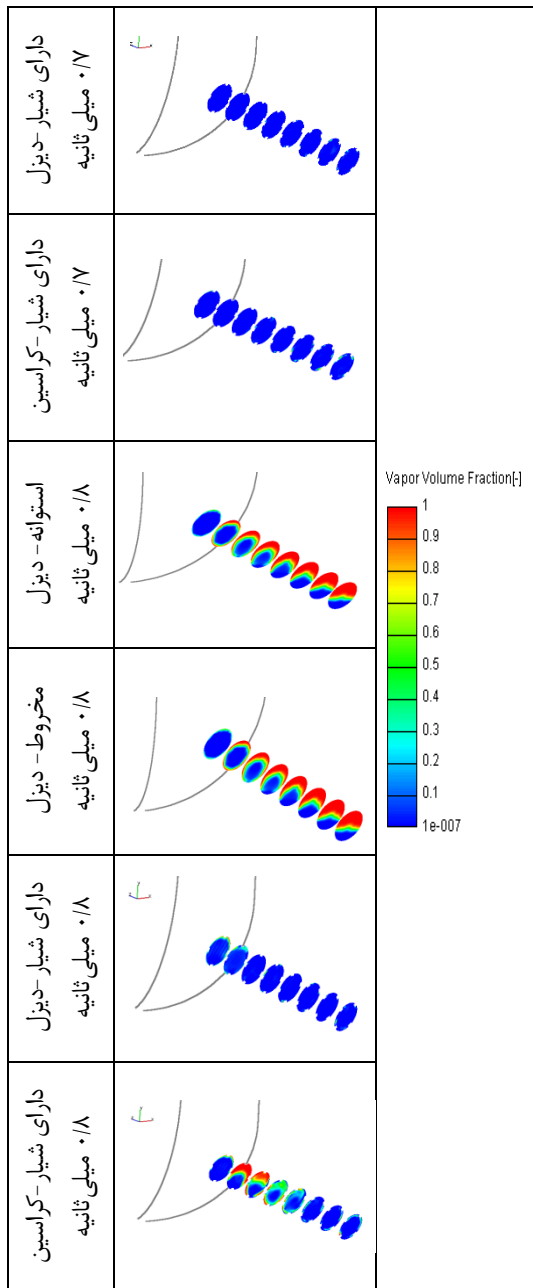
انداختن مدت زمان وقوع آن منجر می‌شود. در واقع علاوه بر پارامترهای فشار تزریق، فشار خروجی نازل و همچنین فشار بخار سوخت، تغییر هندسه نازل سیستم سوخت‌رسانی تأثیر مهمی بر شدت و زمان وقوع کاویتاسیون دارد.

نتایج مربوط به توزیع کسر حجمی فاز بخار درون سوراخ نازل انژکتور بدون شیار و دارای شیار برای سوخت‌های دیزل و کراسین در مدت‌زمان‌های پاشش ۰/۷ و ۰/۸ میلی‌ثانیه در شکل ۱۲ آورده شده است. با توجه به این شکل، در حالت نازل دارای شیار برای سوخت کراسین کاویتاسیون با شدت نسبتاً بیشتری رخ داده و شاهد نواحی نسبتاً بیشتری از فاز بخار نسبت به سوخت دیزل هستیم. همچنین در حالت سوراخ نازل بدون شیار شدت وقوع کاویتاسیون بیشتر است.

ضریب تخلیه یک پارامتر بی‌بعد است که به‌صورت نسبت دبی جرمی خروجی (عددی) به دبی جرمی نظری آن تعریف می‌شود [۷]:

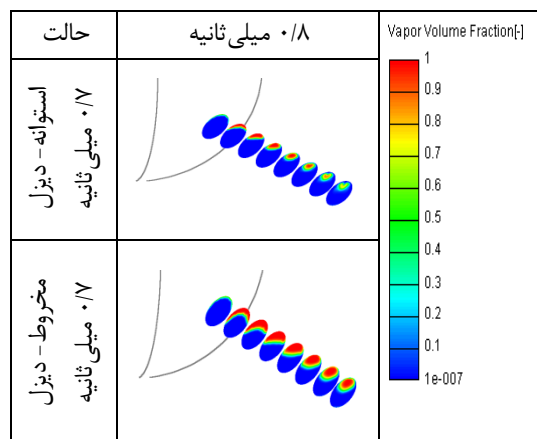
$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{th}} = \frac{\dot{m}}{A_{th} \sqrt{2\rho_f \Delta p}} \quad (26)$$

