



بررسی عددی حفره‌زایی در افشانه تزریق دیزل با استفاده از شبیه‌سازی دوسیالی

شهاب‌الدین سهرابی^۱، ابوطالب زندی^۲، مهرزاد شمس^{۳*}

^۱دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، sohrabi.pgu@gmail.com

^۲دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، zandi.ab@gmail.com

^۳دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، shams@kntu.ac.ir

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۲۱-۸۴۰۶۳۲۱۴

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۷ اردیبهشت ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۱ تیر ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:

حفره‌زایی

هندسه افشانه

تزریق دیزل

شبیه‌سازی عددی

افشانه چندسوراخ

در این مقاله، تأثیر هندسه افشانه بر مشخصه‌های جریان داخل افشانه و پدیده حفره‌زایی بررسی شده است. به این منظور جریان حفره‌زایی داخل افشانه دیزل چندسوراخ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده است. جریان درون افشانه، گذرا و دوحالتی (مایع و بخار) فرض و با استفاده از شبیه‌سازی دوسیالی اویلری شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی دوسیالی، یک شبیه‌سازی غیرهمگن است. به این معنی که معادلات حاکم برای هر حالت به صورت جداگانه حل می‌شود. اندرکنش بین حالتی نیز با استفاده از جزءهای تبادل بین حالتی شبیه‌سازی می‌شود. برای بررسی اثر هندسه شبیه‌سازی بر جریان حفره‌زایی داخل افشانه، تعداد سوراخ‌های افشانه از ۲ تا ۸ تغییر داده شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند با افزایش تعداد سوراخ‌های افشانه، ساختار و قدرت جریان‌های گردابه‌ای درون کیسه و سوراخ‌های افشانه به شدت تغییر می‌کند. از نقطه نظر مشخصه‌های جریان داخل افشانه، افزایش تعداد سوراخ‌های افشانه، کاهش سرعت تزریق و شار جرمی جریان موجب افزایش شدت حفره‌زایی می‌شوند. به علاوه، ضریب تخلیه و سطح مقطع مؤثر افشانه با افزایش تعداد سوراخ‌های افشانه کاهش می‌یابد. روش شبیه‌سازی با مقایسه نتایج عددی و تجربی موجود از تحقیقات پیشین اعتبارسنجی شده است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

دشوار است. فشار بزرگ تزریق در کنار ابعاد هندسی کوچک افشانه تزریق، جریانی تند ایجاد می‌کند که به شدت گذرا و کاملاً آشفته است. شرایط فوق، مشاهده تجربی حفره‌زایی در افشانه‌های با ابعاد واقعی را امری دشوار و هزینه‌بر می‌سازد. در این شرایط، شبیه‌سازی عددی ابزار مناسبی برای فهم بهتر مشخصه‌های جریان حفره‌زایی داخل افشانه است.

در این تحقیق، جریان حفره‌زایی داخل افشانه با استفاده از شبیه‌سازی دوسیالی اویلری و با به کارگیری کد تجاری AVL-Fire شبیه‌سازی شده است [۹]. برای بررسی تأثیر تعداد سوراخ‌ها بر جریان داخل افشانه و پدیده حفره‌زایی، چندین افشانه با هندسه‌های مختلف مطالعه شده است.

(۲) تشریح شبیه‌سازی محاسباتی

جریان حفره‌زایی داخل افشانه با استفاده از شبیه‌سازی چندسیالی اویلری شبیه‌سازی شده است که قابلیت اعمال به جریان‌های n حالتی را دارد. در این مقاله، جریان داخل افشانه، دو حالت و همدمای فرض شده که شامل دیزل مایع و بخار آن است. بر اساس دیدگاه اویلری، سوخت مایع و بخار آن به صورت دو حالت پیوسته در نظر گرفته شده و معادلات حاکم برای هر حالت به صورت جداگانه حل شده است. اندرکنش بین حالتی نیز با استفاده از جزء‌های تبادل بین حالتی شبیه‌سازی شده است.

(۱-۲) معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، بقای تکانه و آشفتنگی اند. از حل معادله انرژی به دلیل فرض همدمای بودن جریان صرف‌نظر شده است.

(۱-۱-۲) معادله بقای جرم

معادله پیوستگی حالت k ام، فارغ از تراکم‌پذیر یا تراکم‌ناپذیر بودن جریان به صورت آتی محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \vec{v}_k = \sum_{l=1, l \neq k}^2 \Gamma_{kl} \quad (1)$$

که در آن، α کسر حجمی، \vec{v} سرعت، ρ چگالی و Γ بیانگر نرخ تبادل جرم بین حالت‌های مایع و بخار است که در ادامه معرفی خواهد شد. شرط سازگاری بین حالت‌ها به صورت آتی قابل ارائه است:

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

(۲-۱-۲) معادله بقای تکانه

معادله بقای تکانه حالت k ام به صورت آتی قابل ارائه است [۱۰]:

سامانه تزریق سوخت نقش مهمی در دستیابی به بازده بزرگتر و کاهش آلایندگی موتور ایفا می‌کند. در موتورهای دیزل، سوخت مایع به درون محفظه احتراق پاشش می‌شود. هدف از پاشش سوخت، افزایش سطح تماس مایع و هوا به منظور افزایش انتقال حرارت و جرم است [۱]، چراکه اختلاط بهتر سوخت و هوا موجب احتراق بهتر آن خواهد شد. یکی از متغیرهای مؤثر بر مقدار اتمیزه کردن و اختلاط سوخت و هوا، تکانه افشانه سوخت است. در این میان، جریان داخل افشانه تزریق به عنوان جزئی از سامانه تزریق که فشار سوخت مایع را به تکانه افشانه سوخت خروجی از افشانه تبدیل می‌کند، اهمیت دارد. هندسه افشانه تزریق مشخصه‌های افشانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بنابراین رفتار اتمیزه کردن و تولید آلاینده‌ها را نیز تعیین می‌کند. لذا برای پیش‌بینی رفتار افشانه و تولید آلاینده‌ها، دستیابی به درک جامعی از فیزیک جریان داخل افشانه ضروری است.

