



بررسی عددی پدیده کاویتاسیون در انژکتور روی رفتار اسپری سوخت دیزل

نوزر اکبری^{1*}، سعید عزیزی حسنکلو²

1- استادیار، مهندسی هوا فضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تهران، صندوق پستی 1384673411، nozar@ssau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 دی 1396

پذیرش: 10 بهمن 1396

ارائه در سایت: 10 اسفند 1396

کلید واژگان:

هندسه انژکتور

پدیده کاویتاسیون

افشانه سوخت

چکیده

در موتورهای دیزل تزریق مستقیم، هندسه نازل به علت تاثیرگذاری روی جریان داخلی، پدیده کاویتاسیون، مشخصات اسپری سوخت و رفتار اتمیزاسیون به عنوان یک موضوع مهم برای تحقق کنترل انتشار گاز است که برای عملکرد موتورها و تشکیل آلاینده بسیار مهم است. هدف این مقاله بررسی عددی تاثیر پدیده کاویتاسیون روی رفتار اسپری دیزل از قبیل طول نفوذ افشانه و قطر متوسط ساتر است. برای ایجاد پدیده کاویتاسیون و بررسی تاثیر آن روی مشخصات اسپری سوخت از دو انژکتور مشابه با سطح مقطع ورودی نازل متفاوت استفاده شده است و جریان مایع درون آن‌ها و رفتار اسپری حاصل از آن‌ها بررسی شده است (این کار با تغییر محل نازل روی بدنه انژکتور انجام شده است). برای شبیه‌بندی و شبیه‌سازی و حل معادلات بقا از نرم‌افزار ای وی ال فایر استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با قرار دادن نازل در قسمت پایین‌تر کیسه انژکتور میزان کسر حجمی فاز بخار افزایش یافته و رشد پدیده کاویتاسیون زیادتر می‌شود. همچنین نتایج اسپری نشان می‌دهد که طول نفوذ افشانه برای سوراخ نازل پایین‌تر افزایش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه این است که تغییر قابل توجهی در اندازه قطرات اسپری برای هر دو انژکتور دیده نمی‌شود. و مهم‌تر از همه، طول نفوذ افشانه سوخت با تغییر محل سوراخ نازل انژکتور می‌تواند کنترل شود.

Numerical investigation of the cavitation phenomenon on spray behavior of diesel fuel in injector

Nozar Akbari^{1*}, Saeid Azizi Hasanakloo²

1- Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 1384673411, Tehran, Iran, nozar@ssau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 31 December 2017

Accepted 30 January 2018

Available Online 01 March 2018

Keywords:

Injector geometry

cavitation phenomenon

fuel spray

ABSTRACT

In direct injection diesel engines, diesel nozzle geometry is a major issue in order to fulfill control of emission due to the influence on internal flow, cavitation phenomenon, spray characteristics and therefore atomization behavior, which are very important for engines performance and pollutant formation. The aim of this article is to study the effect of cavitation on Diesel spray behavior such as spray penetration lengths and sauter mean diameter. In this study To create a cavitation phenomenon and to investigate its effect on the fuel spray characteristics two similar injector different in the inlet cross section nozzle have been considered and their internal liquid flow and the behavior of their resulted sprays have been investigated(this has been done by moving nozzle on the injector body). AVL-Fire CFD code has been used for meshing and simulating and solving the conservation equations. The results show that by placing the nozzle hole in lower part of the injector sac, the volume fraction of the vapor phase increases. So the growth of the cavitation phenomenon increases. Also the results of the spray show that the spray penetration length for lower nozzle hole increases. An interesting point is that there is no significant change in the size of the spray droplet for two injectors. Most importantly, the spray penetration length can be controlled by place of nozzle hole.

1- مقدمه

برای کنترل و تنظیم گازهای آلاینده موتورها، هندسه نازل انژکتور به عنوان یک عامل مهم در بهبود کیفیت سوخت و بازده موتور شناخته می‌شود [1-3]. پارامترهای هندسی انژکتور که در مشخصات افشانه سوخت تاثیر گذارند عبارتند از قطر اریفیس، طول اریفیس، تعداد اریفیس، موقعیت اریفیس و زاویه بین اریفیس‌ها [4-6]. هدف اصلی بررسی افشانه، فهمیدن چگونگی تاثیر افشانه سوخت روی مشخصات احتراق و گازهای خروجی است. در مطالعات گذشته مشخصات احتراق هندسه نازل‌های مختلف از قبیل قطر نازل، ضریب k و ... مورد بررسی قرار گرفته است. برگ استراند 5 نوع نازل با شکل‌های

امروزه افزایش نگرانی‌ها برای حفاظت از محیط زیست باعث شده است که کاهش گازهای آلاینده و احتراق سوخت یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی موتورهای دیزل شود. اساس طراحی موتورهای دیزل، جریان داخلی نازل و افشانه سوخت و در نتیجه آن ترکیب سوخت-هوا می‌باشد. تاثیر مشخصات نازل انژکتور بر روی اتمیزاسیون افشانه و فرایند ترکیب سوخت-هوا، که مستقیماً روی احتراق و گازهای خروجی تاثیر می‌گذارد کاملاً مشهود است. امروزه در کنار به‌کار بردن انواع سوخت‌های مختلف و سیستم‌های مختلف

Please cite this article using:

N. Akbari, S. Azizi Hasanakloo, Numerical investigation of the cavitation phenomenon on spray behavior of diesel fuel in injector, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 189-196, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شروانی تبار و همکاران [10]، تاثیر نسبت شعاع منحنی ورودی اریفیس به قطر اریفیس را روی پدیده کاویتاسیون بررسی کردند، آن‌ها گزارش دادند که افزایش این نسبت منجر به کاهش ترکیدن حباب‌های کاویتاسیون می‌شود و این باعث افزایش قطر متوسط ذرات افشانه می‌شود. در مقاله دیگری شروانی تبار و همکاران، از خان در درون اریفیس استفاده کردند نتایج نشان داد زاویه پاشش افشانه در این حالت افزایش می‌یابد [11]. برای سیستم های تزریق فشار بالا، پدیده کاویتاسیون در داخل نازل انژکتور برای عملکرد کلی (بخصوص روی مشخصات جریان انژکتور) بسیار مهم می‌باشد به طوری که نمی‌توان تاثیر آن را در طراحی انژکتور نادیده گرفت. رفتار هیدرودینامیکی سیال در درون انژکتور موجب ایجاد پدیده کاویتاسیون و بروز توربولانس می‌شود که می‌تواند افشانه و اتمیزاسیون را بهبود دهد و زاویه پاشش را افزایش دهد [1-15,12]. سان و همکاران برای بررسی تاثیر کاویتاسیون روی اتمیزاسیون سوخت دیزل و بیودیزل، نازل‌هایی با نسبت طول به قطر متفاوت را آزمایش کردند آن‌ها پی بردند کاویتاسیون در نازل اریفیس، اتمیزاسیون سوخت را بهبود می‌دهد همچنین نسبت طول به قطر اریفیس بزرگتر نیز اتمیزاسیون سوخت را بهبود می‌بخشد [14,16]. خسروی و انصاری با بررسی تاثیر پارامترهای موثر روی طول شکست اولیه جت سیال نشان دادند که با افزایش قطر خروجی، طول شکست افزایش و با کاهش آن طول شکست کاهش می‌یابد همچنین نشان دادند با افزایش قطر خروجی به علت تغییر عدد وبر ممکن است رژیم جریان تغییر کند [17]. سهرابی و همکاران تاثیر تعداد سوراخ های نازل بر جریان داخل نازل و پدیده کاویتاسیون را بررسی کردند آن‌ها گزارش دادند با افزایش تعداد سوراخ های نازل ساختار جریان درون کیسه نازل بشدت تغییر می‌کند، از نقطه نظر مشخصه های جریان درون نازل، با تعداد سوراخ های نازل، سرعت تزریق و دبی جرمی کاهش و شدت کاویتاسیون افزایش می‌یابد [18]. جبارزاده و همکاران طول نفوذ افشانه سوخت دیزل در نازل های استوانه ای و مخروطی را بررسی کردند آن‌ها گزارش دادند در زمان های ابتدایی پاشش، نوع نازل تاثیر چندانی روی طول نفوذ نوک افشانه ندارد، هر چند به طور کلی، نازل های مخروطی طول نفوذ بیشتری را در مقایسه با نازل استوانه ای در اختیار قرار می‌دهند. با گذشت زمان، اختلاف بین رفتار نازل‌ها مشهودتر شده و نهایتاً، طول نفوذ نوک افشانه نازل مخروطی واگرا بیشتر از نازل مخروطی همگرا و آن نیز بیشتر از نازل استوانه ای می‌شود [19].

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد، مطالعات زیادی روی عوامل تاثیر گذار در جریان داخل نازل و پدیده کاویتاسیون انجام شده است، اما تاکنون تاثیر محل اریفیس در نحوه شکل گیری کاویتاسیون در داخل نازل انژکتور و تاثیر آن بر جریان داخل نازل و شکل گیری افشانه انجام نشده است. در کار حاضر با تغییر محل اریفیس روی انژکتور تاثیر آن روی وقوع پدیده کاویتاسیون در داخل نازل انژکتور و رفتار هیدرودینامیکی جریان داخل نازل و در نتیجه روی شکل گیری افشانه را بررسی می‌کنیم.

2- مدل محاسباتی

برای شبیه سازی پدیده کاویتاسیون در داخل نازل با در نظر گرفتن جریان چند فازی، از مدل اوپلر- اوپلر استفاده شده است، در این مقاله از جریان دو فازی استفاده شده است که شامل دیزل مایع و دیزل بخار می‌باشد. نتایج حاصل از محاسبات جریان داخل نازل در مقطع خروجی اریفیس ذخیره شده و برای شبیه سازی افشانه به عنوان داده های ورودی مورد استفاده قرار گرفته است. برای شبیه سازی افشانه تقریب اوپلر- لاگرانژ به کار برده می‌شود. در این

مختلف را بررسی کرد نتایج نشان داد نازل مخروطی همگرا به طور کلی دوده- های خروجی کمتر، گاز نیتروژن اکسید کمتر و مصرف سوخت کمتری نسبت به نازل استوانه ای دارد و نازل با قطر کوچکتر دوده کمتری نسبت به نازل با قطر بزرگتر تولید می‌کند [3,7,8]. سان و همکاران تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و مشخصات کاویتاسیون نازل را روی موتورهای دیزل فشار بالا بررسی کردند؛ آن ها تاثیر نسبت r/D و L/D ، و ضریب K را روی انرژی جنبشی توربولانس، کسری حجمی بخار و فشار بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش r/D از 0 تا 0.3 کسر حجمی بخار تا 45 درصد کاهش و ماکزیمم مقدار کسر حجمی در $L/D=4.06$ اتفاق می‌افتد.

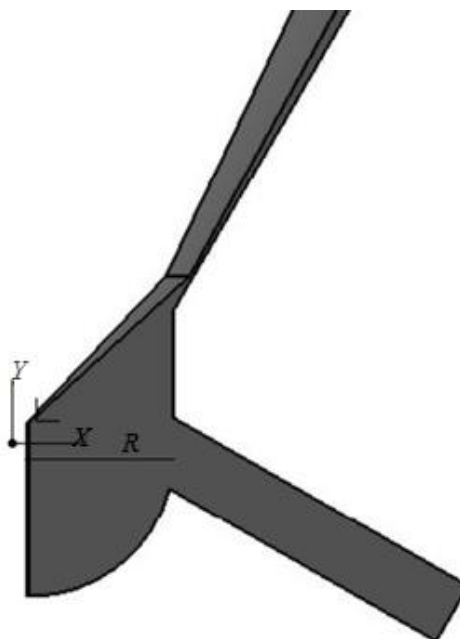


Fig.1 geometry of the injector 1

شکل 1 هندسه انژکتور 1

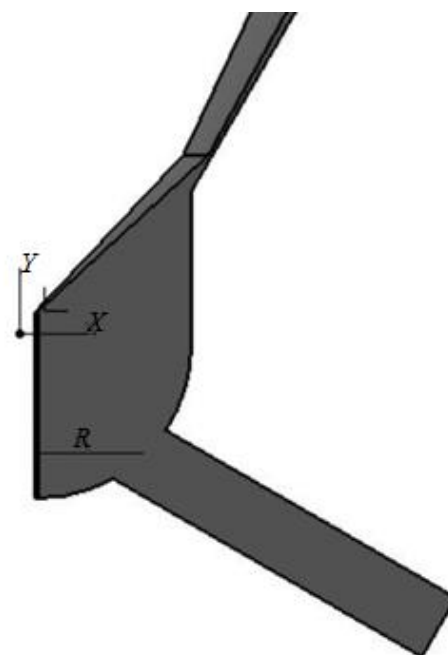


Fig.2 geometry of the injector 2

شکل 2 هندسه انژکتور 2

ممنتوم، انتقال گرما و جرم برای قطرات واحدی از گروه‌های متفاوت انجام می‌شود. معادلات حاکم به‌صورت زیر می‌باشند.