در معادله (۲۶)، \dot{m} دبی جرمی عددی است که از شبیه‌سازی جریان سوخت درون انژکتور محاسبه می‌شود. A_{th} سطح مقطع خروجی نازل، ρ_f چگالی سوخت در فاز مایع و Δp اختلاف فشار بین ورودی و خروجی انژکتور است.



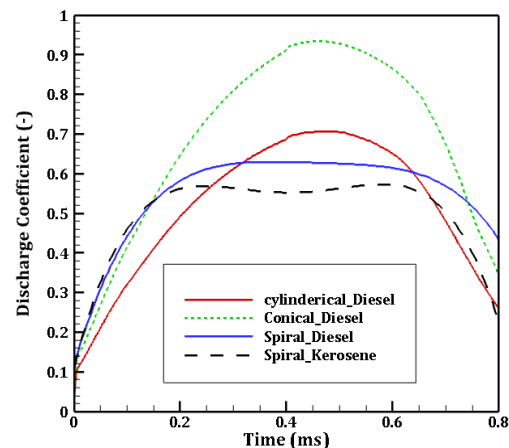
شکل ۱۲- کانتور کسر حجمی فاز بخار درون نازل در حالت‌های مختلف هندسه نازل و نوع سوخت در مدت زمان ۰/۷ و ۰/۸ میلی‌ثانیه

نتایج مربوط به ضریب تخلیه در مدت زمان پاشش سوخت برای هر حالت مختلف در شکل ۱۳ آورده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش شدت وقوع کاویتاسیون، ضریب تخلیه کاهش و با کاهش شدت وقوع این پدیده، عدم توسعه یا توسعه کمتر حباب‌های بخار تشکیل شده تا خروجی نازل، ضریب تخلیه افزایش





می‌یابد. در واقع وقوع و توسعه کاویتاسیون تا خروجی نازل به کاهش سطح مقطع خروجی نازل منجر شده و شدت وقوع کاویتاسیون تأثیر بسزایی بر مقدار این ضریب دارد. در حالت نازل دارای شیار، جریان چرخشی ایجاد شده به افزایش تلفات اصطکاکی درون نازل سوخت منجر شده و در نتیجه دبی جرمی سوخت خروجی و ضریب تخلیه آن نسبت به حالت بدون شیار (استوانه و مخروط همگرا) کاهش می‌یابد. در حالت یکسان برای نازل دارای شیار، برای سوخت کراسین کاویتاسیون با شدت بیشتری رخ داده و در نتیجه دبی جرمی سوخت و ضریب تخلیه آن نسبت به سوخت دیزل کمتر است. همچنین با توجه به نتایج حاصل در این قسمت، در مدت زمان اواسط پاشش (۰/۴ میلی‌ثانیه) ایجاد شیار منجر به کاهش ضریب تخلیه به میزان ۷ درصد برای سوخت دیزل و به کاهش ضریب تخلیه به میزان ۷/۵ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای منجر می‌شود.



شکل ۱۳- ضریب تخلیه محاسبه شده در خروجی نازل برای حالت‌های مختلف هندسه نازل و نوع سوخت

در مدت زمان انتهایی پاشش (۰/۸ میلی‌ثانیه) ایجاد شیار باعث افزایش ضریب تخلیه به میزان ۷۳ درصد برای سوخت دیزل و کاهش ضریب

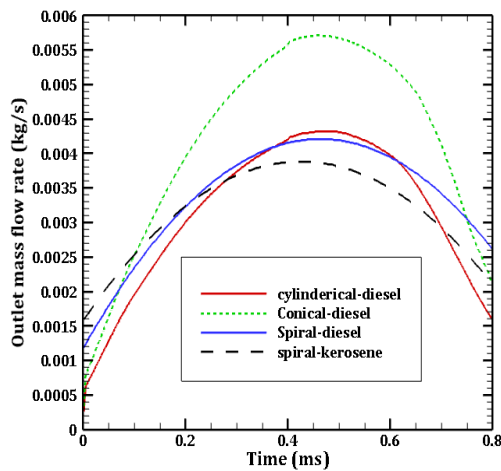
تخلیه به میزان ۵۴ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای می‌شود.