امروزه افشانه‌های با ابعاد کوچکتر و تعداد سوراخ‌های بیشتر و فشار کاری بزرگتر، به دلیل مزایایی همچون کاهش تولید ذرات معلق، کاهش اکسیدهای نیتروژن و بهینه‌سازی مصرف سوخت مورد توجه تولید کنندگان خودرو قرار گرفته است [۲]. از طرف دیگر گرایش به فشارهای بزرگتر در موتورهای دیزل به پیچیدگی مسئله می‌افزاید. همچنان که فشار تزریق در افشانه بزرگ می‌شود، سرعت جریان افزایش می‌یابد. در سرعت‌های به اندازه کافی تند، با شکست خطوط جریان در لبه ورودی سوراخ و کاهش فشار استاتیک به کمتر از فشار بخار، شاهد وقوع حفره‌زایی در مجرای افشانه خواهیم بود. شواهد تجربی نشان می‌دهند حفره‌زایی درون افشانه، مشخصه‌های جریان خروجی از افشانه و اتمیزه کردن افشانه را تغییر می‌دهد [۳، ۴].

وقوع حفره‌زایی در افشانه‌های فشار بزرگ می‌تواند برای توسعه افشانه مفید باشد، چراکه می‌تواند فروپاشی اولیه و اتمیزه کردن فواره مایع را بهبود بخشد [۵]. حفره‌زایی در افشانه تزریق به دو صورت فروپاشی افشانه سوخت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. حفره‌زایی با کاهش سطح مقطع مؤثر جریان، سرعت جت مایع در خروجی افشانه را افزایش می‌دهد. به علاوه، انفجار حباب‌های حفره‌زایی شدت آشفتنگی جریان سوخت و در نتیجه اتمیزه کردن افشانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۶، ۷]. در مقابل، انفجار حباب‌های حفره‌زایی در داخل افشانه می‌تواند سبب فرسایش سطح افشانه و در نتیجه کاهش طول عمر و کارایی آن شود. همچنین، حفره‌زایی می‌تواند بازده جریان (ضریب تخلیه) و شار جرمی بیشینه سوخت مایع را کاهش دهد [۸]. در مجموع می‌توان بیان کرد که مقداری بهینه از حفره‌زایی مطلوب است و برای طراحی افشانه‌های کارا تر، فهم پدیده حفره‌زایی ضروری است.

با وجود اهمیت پدیده حفره‌زایی، جزئیات ساختار و نحوه آن هنوز ناشناخته است. متأسفانه فهم فیزیک جریان داخل افشانه به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی آن همچون وقوع حفره‌زایی و اغتشاش جریان

مقدار اولیه چگالی عددی، N_0''' ، به مشخصات حالت مایع وابسته است. در این تحقیق، چگالی عددی اولیه دیزل 10^{12} فرض شده است [۱۳].

۲-۲-۲) تبادل تکانه بین حالت‌ها

تبادل تکانه بین دو حالت با در نظر گرفتن اثر نیروهای پسا و پخش آشفته‌گی محاسبه شده است:

$$\begin{aligned} \vec{M}_c &= C_D \frac{1}{8} \rho_c A_i''' |\vec{v}_r| \vec{v}_r + C_{TD} \rho_c k_c \nabla \alpha_d \\ &= -\vec{M}_d \end{aligned} \quad (۷)$$

که در آن، C_D ضریب پسا، \vec{v}_r سرعت نسبی بین حالت مایع و بخار، C_{TD} ضریب پخش آشفته‌گی و k انرژی جنبشی آشفته‌گی است. A_i''' بیانگر چگالی سطح مشترک بین حالت‌ها و برای جریان جابی از معادله آتی محاسبه می‌شود:

$$A_i''' = (36\pi)^{\frac{1}{3}} N_0'''^{\frac{1}{3}} \alpha_d^{\frac{2}{3}} \quad (۸)$$

ضریب پسا با استفاده از معادله آتی محاسبه شده است [۱۴]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{192}{Re_b} (1 + 0.1 Re_b^{0.75}) & Re_b \leq 1000 \\ 0.438 & Re_b > 1000 \end{cases} \quad (۹)$$

که در آن، Re_b عدد رینولدز جاب است.

۳) اعتبارسنجی شبیه‌سازی محاسباتی

صحت شبیه‌سازی محاسباتی با مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی بررسی شده است. برای این منظور از نتایج تحقیقات سوتربو و همکاران [۱۵]، بر روی یک افشانه با هندسه ساده استفاده شده است. شکل ۱ هندسه افشانه استوانه‌ای و مخزن ورودی و خروجی را به همراه ابعاد آن نشان می‌دهد. برای کاهش اثرات جریان خروجی بر جریان درون افشانه، طول مخزن خروجی هفت برابر طول افشانه فرض شده است. هندسه و شبکه محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار GAMBIT تولید شده است.