2-2-1- معادله بقای ممنتوم

$$m_d \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{ig} + F_{ip} + F_{ib} \quad (4)$$

که در آن F_{idr} نیروی درگ است.

$$F_{idr} = \frac{1}{2} \rho_g A_d C_D |u_{rel}| \cdot u_{rel} \quad (5)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_D} (1 + 0.15 \cdot Re_D^{0.687}) & Re_d < 10^3 \\ 0.24 & Re_d \geq 10^3 \end{cases} \quad (6)$$

عدد رینولدز ذرات به‌صورت زیر تعریف می‌شود که در آن μ_g ویسکوزیته سیال است. c_p ضریب رابطه کانینگهام است.

$$Re_d = \frac{\rho_g |u_{rel}| D_d}{\mu_g} \quad (7)$$

در معادله بالا (4) تمامی نیروهای سطحی و بدنی روی قطره افشانه لحاظ شده‌اند. از آنجایی که بزرگی نیروهای فشاری و سایر نیروهای در مقایسه با نیروهای درگ و گرانشی قابل اغماض است فقط نیروی درگ روی قطره افشانه (شامل مولفه‌های فشار و ویسکوز) برای فروپاشی اولیه و ثانویه افشانه سوخت مایع لحاظ شده است [11]. شتاب قطره در محیط گازی به صورت زیر داده شده است.

$$\frac{du_{id}}{dt} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{1}{D_d} |u_g - u_d| (u_{ig} - u_{id}) + \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_d}\right) g_i \quad (8)$$

زیر مدل‌های استفاده شده در مدول افشانه شامل مدل تیخیر دوکویچ³، مدل فروپاشی اولیه تزریق گلوله⁴ و مدل فروپاشی ثانویه موج می‌باشند.

2-2-2- فروپاشی اولیه - مدل تزریق گلوله

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

$$r_T = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$\tau_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{r - C_3 r_T}{C_4 \tau_T} \quad (11)$$

که در آن r شعاع قطره و C_3 و C_4 ثابت‌های مسئله هستند.

با صرف نظر کردن از تاثیر پخش‌شدگی، معادله اغتشاش برای سوخت مایع به‌صورت زیر می‌تواند به‌دست آید. (تاثیر کاویتاسیون با ترم S_k اعمال شده است).

$$\frac{dk}{dt} = -\varepsilon + S_k \quad (12)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -C_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} (\varepsilon - S_\varepsilon) \quad (13)$$

در این رابطه K انرژی جنبشی اغتشاش، ε نرخ پراکندگی و C ثابت مدل می‌باشد.

2-2-3- فروپاشی ثانویه - مدل موج

در این مدل فروپاشی قطره به‌صورت نرخ کاهش شعاع قطره نسبت به زمان ارائه شده است.

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{(r - r_{stable})}{\tau_a} \quad (14)$$

مقاله یک انژکتور 6 سوراخه با طول اریفیس 1 میلی‌متر و قطر خروجی 0.2 میلی‌متری استفاده شده است. برای افزایش دقت و کاهش زمان محاسبات عددی با توجه به شرایط مرزی متقارن انژکتور، برای شبیه‌سازی عددی تنها یک دوازدهم از کل هندسه انژکتور را شبیه‌سازی کرده‌ایم. برای شبیه‌سازی عددی از کد دینامیک سیالات محاسباتی ای وی ال فایر¹ استفاده شده است.

2-1- معادلات حاکم بر جریان چند فازی در نازل

تغییر فاز از حالت مایع به بخار یک سیال به علت فشار پایین، کاویتاسیون گفته می‌شود. کاویتاسیون در ورودی سوراخ نازل پدیدار می‌شود. به‌علت وقوع پدیده کاویتاسیون در جریان داخل نازل، حباب‌های بخار در نواحی با فشار پایین‌تر از فشار بخار اشباع ایجاد شده و همراه با جریان به نواحی با فشار بالاتر منتقل شده و می‌ترکند. اختلاف فشار بالا مابین ابتدا و انتهای اریفیس انژکتور علاوه بر مشخصات هندسی نازل انژکتور که سرعت جریان را در خروجی نازل افزایش می‌دهد، منجر به داشتن فشار دینامیکی بالاتر و فشار استاتیکی پایین در جریان داخلی نازل شده و در نهایت باعث رشد کاویتاسیون می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان چند فازی از تقریب اوایلر اوایلر استفاده شده است که جریان چند فازی شامل مایع و بخار آن می‌باشد. معادلات باقیی در قالب چندسیالی به‌صورت زیر هستند.

2-1-1- معادله بقای جرم

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

$k=1,2,3,\dots,N$
 α_k کسر حجمی فاز k ، v_k سرعت فاز k و Γ_{kl} تبادل جرمی بین دو فاز k و l می‌باشد. شرط سازگاری باید صدق کند

$$\sum_{k=1}^N \alpha_k = 1$$

2-1-2- معادله بقای ممنتوم

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k v_k &= -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot \alpha_k (\tau_k + T_k^t) + \alpha_k \rho_k f \\ &+ \sum_{l=1, l \neq k}^N M_{kl} + v_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl} \end{aligned} \quad (2)$$

$k=1,2,3,\dots,N$

2-1-3- معادله انرژی جنبشی توربلانس

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k k_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k k_k &= \nabla \cdot \alpha_k \left(\mu_k + \frac{\mu_k^t}{\sigma_k} \right) \nabla k_k + \alpha_k P_k \\ &- \alpha_k \rho_k \varepsilon_k + \sum_{l=1, l \neq k}^N K_{kl} + K_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl} \end{aligned} \quad (3)$$

$k=1,2,3,\dots,N$

2-2- معادلات حاکم بر افشانه

شبیه‌سازی افشانه شامل جریان چند فازی است از این‌رو برای حل عددی معادلات باقیی هر دو فاز مایع و بخار باید لحاظ شود. در رابطه با فاز مایع عملاً امروزه تمامی محاسبات بر پایه روش آماری به نام قطره مجزا بنا می‌شود. این روش به‌وسیله‌ی حل معادلات دیفرانسیل معمولی برای مسیر،