۵-۲. اسپری سوخت

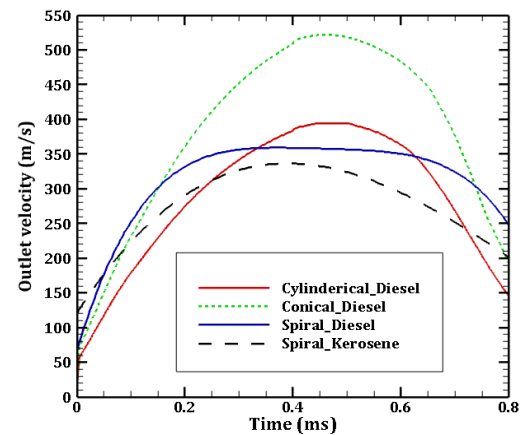
به منظور بررسی و تحلیل تأثیر ایجاد شیار درون سوراخ نازل انژکتور بر رفتار هیدرودینامیکی اسپری سوخت‌های دیزل و کراسین به مقایسه طول نفوذ، قطر متوسط ذرات و زاویه مخروطی اسپری که از مهم‌ترین مشخصه‌های اسپری سوخت در موتورهای اشتعال تراکمی هستند و بر عملکرد آن‌ها مانند میزان توان تولیدی، آلاینده‌های خروجی به خصوص اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن، مصرف سوخت ویژه و سایر پارامترها تأثیرگذار هستند، در هر قسمت پرداخته شده است. در شکل ۱۴ نمودار مربوط به سرعت متوسط خروجی نازل و در شکل ۱۵ نمودار مربوط به دبی جرمی خروجی در هر حالت مورد نظر آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها، ایجاد شیار باعث کاهش سرعت محوری و افزایش سرعت شعاعی جریان سوخت و افزایش تلفات اصطکاکی جریان سوخت درون نازل شده و در نتیجه آن، سرعت متوسط در خروجی نازل کاهش می‌یابد. همچنین کاهش سرعت متوسط در خروجی نازل به کاهش دبی جرمی خروجی آن منجر می‌گردد. همچنین در حالت نازل دارای شیار برای سوخت کراسین دبی جرمی و سرعت متوسط خروجی نسبت به دیزل کمتر است. دلیل این امر افزایش شدت وقوع کاویتاسیون برای سوخت کراسین به دلیل بیشتر بودن لزجت و در نتیجه افزایش افت فشار سوخت مایع درون نازل است. با افزایش شدت وقوع کاویتاسیون، مقدار بیشتری از سوخت تبدیل به بخار شده و در نتیجه دبی جرمی خروجی آن کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج حاصل در این قسمت (سرعت

متوسط خروجی)، در مدت زمان اواسط پاشش (۰/۴ میلی ثانیه) ایجاد شیار موجب کاهش سرعت متوسط خروجی به میزان ۵ درصد برای سوخت دیزل و کاهش سرعت متوسط خروجی به میزان ۷ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای می‌شود. در مدت زمان انتهایی پاشش (۰/۸ میلی ثانیه) ایجاد شیار باعث افزایش سرعت متوسط خروجی به میزان ۸۰ درصد برای سوخت دیزل و کاهش سرعت متوسط خروجی به میزان ۵۲ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای می‌شود. همچنین با توجه به نتایج حاصل در این قسمت (دبی جرمی خروجی)، در مدت زمان اواسط پاشش (۰/۴ میلی ثانیه) ایجاد شیار منتهی به کاهش دبی جرمی خروجی به میزان ۵ درصد برای سوخت دیزل و کاهش دبی جرمی خروجی به میزان ۲/۵ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای می‌شود. در مدت زمان انتهایی پاشش (۰/۸ میلی ثانیه) ایجاد شیار به افزایش دبی جرمی خروجی به میزان ۸۰ درصد برای سوخت دیزل و کاهش دبی جرمی خروجی به میزان ۴۹ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای منجر می‌شود.