شرایط مرزی فشار ثابت در ورودی و خروجی اعمال شده است. جریان داخل افشانه در فشارهای تزریق مختلف شبیه‌سازی شده است. در تمام موارد شبیه‌سازی، فشار پایین‌دست ۳ MPa فرض شده و فشار ورودی بین ۶-۶۰ MPa تغییر داده شده است. با استفاده از این فشارها، بازه وسیعی از اعداد حفره‌زایی بین ۰.۶۶-۱۹ بررسی شده است. برای شبیه‌سازی از سوخت دیزل استفاده گردید که خواص آن در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۲ ارائه شده است. محور عمودی بیانگر ضریب تخلیه و محور افقی بیانگر عدد حفره‌زایی است.

ضریب تخلیه به صورت نسبت شار جرمی واقعی به شار جرمی نظری تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k &= -\alpha_k \nabla p + \alpha_k \rho_k \vec{f}_k \\ + \nabla \cdot \alpha_k (\vec{\tau}_k + \vec{T}_k^t) &+ \sum_{l=1, l \neq k}^2 \vec{M}_{kl} + \vec{v}_k \sum_{l=1, l \neq k}^2 \Gamma_{kl} \end{aligned} \quad (۳)$$

که در آن، \vec{f} بردار نیروی حجمی شامل نیروی جاذبه و اینرسی است. $\vec{\tau}$ بردار تنش برشی، \vec{T}^t بردار تنش رینولدزی و p فشار استاتیکی است. \vec{M} بیانگر اندرکنش تکانه بین حالت‌ها است که در ادامه معرفی خواهد شد.

۲-۱-۲) معادلات اغتشاش

با توجه به فیزیک مسأله، اغتشاش جریان داخل افشانه کاملاً قابل پیش‌بینی است. در این تحقیق، از شبیه‌سازی k-ε برای شبیه‌سازی توربولانس استفاده شده است. معادلات اغتشاش، شامل معادله انرژی جنبشی آشفته‌گی و معادله نرخ اتلاف آشفته‌گی است که برای هر حالت به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. برای اختصار، صورت معادلات در اینجا ارائه نشده است. صورت معادلات به همراه جزئیات شبیه‌سازی در مراجع [۹، ۱۱] قابل دستیابی است.

۲-۲) شبیه‌سازی اندرکنش بین حالتی

اندرکنش بین حالتی برای جریان حفره‌زایی شامل تبادل جرم و تبادل تکانه است.

۱-۲-۲) تبادل جرم بین حالت‌ها

نرخ تبادل جرم بین حالت مایع و بخار، با محاسبه نرخ تغییر جرم جاب بخار به دلیل تبخیر همدم قابل محاسبه است:

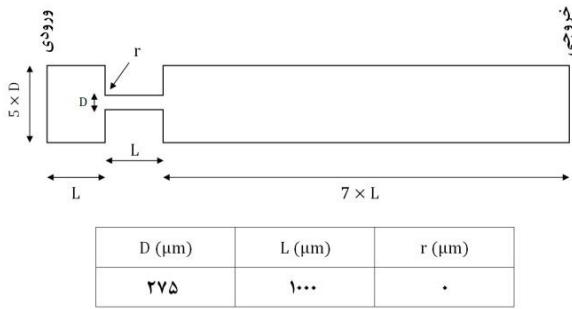
$$\Gamma_c = \rho_d N''' 4\pi R^2 \dot{R} = -\Gamma_d \quad (۴)$$

که در آن، N''' چگالی عددی جاب و R شعاع جاب اند. اندیس‌های c و d ، به ترتیب بیانگر حالت پیوسته (مایع) و حالت گسسته (بخار) اند. نرخ تغییر شکل جاب با استفاده از معادله عام غیرخطی رایلی-پلست محاسبه شده است [۱۲]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{\Delta p}{\rho_c} \quad (۵)$$

که در آن، Δp اختلاف فشار مؤثر و بیانگر تأثیرات نوسان فشار است. چگالی عددی جاب، N''' ، با استفاده از معادله آتی محاسبه شده است:

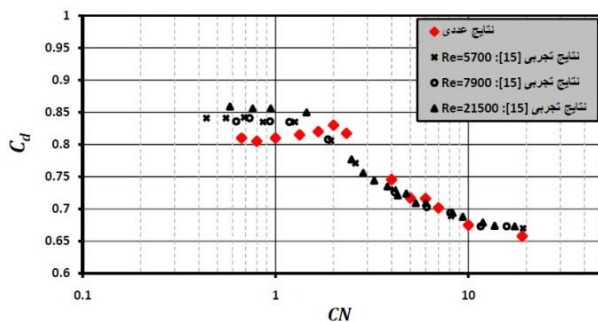
$$N''' = \begin{cases} N_0''' & \alpha_D \leq 0.5 \\ 2(N_0''' - 1)(1 - \alpha_D) + 1 & \alpha_D > 0.5 \end{cases} \quad (۶)$$



شکل ۱: شمای افشانه استوانه‌ای و ابعاد آن

در حال حاضر، عموماً از فناوری تغذیهٔ مشترک^۱ در افشانه‌های دیزل استفاده می‌شود که در آن فشار تزریق در طول فرآیند تزریق سوخت تقریباً ثابت است [۱۶]. بنابراین شرط مرزی در ورودی افشانه از نوع فشار ثابت و برابر با فشار تزریق ۱۳۵ MPa در نظر گرفته شده است. شرط مرزی در خروجی افشانه نیز از نوع فشار ثابت و برای انطباق با فشار محفظهٔ احتراق در مراحل پایانی تراکم ۵ MPa در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در طرفین قطاع نیز از نوع تقارن است. برای همه افشانه‌ها، قطر ورودی و خروجی سوراخ، ۱۵۰ μm، طول آن ۱ mm و لبه ورودی آن تیز در نظر گرفته شده است.