³ Dukowicz

⁴ Blob Injection

¹ AVL Fire

² Discrete Droplet Method

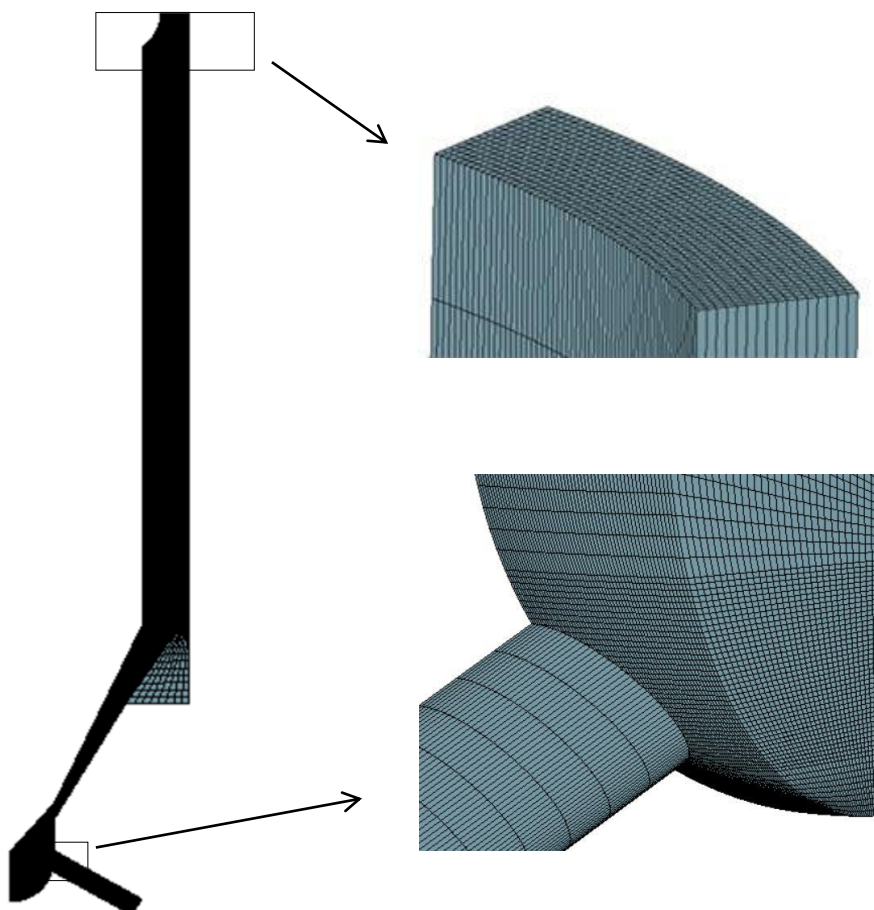


Fig.3 meshing model injector body

شکل 3 مدل شبکه‌بندی انژکتور

است. با توجه به افت فشار درون سوراخ نازل انژکتور که منجر به ایجاد کاویتاسیون می‌شود، جریان چند فازی گرفته شده است. به دلیل کاربرد وسیع سوخت دیزل، سیال دیزل انتخاب شده است. مشخصات جزئی آن در جدول 1 آورده شده است. مشخصات هندسی انژکتور و شرایط کارکردی آن در جدول 2 آمده است. با توجه به پیچیدگی جریان توربلانس نازل، برای حل معادلات توربلانس جریان نازل مدل شبیه‌سازی گرداب بزرگ انتخاب شده است؛ علاوه بر این مدل گرداب بزرگ برای حل تداخل پیچیده بین رشد حباب کاویتاسیونی و گرداب ناشی از جریان توربلانس بسیار مناسب می‌باشد [20]. ضریب مادون رهایی برای ممنتوم، فشار و انرژی به ترتیب 0.15، 0.4 و 0.2 فرض شده است ماکزیمم و مینیمم تعداد تکرار برای معیار همگرایی به ترتیب 100 و 10، خطا برای ممنتوم، فشار و انرژی به ترتیب $1e-3$ و $5e-3$ فرض شده است. برای مدل کاویتاسیونی تبادل ممنتوم با مدل درگ کاویتاسیون مدل شده است؛ ضرایب این مدل به صورت زیر فرض شده است. ضریب پراکندگی برابر 0.1 و ضریب ساتو¹ برابر 0.6 همچنین تبادل مابین جرم با مدل کاویتاسیونی خطی مدل شده است که عدد چگالی، ضریب اگلر²، و فشار اشباع به ترتیب $1e+12$ ، 1.2 و 892 می‌باشند.

2-3- افشانه

جریان داخل نازل اصولاً یک جریان ناپایا است، از این رو جریان ناپایا فرض

که در آن r_{stable} شعاع نهایی قطره و متناسب با طول موج Λ متناظر با موج با سریع ترین رشد روی سطح قطره است.

$$r_{stable} = C_1 \Lambda \quad (15)$$

τ_a زمان فروپاشی مدل می‌باشد که به صورت زیر است:

$$\tau_a = \frac{3.726 \cdot C_2 \cdot r}{\Lambda \cdot \Omega} \quad (16)$$

$$\Lambda = 9.02 \cdot r \cdot \frac{(1 + 0.45 \cdot oh^{0.15})(1 + 0.4 \cdot T^{0.7})}{(1 + 0.87 \cdot We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (17)$$

$$\Omega = \left(\frac{\rho_g r^3}{\sigma}\right)^{-0.5} \frac{0.34 + 0.38 \cdot We_g^{0.15}}{(1 + oh)(1 + 1.4 \cdot T^{0.6})} \quad (18)$$

3- محاسبات عددی

1-3- انژکتور

برای شبیه‌سازی جریان داخلی انژکتور از یک انژکتور دیزل 910، شش سوراخه با نازل استوانه‌ای به قطر 0.2 میلی‌متر و طول یک میلی‌متر که سوراخ‌های آن با فواصل یکسانی از هم قرار گرفته‌اند استفاده شده است [10]. برای بررسی جریان داخلی انژکتور و حل معادلات بقایی از کد اقتصادی ای‌وی‌ال فایر استفاده شده است که بر پایه روش حل عددی حجم محدود می‌باشد. شبکه‌بندی انژکتور به صورت "شکل 3" انجام شده است. برای بررسی استقلال نتایج به دست آمده از شبکه‌بندی، در "شکل 4" دبی جرمی خروجی برای تعداد شبکه‌های مختلف نشان داده شده است؛ با توجه به شکل دبی جرمی خروجی بعد از تعداد سلول 250000 رفتار یکنواخت‌تری را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی جریان داخل انژکتور با تعداد شبکه 285000 انجام شده

¹ sato

² Egler

جدول 1 مشخصات سوخت دیزل

فاز بخار		فاز مایع	
μ (kgm ⁻¹ s ⁻¹)	ρ (kgm ⁻³)	μ (kgm ⁻¹ s ⁻¹)	ρ (kgm ⁻³)
830	1e-5	7	0.00214

جدول 2 مشخصات هندسی و شرایط کاری انژکتور

مقادیر	کمیت
200	قطر نازل (میکرو متر)
1000	طول نازل (میکرومتر)
0	شعاع منحنی ورودی
120	فشار ورودی (مگا پاسکال)
2.5	زمان تزریق سوخت (میلی ثانیه)