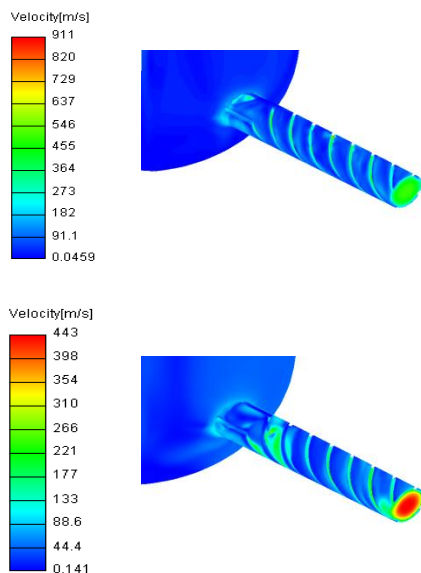
در شکل ۱۶ کانتور مقدار سرعت برای نازل دارای شیار با سوخت‌های دیزل و کراسین در مدت زمان انتهایی پاشش آورده شده است. در شکل ۱۷ نتایج مربوط به طول نفوذ اسپری و در شکل ۱۸ نتایج مربوط به قطر متوسط ریز ذرات سوخت در هر حالت آورده شده است. لزجت سوخت و سرعت پاشش آن، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر طول نفوذ اسپری هستند.



شکل ۱۵- دبی جرمی محاسبه شده در خروجی نازل برای حالت‌های مختلف هندسه نازل و نوع سوخت



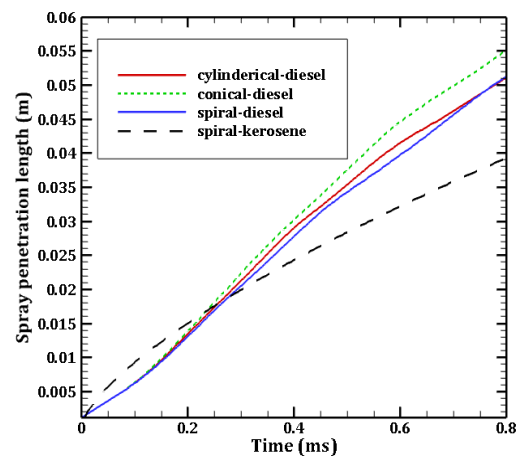
شکل ۱۴- سرعت متوسط محاسبه شده در خروجی نازل برای حالت‌های مختلف هندسه نازل و نوع سوخت



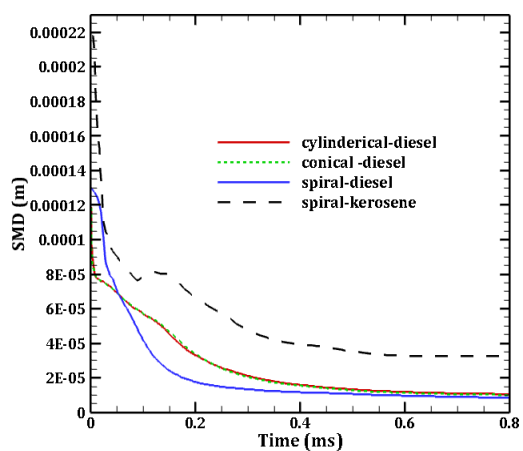
شکل ۱۶- کانتور مقدار سرعت درون نازل انژکتور در مدت زمان انتهایی پاشش (۰/۸ میلی ثانیه) برای سوخت دیزل (بالا) و کراسین (پایین)



با توجه به رابطه بنیادی اوایلر و همچنین رابطه تکمیل شده برنولی، در شرایط یکسان عملکرد انژکتور، سوختی که لزجت بیشتری داشته باشد، سرعت کمتری خواهد داشت. با توجه به نتایج شکل‌های ۱۵ و ۱۶، پس از طی مدت زمانی از شروع تزریق سوخت به درون محفظه احتراق، سوختی که اندازه قطرات بزرگ‌تری دارد، نیروی پسای بیشتری بر آن وارد شده و در نتیجه طول نفوذ آن کاهش می‌یابد. نیروی پسای وارده بر ذرات سوخت به‌عنوان یک عامل مقاوم برای اسپری سوخت محسوب می‌شوند.