استقلال حل از شبکه با مطالعهٔ تأثیر اندازهٔ شبکه بر شار جرمی جریان سوخت خروجی از افشانه بررسی شده است. به عنوان مثال برای افشانه شش سوراخ با بررسی استقلال حل از شبکه مشخص شد که شار جرمی جریان به ازای دانه‌بندی با اندازه ۴ μm (۱۲۰۸۵۷ جزء شش‌وجهی سازمان‌یافته) به مقدار ثابتی می‌رسد. لذا از این اندازه دانه برای حل جریان داخل افشانه استفاده شده است. در تمام موارد شبیه‌سازی از جابجایی سوزن افشانه صرف‌نظر شده است. این فرض با توجه به باز بودن افشانه در بیش از ۸۰٪ زمان تزریق فرض مناسبی است [۱۷]. حل در شرایط گذرا و جریان تراکم‌ناپذیر فرض شده است.



شکل ۲: منحنی تغییرات ضریب تخلیه بر حسب عدد حفره‌زایی

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{th}} = \frac{\dot{m}}{A_{th} \sqrt{2\rho_f \Delta P}} \quad (10)$$

که در آن، \dot{m} شار جرمی واقعی است که از شبیه‌سازی جریان افشانه محاسبه می‌شود. A_{th} ، سطح مقطع خروجی افشانه، چگالی ρ_f حالت مایع و ΔP ، اختلاف فشار بین ورودی و خروجی افشانه است. عدد حفره‌زایی به کمک معادلهٔ آتی محاسبه شده است:

$$CN = \frac{P_{injection} - P_{back}}{P_{back} - P_{vapor}} \quad (11)$$

که در آن، P_{vapor} فشار بخار حالت مایع است.

نتایج عددی به خوبی روند تغییرات داده‌های تجربی را دنبال می‌کند. در اعداد حفره‌زایی پایین، به دلیل نبود حفره‌زایی یا عدم توسعه آن تا خروجی افشانه، مقدار ضریب تخلیه ثابت است. با افزایش عدد حفره‌زایی و رسیدن آن به مقداری در حدود ۲,۵، ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. دلیل آن، توسعه حفره‌زایی تا خروجی افشانه و کاهش سطح مقطع خروجی آن است. عدد حفره‌زایی متناظر با این نقطه، عدد حفره‌زایی بحرانی نامیده می‌شود.

۴) میدان محاسباتی و حلگر

هندسه افشانه‌های مورد مطالعه در این تحقیق از نوع Minisac چندسوراخ است. برای بررسی تأثیر تعداد سوراخ‌ها از چهار افشانه، دو، چهار، شش و هشت سوراخ با زاویه انحراف $\varphi = 70^\circ$ استفاده شده است. هندسه و شبکهٔ محاسباتی افشانه شش سوراخ در شکل ۳ ارائه شده است. هندسه مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks تولید شده، سپس شبکهٔ محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار GAMBIT ایجاد شده است. با توجه به تقارن هندسی افشانه، تنها یک قطاع از افشانه شبیه‌سازی شده است. زاویه قطاع بسته به تعداد سوراخ‌ها، در افشانه دو سوراخ 90° ، چهار سوراخ 45° ، شش سوراخ 30° و هشت سوراخ $22,5^\circ$ است. با توجه به تغییرات زیاد جریان در ورودی سوراخ، در این ناحیه از خانه‌های ریزتری استفاده شده است.

جدول ۱: خواص سوخت (در دمای ۴۰ °C)

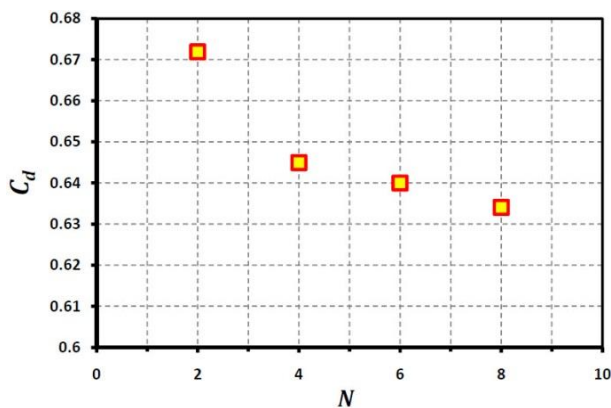
چگالی مایع	لزجت مایع	چگالی بخار	لزجت بخار	فشار اشباع
(kg/m ³)	(Pa-s)	(kg/m ³)	(Pa-s)	(Pa)
۸۲۳	۰,۰۰۲۱	۰,۰۵	۰,۰۰۰۰۱	۱۰۰۰

¹ Common rail

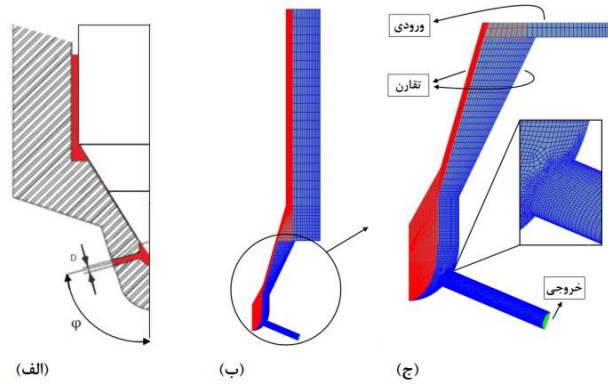
با تغییر ساختار جریان و کاهش قدرت گردابه‌ها، یکنواختی جریان در کیسه افشانه کاهش می‌یابد و افت فشار در لبه ورودی سوراخ افزایش می‌یابد. اما از افشانه چهار سوراخ با افزایش تعداد سوراخ‌ها و تراکم آنها حول کیسه افشانه بر قدرت این گردابه‌ها افزوده می‌شود. افزایش قدرت گردابه‌ها، افزایش یکنواختی جریان در کیسه افشانه و کاهش افت فشار در لبه ورودی سوراخ را به دنبال دارد.