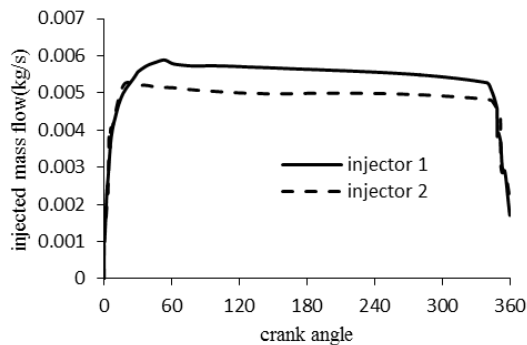


Fig.5 injected mass flow in combustion chamber

شکل 5 دبی جرمی سوخت پاشش شده در محفظه احتراق

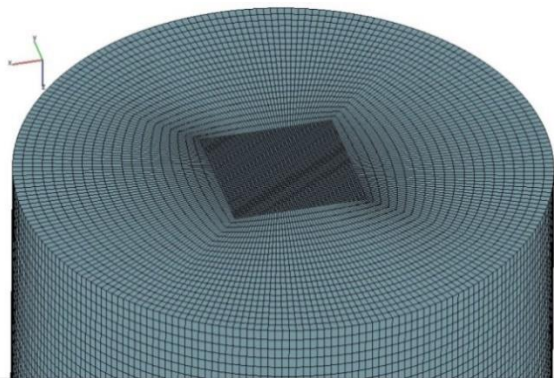


Fig.6 meshed chamber for spray injection

شکل 6 محفظه شبکه بندی شده برای تزریق افشانه

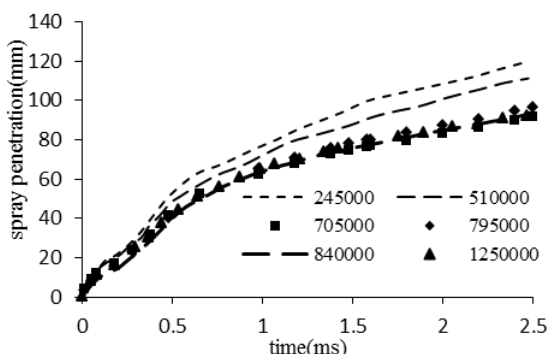


Fig.7 spray penetration for different cell number

شکل 7 طول نفوذ افشانه برای مقادیر متفاوت سلول

ورودی برای افشانه از نتایج خروجی جریان چند فازی انژکتور به دست آمده‌اند. شرایط مرزی با استفاده از برونمایی و معادلات استنتاج شده با استفاده از روش کمترین مربعات محاسبه شده‌اند. در طول تزریق ورودی و خروجی سیلندر بسته می‌ماند، بنابراین برای شرایط مرزی حجم کنترل، دیوار انتخاب شده‌اند. [21].

4- نتایج

4-1- نتایج شبیه سازی جریان داخل نازل

کاویتاسیون یکی از مهم‌ترین پدیده‌های است که روی رفتار هیدرودینامیکی افشانه سوخت تاثیر می‌گذارد. رشد و ترکیدن حباب‌های کاویتاسیون از جمله مهم‌ترین عواملی است که فروپاشی قطرات افشانه را تسهیل می‌کند. به عبارت دیگر وقوع کاویتاسیون در سوراخ نازل کیفیت اتمیزاسیون را بهبود می‌دهد.

شده است. در کار حاضر مدت زمان تزریق سوخت 2.5 میلی ثانیه فرض شده و نرخ پاشش سوخت برای هر دو انژکتور که مستقیماً از نتایج خروجی انژکتور به دست آمده است، در "شکل 5" آورده شده است. از یک محفظه احتراق استوانه‌ای حجم ثابت با قطر 30 میلی‌متر و طول 100 میلی‌متر برای افشانه سوخت استفاده شده است. در "شکل 6" هندسه شبکه‌بندی شده محفظه استوانه‌ای نشان داده شده است، برای افزایش دقت محاسبات در بخش ورودی محفظه احتراق جایی که سوخت پاشش می‌شود از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است. همچنین محفظه استوانه‌ای در دمای 300 کلوین و فشار 2 مگاپاسکال فرض شده است. برای سیال مورد استفاده در محفظه احتراق هوا انتخاب شده است. برای بررسی عدم وابستگی نتایج افشانه به تعداد شبکه محفظه احتراق، نتایج حاصله برای تعداد شبکه‌های متعددی به دست آمده است. با توجه به "شکل 7" نتایج مستقل شبکه‌بندی در تعداد سلول 840000 رفتار یکنواخت‌تری را نشان می‌دهد. برای حل معادلات ممنوم، پیوستگی، توربولانس و کسر حجمی، از الگوریتم سیمپل¹ استفاده شده است. مدل سازی توربولانس با مدل $k-\epsilon$ صورت گرفته و ضریب مادون رهایی برای ممنوم، فشار و انرژی به ترتیب 0.8، 0.5 و 0.6 فرض شده است. ماکزیمم و مینیمم تعداد تکرار برای معیار همگرایی به ترتیب 100 و 10 است. خطا برای فشار و ممنوم به ترتیب $1e-4$ و $1e-5$ فرض شده است. اسکیم‌های آگستس‌سازی برای ممنوم و پیوستگی، تفاضل مرکزی و برای توربولانس، کسر حجمی و انرژی از نوع بالادست² به کار رفته است. مقادیر