شکل ۱۷ - طول نفوذ اسپری محاسبه‌شده در حالت‌های مختلف هندسه نازل و نوع سوخت



شکل ۱۸ - قطر متوسط ذرات محاسبه‌شده در حالت‌های مختلف هندسه نازل و نوع سوخت

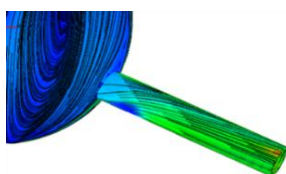
کشش سطحی عاملی است که به افزایش یا کاهش قطر ذرات اسپری سوخت منجر می‌شود. در این میان متغیر بااهمیت، عدد بدون بعد وبر است که نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$We = \frac{\rho_g u_{rel}^2 D_n}{\sigma_l} \quad (27)$$

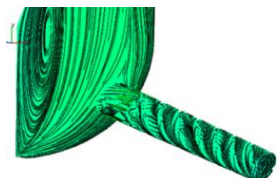
در رابطه (۲۷)، u_{rel} سرعت نسبی بین ذرات فواره و هوای متراکم درون محفظه احتراق است. با توجه به داده‌های جدول ۱ موجود در این مقاله، سوخت کراسین کشش سطحی بیشتری نسبت به دیزل دارد و در نتیجه آن تمایل کمتری به فروپاشی فواره داشته و در این حالت قطر ریز ذرات آن نسبت به دیزل بیشتر است. به دلیل بیشتر بودن قطر ذرات کراسین، نیروی پسای وارده بر سوخت در این حالت افزایش یافته و در نتیجه آن طول نفوذ اسپری سوخت کراسین کاهش می‌یابد. در برهم‌کنش سوخت و هوای درون محفظه احتراق، سیالی که سرعت بیشتری داشته باشد، شاهد مقاومت بیشتری از طرف هوای اطراف خواهد بود. سوخت دیزل نیز به دلیل کمتر بودن کشش سطحی، تمایل بیشتری به فروپاشی و تجزیه قطرات سوخت دارد، که در این حالت قطر ریز ذرات موردنظر و نیروی پسای وارده بر آن‌ها کاهش و طول نفوذ آن افزایش یافته است.

همچنین با توجه به نتایج حاصل در این قسمت (طول نفوذ اسپری)، در مدت‌زمان اواسط پاشش (۰/۴ میلی‌ثانیه) ایجاد شیار به کاهش طول نفوذ به میزان ۳/۵ درصد برای سوخت دیزل و کاهش طول نفوذ به میزان ۱۴ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای منجر می‌شود. در مدت‌زمان انتهایی پاشش (۰/۸ میلی‌ثانیه) ایجاد شیار به کاهش طول نفوذ به میزان ۶ درصد برای سوخت دیزل و کاهش طول نفوذ به میزان ۲۲

به حالت نازل بدون شیار افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

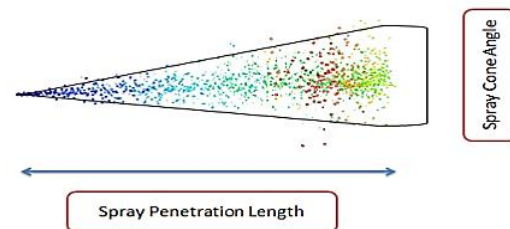
شکل ۲۰- ساختار خطوط جریان درون نازل بدون جریان چرخشی (الف) و دارای جریان چرخشی (ب)