این تغییرات به شدت بر توزیع کسر حجمی حالت مایع در سوراخ تأثیر می‌گذارد. توزیع کسر حجمی حالت مایع در صفحه میانی سوراخ در شکل ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که از افشانه دو سوراخ به چهار سوراخ، با رشد افت فشار در لبه ورودی سوراخ، مقدار حالت بخار در صفحه میانی افزایش می‌یابد، اما از افشانه چهار سوراخ، با کاهش افت فشار در لبه ورودی، مقدار حالت بخار به تدریج کاهش می‌یابد. هرچند با کاهش افت فشار در لبه ورودی، مقدار حالت بخار در صفحه میانی سوراخ کاهش یافته است اما تغییرات ضریب تخلیه بیانگر افزایش حالت بخار در خروجی سوراخ است. دلیل این موضوع را باید در ساختار جریان درون سوراخ‌های افشانه جستجو کرد.

جریان‌های گردابه‌ای تشکیل شده در کیسه افشانه سبب القای جریان چرخشی درون سوراخ‌های افشانه می‌شود. در شکل ۷ بردارهای سرعت در مقطع خروجی افشانه رسم شده است که جریان چرخشی را به خوبی نشان می‌دهد. به علاوه مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سوراخ‌ها، قدرت این گردابه‌ها متناسب با قدرت گردابه‌های تشکیل شده در کیسه افشانه تغییر می‌کند.



شکل ۴: تغییرات ضریب تخلیه بر حسب تعداد سوراخ‌ها (N)



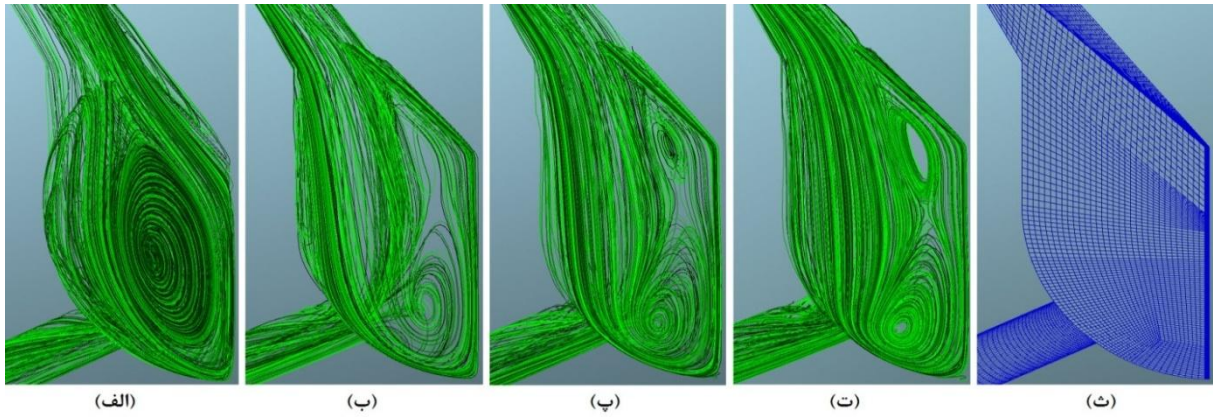
شکل ۳: هندسه و شبکه محاسباتی، (الف) شمای افشانه Minisac، (ب) شبکه محاسباتی کلی، (ج) شبکه محاسباتی در ورودی روزنه

زمان کل تزریق ۰٫۷ میلی ثانیه و گام زمانی حل نیز از $1,5 \times 10^{-8}$ تا $1,5 \times 10^{-7}$ ثانیه، با گام‌های کوچکتر در شروع حل است. سوخت مورد مطالعه، دیزل رایج در کشورهای اروپایی است. خواص فیزیکی این سوخت از مقالات و کتب مرجع [۱۸، ۱۹] استخراج شده است.