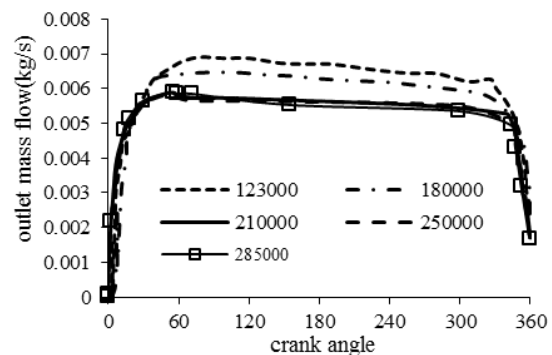


Fig.4 outlet mass flow for different cell number

شکل 4 دبی جرمی خروجی برای مقادیر متفاوت سلول

¹ Simple
² scheme
³ upwind

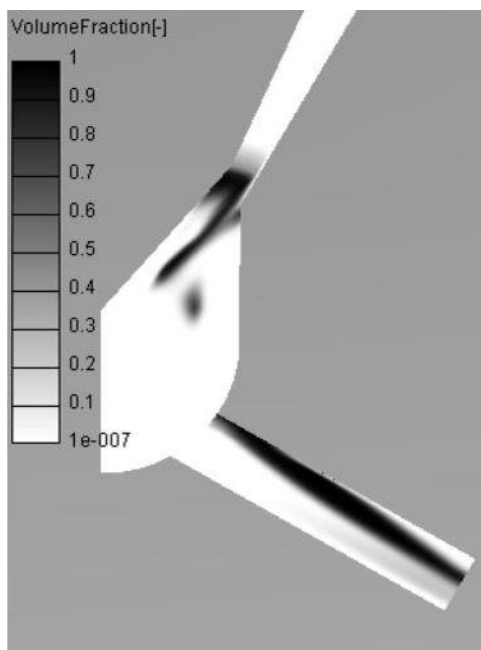


Fig.9 Vapor volume fraction for injector 2

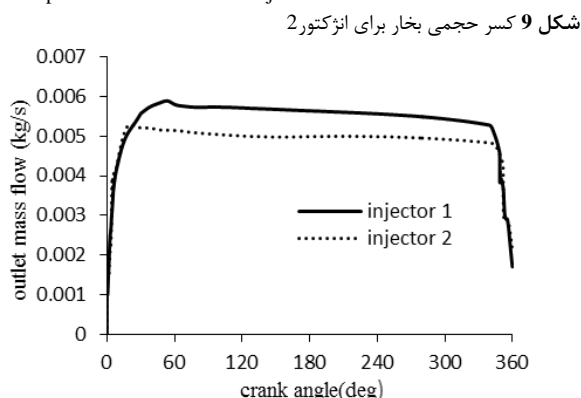


Fig.10 outlet mass flow for the two types of injector 1 & 2

شکل 10 دبی جرمی خروجی برای دو نوع انژکتور 1 و 2

2-4- نتایج شبیه‌سازی افشانه

در این بخش تاثیر هندسه انژکتور بر توسعه افشانه سوخت در داخل محفظه احتراق استوانه‌ای بررسی شده است. برای بررسی رفتار اسپری سوخت دو مشخصه طول نفوذ اسپری و قطر متوسط ساتر که از مهم‌ترین معیارهای بررسی رفتار اسپری می باشد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در "شکل 12" توسعه نفوذ افشانه در مقابل زمان پاشش سوخت برای هر دو نوع انژکتور نشان داده شده است. با توجه به "شکل 12" می‌توان دید برای یک زمان مشخص، طول نفوذ افشانه سوخت در مورد انژکتور 2 بیشتر از انژکتور 1 است. این واقعیت به وضوح نشان می‌دهد که سرعت جریان داخلی در خروج از نازل انژکتور 2 بیشتر از سرعت جریان داخلی در خروج از نازل انژکتور 1 است. در انژکتور 1 قسمت کیسه‌ای بزرگتر از انژکتور 2 است و جریان برای خروج از انژکتور یک مسیر گردابه‌ای را طی می‌کند و بخشی از انرژی خود را در اثر برخورد با دیواره از دست می‌دهد و با انرژی کمتری وارد نازل می‌شود. در حالی که جریان داخل انژکتور 2 مسیر مستقیمی را نسبت به انژکتور 1 طی می‌کند و انرژی کمتری را از دست داده و وارد نازل می‌شود. سرعت بالای جریان داخلی در خروج از نازل برای انژکتور 2 موجب افزایش طول نفوذ افشانه شده است [11].

هندسه نازل و شکل سطح مقطع ورودی نازل از پارامترهای تاثیرگذار روی پدیده کاویتاسیون و شدت وقوع آن هستند که با تغییر محل اتصال نازل به بدنه انژکتور، سطح مقطع ورودی نازل تغییر پیدا می‌کند و می‌تواند روی جریان داخلی نازل تاثیرگذار باشد که در این مطالعه تاثیر این تغییر هندسه بر روی جریان داخلی نازل و همچنین تاثیر آن روی مشخصات اسپری سوخت بررسی شده‌اند. در این بخش تعدادی از نتایج دوبعدی و سه‌بعدی جریان داخل نازل انژکتور نشان داده شده است. کسر حجمی فاز بخار از مهم ترین مشخصه‌های پدیده کاویتاسیون می‌باشد که می‌تواند شدت وقوع پدیده کاویتاسیون را نشان دهد، از این رو برای بررسی تاثیر هندسه نازل انژکتور روی پدیده کاویتاسیون، کسر حجمی فاز بخار برای دو نوع انژکتور نشان داده شده است. بیشترین مقدار کسر حجمی فاز بخار با رنگ سیاه و برابر با 1 و کمترین مقدار آن با رنگ سفید و برابر با 0 نشان داده شده است (شکل 8 و 9). همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در ناحیه ورودی نازل که به دلیل تغییر ناگهانی و شدید سطح مقطع فشار موضعی افت پیدا می‌کند و مقدار فاز بخار شروع به افزایش می‌کند و بر میزان حباب‌های کاویتاسیونی افزوده می‌شود. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهند که برای هر دو انژکتور پدیده کاویتاسیون ایجاد شده است اما برای انژکتور 2، کاویتاسیون تا انتهای خروجی نازل ادامه پیدا کرده است، به عبارت دیگر برای انژکتور با نازل واقع در بخش پایین‌تر کیسه انژکتور میزان فاز بخار افزایش پیدا می‌کند و موجب ایجاد بهتر پدیده کاویتاسیون می‌شود. برای بررسی بیشتر کاویتاسیون، در "شکل 10" دبی جرمی خروجی فاز مایع برای هر دو نوع انژکتور مقایسه شده‌اند. در انژکتور 2 کاهش دبی جرمی خروجی نسبت به انژکتور 1 کاملاً مشهود است. که دلیل آن وقوع پدیده کاویتاسیون با شدت بیشتر در نازل انژکتور است. "شکل 11" توزیع کسر حجمی فاز مایع را در سطح مقطع های متفاوت در داخل نازل برای دو انژکتور نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 11" دیده می‌شود پدیده کاویتاسیون در نواحی بیشتری از نازل انژکتور 2 نسبت به نازل انژکتور 1 رخ داده است.

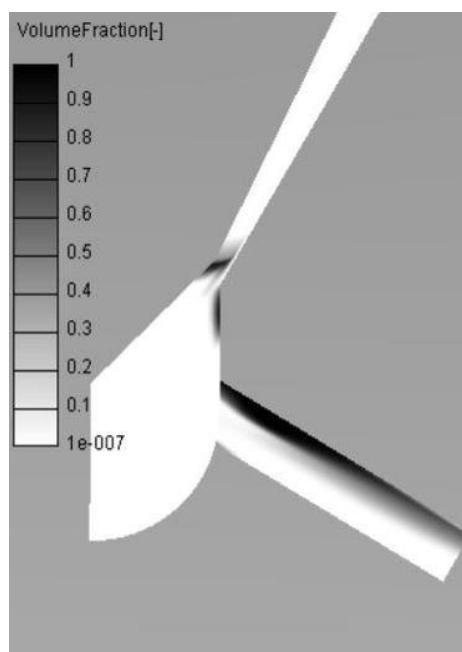


Fig. 8 vapor volume fraction for injector 1

شکل 8 کسر حجمی بخار برای انژکتور

"شکل 14" نتایج داده‌های عددی برای قطر متوسط ساتر با نتایج تجربی [22] مقایسه شده‌اند.

6- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر هندسه انژکتور بر جریان داخلی سوخت مایع و رفتار هیدرودینامیکی افشانه سوخت مایع بررسی شده است. برای این کار از دو انژکتور یکسان که تنها در محل قرارگیری نازل روی کیسه انژکتور با هم تفاوت دارند استفاده شده است به عبارت دیگر موقعیت نازل روی کیسه انژکتور تغییر داده شده‌اند و بقیه مشخصات هندسی و شرایط کارکردی یکسان است. (شکل 1 و 2)

با بررسی جریان داخل نازل انژکتور برای هر دو انژکتور مشخص شد که انژکتوری که نازل آن در قسمت پایین تر کیسه انژکتور قرار دارد دبی جرمی فاز مایع خروجی نازل کمتری نسبت به انژکتور دیگر دارد که دلیل اصلی کاهش دبی جرمی فاز مایع، وقوع پدیده کاویتاسیون با شدت بیشتر در داخل

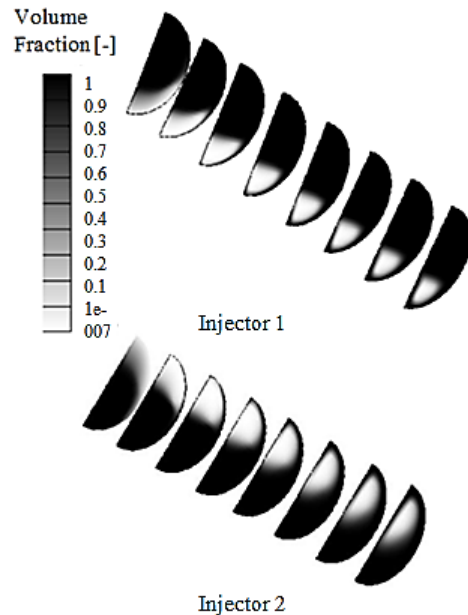


Fig.11 liquid volume fraction at $t=1.4ms$

شکل 11 کسر حجمی فاز مایع در زمان $t=1.4ms$

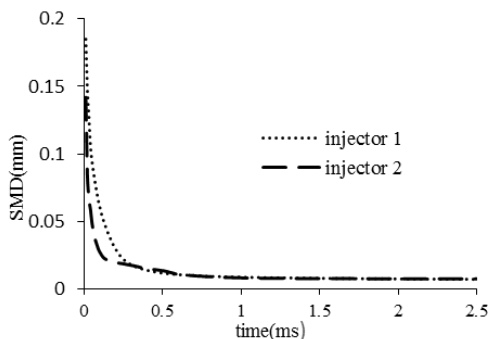


Fig. 13 Sauter mean diameter for injector 1 and 2

شکل 13 قطر متوسط برای انژکتور 1 و 2

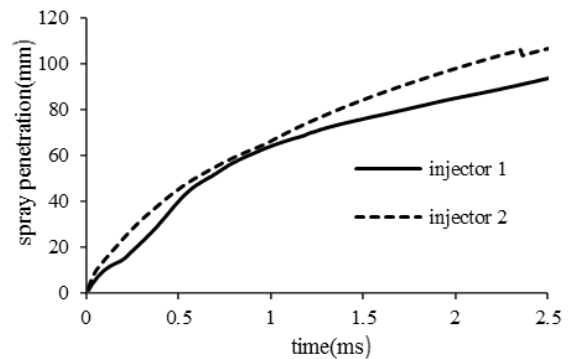
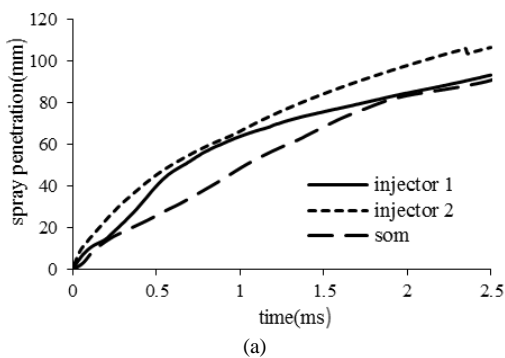


Fig.12 spray tip penetration for injector 1 and 2

شکل 12 طول نفوذ افشانه برای انژکتور 1 و 2

"شکل 13" مقایسه قطر متوسط ساتر را برای انژکتورها در مقابل زمان پاشش سوخت نشان می‌دهد. با توجه به شکل، قطر متوسط ساتر در مراحل اول پاشش برای انژکتور 2 کمتر از انژکتور 1 می‌باشد، اما با گذشت زمان پاشش سوخت، قطر متوسط ساتر برای هر دو انژکتور در انتهای پاشش سوخت تقریباً برابر می‌شوند. باید به این نکته اشاره کرد با این که در انژکتور 2 پدیده کاویتاسیون تا خروجی نازل ادامه پیدا کرده است اما تاثیر قابل توجهی روی اندازه قطرات اسپری نداشته است.

5- بحث بر روی نتایج

برای دست‌یابی به دقت نتایج به دست آمده، داده‌های عددی برای طول نفوذ افشانه با نتایج تجربی [22] مقایسه شده است. با توجه به "شکل 14" تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج تجربی وجود دارد. علت تفاوت طول نفوذ در زمان‌های ابتدایی به این دلیل است که چگالی گاز محفظه احتراق در مقاله اعتبارسنجی شده 34.13 kg/m^3 در نظر گرفته شده و در کار حاضر 1.19 kg/m^3 فرض شده است. چگالی زیاد گاز محفظه احتراق باعث می‌شود نیروی مقاوم بیشتری در لحظات اولیه پاشش به افشانه وارد شده و منجر به کاهش طول نفوذ شود با گذشت زمان پاشش و افزایش سوخت پاشش شده تاثیر آن کمتر شده و طول نفوذ افشانه افزایش می‌یابد [24,23]. همچنین در

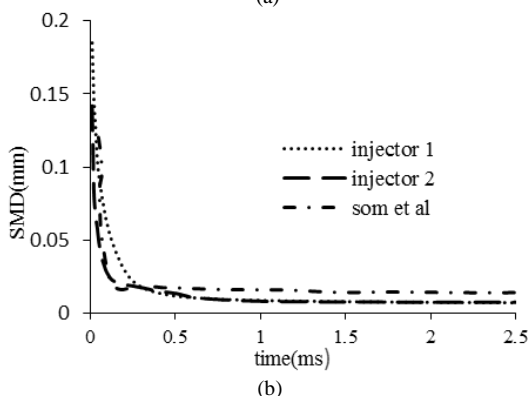


Fig.14 Validation with the experimental and numerical results. Spray tip penetration (a), SMD (b)

شکل 14 اعتبارسنجی با نتایج تجربی و نتایج عددی. (a) طول نفوذ افشانه، (b) قطر متوسط ساتر