با توجه به این شکل، اسپری سوخت کراسین نسبت به دیزل در حالت نازل دارای شیار، دارای زاویه مخروطی بیشتری است. دلیل این امر بیشتر بودن شدت وقوع کاویتاسیون و کشش سطحی برای سوخت کراسین نسبت به سوخت دیزل است. با افزایش شدت وقوع کاویتاسیون برای سوخت کراسین در حالت نازل دارای شیار، بخارات تولیدشده با آزادی بیشتری از قطرات مایع مشابه حرکت می‌کنند که این حالت به افزایش زاویه مخروطی اسپری برای کراسین منجر می‌شود. همچنین بیشتر بودن کشش سطحی به ناهموار بودن شکل اسپری و در نتیجه افزایش زاویه مخروطی آن منجر می‌شود. در حالت کلی با ایجاد شیار درون نازل انژکتور و جریان چرخشی ناشی از آن، با افزایش شدت توربولانسی و بهبود اختلاط آن، قطر ریز ذرات اسپری سوخت دیزل نسبت به حالت بدون جریان چرخشی کاهش یافته و کیفیت پودرسازی سوخت افزایش می‌یابد که می‌تواند به افزایش راندمان احتراق منجر شود. همچنین کاهش طول نفوذ در این حالت، از برخورد اسپری سوخت با دیواره سیلندر که به تر شدن آن و افزایش

درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای منجر می‌شود. همچنین با توجه به نتایج حاصل در این قسمت (قطر متوسط ذرات)، در مدت‌زمان اواسط پاشش (۰/۴ میلی‌ثانیه) ایجاد شیار به کاهش قطر متوسط ذرات به میزان ۲۷ درصد برای سوخت دیزل و کاهش قطر متوسط ذرات به میزان ۱۱/۵ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای منجر می‌شود.

در مدت‌زمان انتهایی پاشش (۰/۸ میلی‌ثانیه) ایجاد شیار منجر به کاهش قطر متوسط ذرات به میزان ۱۸/۵ درصد برای سوخت دیزل و افزایش قطر متوسط ذرات به میزان ۵/۵ درصد برای سوخت کراسین نسبت به نازل استوانه‌ای منجر می‌شود.

در شکل ۱۹ شماتیک اسپری سوخت خروجی از نازل انژکتور و نام‌گذاری مشخصه‌های مختلف آن آورده شده است.



شکل ۱۹- شماتیک اسپری خروجی از نازل انژکتور و نام‌گذاری مشخصه‌های آن

همچنین ساختار مربوط به خطوط جریان برای هر حالت نازل (بدون جریان چرخشی و دارای جریان چرخشی) در شکل ۲۰ آورده شده است.

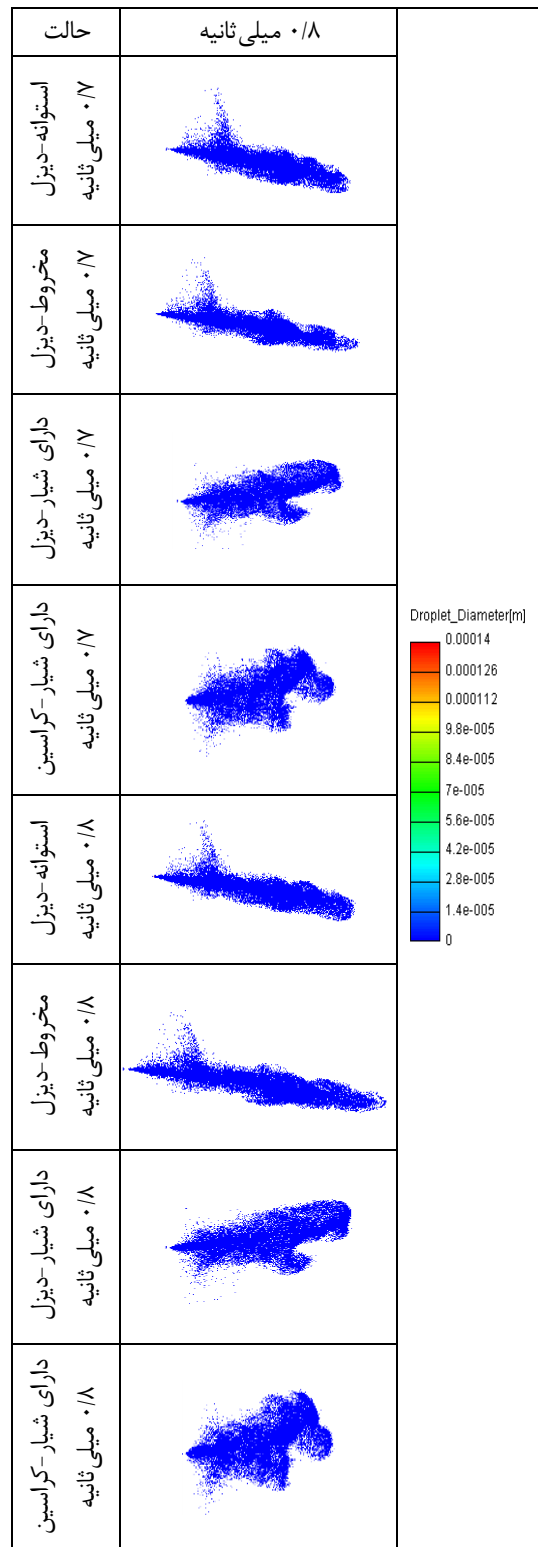
نتایج مربوط به ساختار اسپری محاسبه‌شده درون محفظه احتراق استوانه‌ای حجم ثابت در هر حالت در زمان پاشش ۰/۷ و ۰/۸ میلی‌ثانیه در شکل ۲۱ آورده شده است. با توجه به این شکل، با ایجاد شیار درون نازل انژکتور و ایجاد جریان چرخشی درون آن، زاویه مخروطی اسپری نسبت