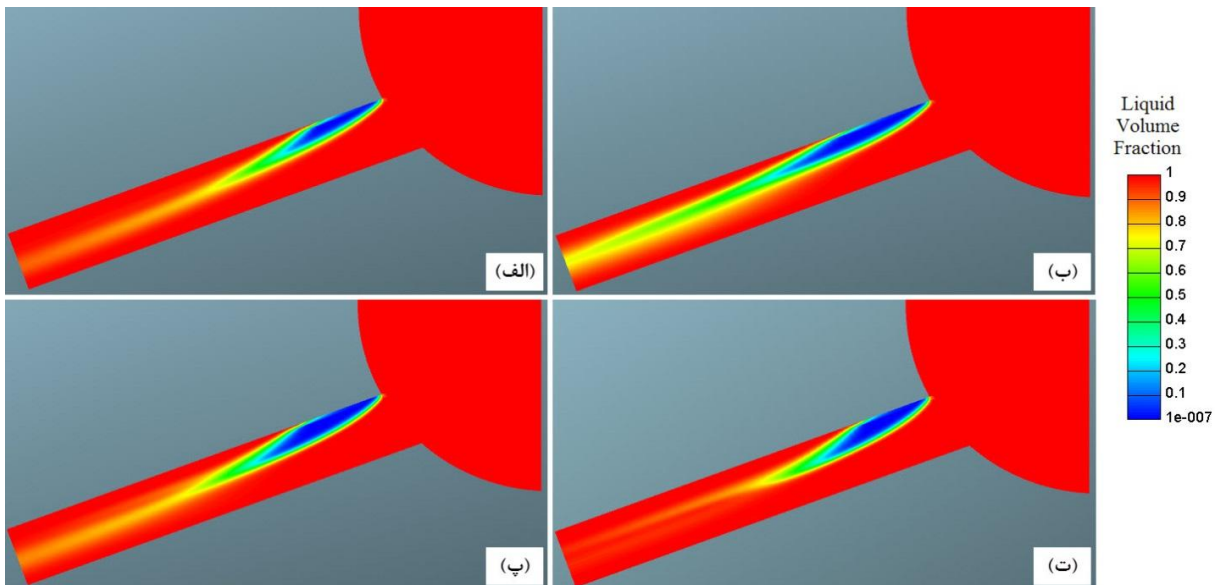
۵) نتایج و بحث

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان درون افشانه چندسوراخ ارائه شده و تأثیر تعداد سوراخ بر ساختار جریان بررسی شده است. یکی از مهمترین مشخصه‌های افشانه، ضریب تخلیه یا بازده جریان است. تغییرات ضریب تخلیه بر حسب تعداد سوراخ در شکل ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سوراخ، ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. از افشانه دو سوراخ به چهار سوراخ این کاهش ناگهانی است، اما برای افشانه‌های بیشتر از چهار سوراخ این کاهش با نرخ کمتری صورت می‌گیرد.

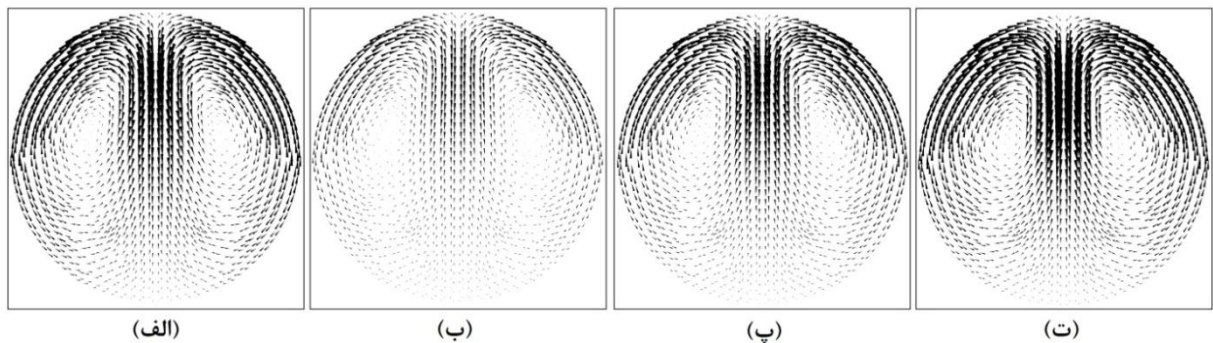
برای بررسی تغییرات ضریب تخلیه، نحوه تغییر ساختار جریان داخل افشانه با افزایش تعداد سوراخ‌ها مطالعه شده است. به این منظور، خطوط جریان برای افشانه‌های مختلف به همراه زاویه نمایش در شکل ۵ ارائه شده است. این شکل به خوبی بیانگر تشکیل جریان‌های گردابه‌ای در تمام افشانه‌ها است. به علاوه مشاهده می‌شود ساختار جریان در افشانه‌های بیشتر از چهار سوراخ از روندی مشابه برخوردار بوده و اختلاف زیادی با افشانه دو سوراخ دارد. با توجه به شکل ۵ از افشانه دو سوراخ به چهار سوراخ شاهد کاهش قدرت گردابه‌ها هستیم،



شکل ۵: خطوط جریان و زاویه دید، (الف) افشانه ۲ سوراخ، (ب) افشانه ۴ سوراخ، (پ) افشانه ۶ سوراخ، (ت) افشانه ۸ سوراخ، (ث) زاویه دید



شکل ۶: توزیع کسر حجمی حالت مایع در صفحه میانی سوراخ، (الف) افشانه ۲ سوراخ، (ب) افشانه ۴ سوراخ، (پ) افشانه ۶ سوراخ، (ت) افشانه ۸ سوراخ



شکل ۷: بردارهای سرعت در مقطع خروجی افشانه، (الف) افشانه ۲ سوراخ، (ب) افشانه ۴ سوراخ، (پ) افشانه ۶ سوراخ، (ت) افشانه ۸ سوراخ