- diesel injector nozzles by CFD using RANS methods, *Energy Conversion and Management*, Vol. 66, No. 2, pp. 246-256, 2013.
- [2] C. Yao, C. Cheung, C. Cheng, Y. Wang, Reduction of smoke and NO_x from diesel engines using a diesel/methanol compound combustion system, *Energy & Fuels*, Vol. 21, No. 2, pp. 686-691, 2007.
- [3] C. Yao, P. Geng, Z. Yin, J. Hu, D. Chen, Y. Ju, 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.
- [4] W. Huang, Z. Wu, H. Gong, Y. Gao, J. Deng, Z. Hu, L. Li, Effect of nozzle geometry on macroscopic behavior of diesel spray in the near-nozzle field, *SAE Technical Paper*, Vol. 12, No. 2, pp. 1236-1246, 2013.
- [5] K. Sato, J. Kanzaki, M. Yamakawa, K. Nishida, Effects of hole geometry and its internal flow on spray and mixture properties of hole-type injectors for a DISI engine, *Proceedings of the International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Kyoto, Japan, Vol. 27, No. 4, pp. 06-16, 2006.
- [6] M. A. Shost, M. C. Lai, B. Befrui, P. Spiekermann, D. L. Varble, GDI nozzle parameter studies using LES and spray imaging methods, *SAE Technical Paper*, Vol. 17, No. 20, pp. 650-661, 2014.
- [7] P. Bergstrand, The effects of orifice shape on diesel combustion, *SAE Technical Paper*, Vol. 13, No. 3, pp. 106-116, 2004.
- [8] P. K. Karra, S. C. Kong, Experimental study on effects of nozzle hole geometry on achieving low diesel engine emissions, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, No. 2, pp. 22-35, 2010.
- [9] S. Som, A. I. Ramirez, D. E. Longman, S. K. Aggarwal, Effect of nozzle orifice geometry on spray, combustion, and emission characteristics under diesel engine conditions, *Fuel*, Vol. 90, No. 3, pp. 1267-1276, 2011.
- [10] M. T. Shervani-Tabar, S. Parsa, M. Ghorbani, Numerical study on the effect of the cavitation phenomenon on the characteristics of fuel spray, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 56, No. 5, pp. 105-117, 2012.
- [11] H. Mohammadi, P. Jabbarzadeh, M. Jabbarzadeh, 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 like guides, *Fuel*, Vol. 196, No. 5, pp. 419-430, 2017.
- [12] F. Payri, V. Bermúdez, R. Payri, F. J. Salvador, The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles, *Fuel*, Vol. 83, No. 4, pp. 419-431, 2004.
- [13] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena, Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing bubbles in a liquid pressurized chamber, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, No. 4, pp. 768-777, 2009.
- [14] H. K. Suh, C. S. Lee, Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 4, pp. 1001-1009, 2008.
- [15] Z. Y. Sun, G. X. Li, C. Chen, Y. S. Yu, G. X. Gao, 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, No. 1, pp. 843-861, 2015.
- [16] S. H. Park, H. K. Suh, C. S. Lee, Effect of cavitating flow on the flow and fuel atomization characteristics of biodiesel and diesel fuels, *Energy & Fuels*, Vol. 22, No. 1, pp. 605-613, 2007.
- [17] S. Khosravi, M. Aansari, The effect of various parameters on breakup length of the outflow from nozzle, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 125-133, 2012. (in persian)
- [18] S. Sohrabi, A. Zandi, M. Shams, Numerical investigation of the effect of the number of injector holes on the flow inside the nozzle, *8th International Conference on Internal Combustion Engines & Oil*, Tehran, Iran, 2013. (in persian)
- [19] P. Jabbarzadeh, M. Jabbarzadeh, M. T. Shervanitabar, Numerical study on the diesel fuel penetration length in the cylindrical and conical nozzles, *8th International Conference on Internal Combustion Engines & Oil*, Tehran, Iran, 2013. (in persian)
- [20] F. Salvador, J. Martínez-López, J. V. Romero, M. D. Roselló, Computational study of the cavitation phenomenon and its interaction with the turbulence developed in diesel injector nozzles by Large Eddy Simulation (LES), *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 57, No. 7, pp. 1656-1662, 2013.
- [21] Fire Software help, AVL, Version. 2013
- [22] S. Som, S. Aggarwal, Effects of primary breakup modeling on spray and combustion characteristics of compression ignition engines, *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 6, pp. 1179-1193, 2010.
- [23] J. Desantes, R. Payri, F. Salvador, J. De la Morena, Influence of cavitation phenomenon on primary break-up and spray behavior at stationary conditions, *Fuel*, Vol. 89, No. 7, pp. 3033-3041, 2010.
- [24] N. Dombrowski, P. Hooper, The effect of ambient density on drop formation in sprays, *Chemical Engineering Science*, Vol. 17, No. 2, pp. 291-305, 1962.

نازل این انژکتور می‌باشد، دلیل این امر می‌تواند افت فشار بیشتر جریان در ناحیه ورودی نازل به دلیل تغییر سطح مقطع نازل باشد. بررسی نتایج سه‌بعدی نشان داد برای انژکتور با نازل واقع در قسمت بالاتر کیسه انژکتور، جریان کاویتاسیونی به شکل سوپرکاویتاسیون ظاهر شده و تا انتهای خروجی نازل ادامه می‌یابد. برای بررسی تاثیر هندسه انژکتور روی افشانه سوخت، دو معیار مهم طول نفوذ افشانه و قطر متوسط ساتر بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد طول نفوذ افشانه برای انژکتور 2 بیشتر از انژکتور 1 است، می‌توان استنتاج کرد که سرعت افشانه سوخت مایع در خروجی نازل انژکتور 2 بیشتر از انژکتور 1 است. سرعت خروجی نازل بیشتر این نوع نازل بدلیل سطح مقطع بزرگتر آن و افت فشار بیشتر جریان در ورودی نازل می‌باشد. نتایج نشان داد که قطر متوسط ساتر برای هر دو انژکتور تقریباً برابر است.

7- فهرست علائم

C	ضریب ثابت
C_D	ضریب درگ
c_p	ضریب کانینگهام
D	قطر نازل
f	نیروی حجمی (kgm^{-3})
g_i	بردار شتاب جاذبه (ms^{-2})
k	ضریب
L	طول نازل
M_{kl}	تبادل ممنتوم بین فاز k و l ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
r_t	مقیاس طول اغتشاش
R	شعاع منحنی ورودی اریفیس (m)
Re	رینولدز
T	زمان (s)
v_k	سرعت فاز k (ms^{-1})
we	عدد وبر ($\text{prv}^2\sigma^{-1}$)

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
μ_g	ویسکوزیته سیال محیط ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
μ_k^t	ویسکوزیته مولکولی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
Γ_{kl}	تبادل جرمی مابین فاز k و l ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
k_t	انرژی جنبشی اغتشاش
τ_K	تنش برشی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

زیرنویس‌ها

d	قطره
k, l	فاز
p	ذره
g	گاز

8- مراجع

- [1] F. J. Salvador, J. Martínez-López, M. Caballer, C. De Alfonso, Study of the influence of the needle lift on the internal flow and cavitation phenomenon in