هیدروکربن‌های نسوخته منجر می‌شود، تا حدی جلوگیری می‌کند.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، در دو قسمت تأثیر ایجاد شیار درون نازل انژکتور دیزل سیستم ریل مشترک بر جریان داخلی، رفتار هیدرودینامیکی اسپری سوخت‌های دیزل و کراسین با کمک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی ای وی ال فایر بررسی شده است. نتایج عددی با داده‌های تجربی موجود در این زمینه اعتبار سنجی شده و تطابق خوبی بین آن‌ها مشاهده شده است. در ادامه به‌منظور بهبود مشخصات اسپری، ایجاد جریان چرخشی و افزایش شدت توربولانسی درون محفظه احتراق به ایجاد شیار با مشخصات معلوم برای سوخت‌های موردنظر (دیزل رایج در کشورهای اروپایی و کراسین) پرداخته شده است. نتایج عددی حاصل نشان می‌دهند که شدت وقوع کاویتاسیون برای سوخت کراسین نسبت به دیزل بیشتر است که دلیل آن افت فشار بالاتر به دلیل بیشتر بودن لزجت این سوخت می‌باشد. در بررسی مشخصات اسپری سوخت‌های مختلف (دیزل و کراسین) مشخص شد که استفاده از شیار برای سوخت کراسین به افزایش زاویه مخروطی اسپری، کاهش طول نفوذ و کیفیت پودرسازی آن نسبت به دیزل منجر می‌شود. کاهش طول نفوذ اسپری و کیفیت پودرسازی کراسین به دلیل بیشتر بودن کشش سطحی و لزجت آن است. بنابراین هندسه و مشخصات شیارهای ایجادشده تأثیر مهمی بر خواص اسپری سوخت و کیفیت پودرسازی آن دارند و خواص اسپری از طریق تغییر مشخصات شیار ایجادشده قابل کنترل هستند. همچنین با ایجاد شیار درون نازل انژکتور و تغییر سوخت، شدت وقوع کاویتاسیون کاهش یافته که می‌تواند به کاهش ساییدگی و خوردگی سطح نازل منجر شود که می‌تواند به افزایش طول عمر نازل‌های سوخت و



شکل ۲۱- ساختار افشانه محاسبه‌شده در خروجی نازل برای حالت‌های مختلف هندسه نازل و نوع سوخت