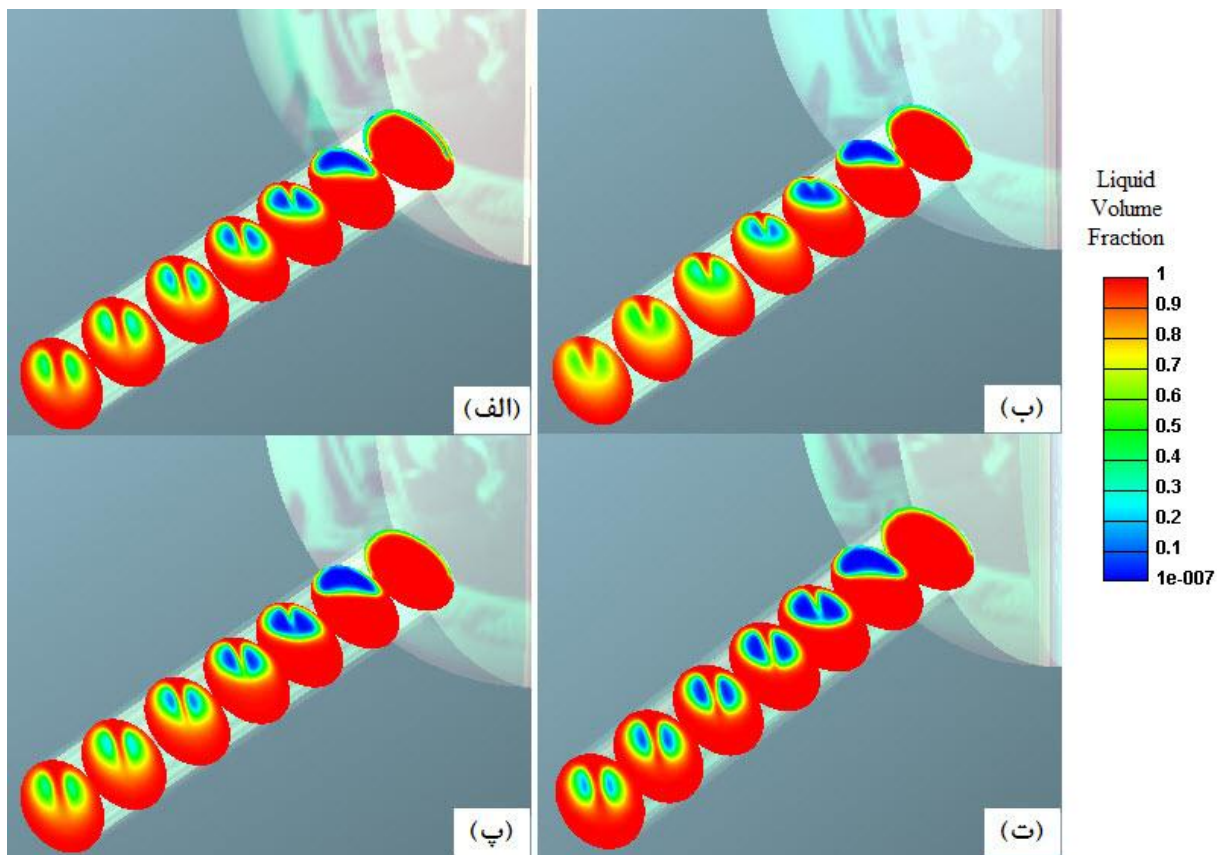
اتصال دو ناحیه بخار در مقطع خروجی افشانه چهار سوراخ شده است. از افشانه چهار سوراخ، با افزایش قدرت گردابه‌ها شاهد جدایش دو ناحیه بخار در مقطع خروجی هستیم. به علاوه با افزایش قدرت گردابه‌ها مقدار افت فشار در مرکز آنها به دلیل اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد؛ از این رو با افزایش قدرت گردابه‌ها مقدار حالت بخار در مرکز آنها افزایش یافته است. مقدار میانگین برخی از

برای مشاهده مقدار و نحوه توزیع حالت مایع و بخار در سوراخ، توزیع کسر حجمی حالت مایع برای هر چهار افشانه در شکل ۸، در هفت برش مقطعی از سوراخ افشانه به تصویر کشیده شده است. با توجه به شکل در اینجا نیز مقدار کسر حجمی حالت مایع به گونه‌ای بیانگر تغییر قدرت گردابه‌های تشکیل شده در سوراخ افشانه است. مطابق شکل از افشانه دو سوراخ به چهار سوراخ کاهش قدرت گردابه‌ها سبب

موضوع سبب کاهش اختلاف فشار در راستای سوراخ افشانه می‌شود. لذا حباب‌های حفره‌زایی بیشتری می‌توانند پیش از انهدام خود را به خروجی افشانه برسانند که افزایش مقدار حالت بخار در سطح مقطع خروجی افشانه و کاهش ضریب تخلیه را در پی دارد. در افشانه‌های شش و هشت سوراخ، هرچند با کاهش افت فشار در لبه ورودی، حباب‌های حفره‌زایی کمتری می‌توانند به خروجی سوراخ برسند، اما در مقابل با افزایش قدرت گردابه‌ها، مقدار افت فشار و در نتیجه مقدار حالت بخار در مرکز آن‌ها افزایش می‌یابد که در نهایت افزایش مقدار بخار در سطح خروجی افشانه و کاهش ضریب تخلیه را در به دنبال دارد.

مشخصه‌های جریان در سطح مقطع خروجی افشانه در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سوراخ‌ها، سرعت میانگین و شار جرمی جریان کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات انرژی جنبشی آشفستگی متناسب با تغییر قدرت گردابه‌ها است. از طرفی با افزایش تعداد سوراخ‌ها کسر حجمی حالت بخار افزایش یافته است، این افزایش برای افشانه‌های چهار، شش و هشت سوراخ با نرخ کمی دنبال می‌شود.