- [4] A.H. Farajollahi, and M. Firuzi, Numerical investigation on the effect of creating swirly flow inside the nozzle and injection pressure increase on the cavitation and diesel fuel spray characteristics, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 51, No. 3, pp. 155-164, 2021, URL: https://tumechj.tabrizu.ac.ir/article_10929.html
- [5] 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.
- [6] M. Jabbarzadeh, P. Jabbarzadeh, and M. Shervani-Tabar, Numerical comparison of physical conditions effect on spray behavior of dimethyl ether, biodiesel and diesel fuels. *JER*. 2014; 35 (35): 17-29, URL: <http://engineersearch.ir/article-1-436-fa.html>
- [7] Avl List GmbH. AVL Fire v. 2013, *CFD solver, Eulerian multiphase*, 2013.
- [8] Avl List GmbH. AVL Fire v. 2013, *CFD solver, Spray*, 2013.
- [9] A.H. Farajollahi, M. Firuzi, M. Pourseifi, A. Mardani, and M. Rostami, Numerical investigation of the effect of swirl and needle lift profile change on the diesel fuel spray behavior. *JER*. 2019; 54 (54): 25-38, URL: <http://engineersearch.ir/article-1-692-a.html>.
- [10] H. Mohammadi, P. Jabbarzadeh, M. Jabbarzadeh, and M.T. Shervani-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 likeguides, *Fuel*, Vol. 196, No. 5, pp. 419-430, 2017.
- [11] R.H. Perry, and D.W. Green, *Perry's chemical engineer's handbook*, McGraw-Hill, 1997.
- [12] N. Berchiche, J.P. Franc, and J.M. Michel, 2A Cavitation Erosion Model

بهبود مشخصات احتراق و آلاینده‌گی موتور از طریق بهبود مشخصات اسپری سوخت‌های مختلف منجر شود. همچنین با کاهش طول نفوذ اسپری برای نازل دارای شیار، مقدار برخورد اسپری با دیواره موتور کاهش یافته و در نتیجه آن مقدار آلاینده‌گی و هیدروکربن‌های نسوخته نسبت به نازل استوانه‌ای کاهش و راندمان احتراق، مکانیکی و حرارتی موتور افزایش می‌یابد. همچنین نازل دارای شیار نیز می‌تواند به‌عنوان طرحی مناسب برای کاهش میزان رسوب و گرفتگی درون نازل به علت حرکت چرخشی جریان دوفازی سوخت در پژوهش‌های آینده مورد مطالعه و بررسی بیشتر و دقیق‌تر قرار بگیرد. سختی به‌کارگیری روش‌های مختلف برای ساخت یا اعمال تغییرات برای ایجاد انژکتور جریان چرخشی با ایجاد شیار درون نازل با مشخصات معلوم نیز یکی از چالش‌های مطرح‌شده در این زمینه است.

۷. مآخذ

- [1] R. HEMATIAN, J. massah, S.R. Hassan-beygi, and A. Hajjalimohammadi, Numerical and experimental investigation of common rail fuel injection system and evaluating influence of fuel pressure on injection characteristics and pressure fluctuations. *JER*. 2020; 59 (59): 63-72, URL: <http://engineersearch.ir/article-1-708-fa.html>.
- [2] N. Akbari, Experimental and Analytical Study of Performance Characteristics of Pressure-Swirl Duplex Injector, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 3, pp. 29-37, 2019, URL: https://tumechj.tabrizu.ac.ir/article_8984.html
- [3] M. Mahdi, and M. Salari, Numerical Analysis of the Effects of Needle Lift and Seat on the Cavitation Flow in the Diesel Injector Nozzle, *Fuel and Combustion*, Vol. 8, pp. 55-70, URL: http://www.jfnc.ir/article_46208.html



for Ductile Materials, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, pp. 601-606, 2002.

- [13] A.H. Farajollahi and R. Firuzi, Numerical investigation on the effect of creating grooves inside the injector nozzle on the diesel and biodiesel engine fuels spray behavior, *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, Vol. 2, No. 9, pp. 65-76, 2021, URL: http://www.astjournal.ir/article_44827.html.
- [14] 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*. 2020; 16 (32):47-58, URL: <http://marine-eng.ir/article-1-827-fa.html>.
- [15] L. Postrioti, C.N. Grimaldi, M.Ceccobello, and D.R. Gioia, Diesel common rail injection system behavior with different fuels, SAE Technical paper 2004-01-0029, 2004.

۸. پی نوشت

- 1- Discrete Droplet Method (DDM)
- 2- Blob Injection
- 3- Needle Lift
- 4- Erosion

۸۸

سال ۱۰ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

نشریه علمی دانش و
فناوری هوا فضا



مطالعه عددی تأثیر ایجاد شیار درون اریفیس انژکتور موتور اشتعال
تراکمی بر رفتار اسپری و کیفیت پودر سازی سوخت های دیزل و...