با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان روند تغییرات ضریب تخلیه را این گونه تفسیر کرد. از افشانه دو سوراخ به چهار سوراخ، با کاهش قدرت گردابه‌ها، افت فشار در لبه ورودی سوراخ افزایش می‌یابد. این



شکل ۸: توزیع کسر حجمی حالت مایع، (الف) افشانه ۲ سوراخ، (ب) افشانه ۴ سوراخ، (پ) افشانه ۶ سوراخ، (ت) افشانه ۸ سوراخ

۶ نتیجه‌گیری

برای بررسی تأثیر تعداد سوراخ‌ها بر مشخصه‌های جریان درون افشانه دیزل، جریان داخل افشانه تزریق با استفاده از شبیه‌سازی دوسیالی اولیبری شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که: افزایش تعداد سوراخ‌های افشانه، کاهش ضریب تخلیه را به دنبال دارد. از افشانه دو سوراخ به چهار سوراخ این کاهش ناگهانی است، اما برای افشانه‌های بیشتر از چهار سوراخ این کاهش با نرخ کمتری صورت می‌گیرد. این تغییرات را می‌توان به تغییر ساختار جریان درون کیسه افشانه نسبت داد چراکه ساختار و قدرت جریان‌های گردابه‌ای

جدول ۲: میانگین برخی مشخصه‌های جریان در سطح خروجی افشانه

تعداد سوراخ	سرعت جریان (m/s)	شار جرمی جریان (g/s)	انرژی جنبشی آشفستگی (m ² /s ²)	کسر حجمی حالت بخار
۲	۴۲۹٫۷۶	۵٫۵	۱۹۲۸٫۳۸	۰٫۱۱۹
۴	۴۲۲٫۰۴	۵٫۲۷	۲۲۲۱٫۰۶	۰٫۱۳۷
۶	۴۱۸٫۶۰	۵٫۲۳	۱۹۲۴٫۴۴	۰٫۱۳۸
۸	۴۱۵٫۰۵	۵٫۱۸	۱۶۴۳٫۳۷	۰٫۱۴۱

- [8] Z. He, J. Bai, Q. Wang, Q. Mu, Y. Huang, Numerical and experimental investigations of cavitating flow in a vertical multi-hole injector nozzle, 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting, Canada, 2010
- [9] AVL List GmbH, AVL Fire V. 2008, CFD Solver, Eulerian Multiphase, ICE Physics & Chemistry, 2008
- [10] A. Alajbegovic, H.A. Grogger, H. Philipp, Calculation of transient cavitation in nozzle using the two-fluid model, ILASS-Americas-99 Conference, USA, 1999
- [11] A. Alajbegovic, G. Meister, D. Greif, B. Basara, Three phase cavitating flows in high pressure swirl injectors, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 26, No. 6, pp. 677-681, 2001
- [12] C.E. Brennen, Fundamentals of multiphase flows, Cambridge University Press, 2005
- [13] H. Fujimoto, T. Mishikori, T. Tsumakoto, J. Senda, Modeling of atomization and vaporization process in flash boiling spray, ICLASS-94 Conference, France, 1994
- [14] M. Ishii, Thermo fluid dynamic theory of two-phase flow, Eyrolles, 1975
- [15] C. Soteriou, M. Smith, R. Andrews, Direct injection diesel sprays and the effect of cavitation and hydraulic flip on atomization, SAE International, Paper No. 950080, 1995
- [16] G. Stumpp, M. Ricco, Common rail - An attractive fuel injection system for passenger car DI diesel engines, SAE International, Paper No. 960870, 1996
- [17] S. Som, D.E. Longman, A.I. Ramirez, S.K. Aggarwal, A comparison of injector flow and spray characteristics of biodiesel with Petro-diesel, Fuel, Vol. 89, No. 12, pp. 4014-24, 2010
- [18] 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
- [19] R.H. Perry, D.W. Green, Perry's chemical engineers' handbook, McGraw-Hill, 1997

با تغییر تعداد سوراخ‌های افشانه تغییر می‌کند. از افشانه دو سوراخ به چهار سوراخ، با کاهش قدرت گردابه‌ها، افت فشار در لبه ورودی سوراخ افزایش و اختلاف فشار در راستای سوراخ افشانه کاهش می‌یابد. لذا با کاهش نرخ فروپاشی حباب‌های حفره‌زایی، مقدار حالت بخار در سطح مقطع خروجی افشانه افزایش و ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. در افشانه‌های شش و هشت سوراخ، هرچند با کاهش افت فشار در لبه ورودی، گرادیان فشار و در نتیجه نرخ فروپاشی حباب‌های حفره‌زایی در راستای سوراخ افزایش می‌یابد، اما در مقابل با افزایش قدرت گردابه‌ها، مقدار افت فشار و در نتیجه مقدار حالت بخار در مرکز آن‌ها افزایش می‌یابد که در نهایت افزایش مقدار بخار در سطح خروجی افشانه و کاهش ضریب تخلیه را در به دنبال دارد.

References

- [1] A. Mulemane, S. Subramaniam, P. Lu, J. Han, Comparing cavitation in diesel injectors based on different modeling approaches, SAE International, Paper No. 2004-01-0027, 2004
- [2] T.C. Clayton, Multiphase flow handbook, Taylor and Francis Group, CRC Press, 2006
- [3] C. Arcoumanis, H. Flora, M. Gavaises, M. Badami, Cavitation in real-size multi-hole diesel injector nozzles, SAE International, Paper No. 2000-01-1249, 2000
- [4] F. Payri, V. Bermudez, 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
- [5] C. Chryssakis, A unified fuel spray breakup model for internal combustion engine applications, PhD Thesis, Michigan University, USA, 2005
- [6] C. Arcoumanis, M. Gavaises, B. French, Effect of fuel injection processes on the structure of diesel sprays, SAE International, Paper No. 970799, 1997
- [7] Y. You, C.F. Powell, R. Poola, J. Wang, J.K. Schaller, Quantitative measurements of diesel fuel spray characteristics in the near-nozzle region using X-ray absorption, Atomization and Sprays, Vol. 11, No. 4, pp. 471-490, 2001



Numerical investigation of cavitation in diesel injector nozzle using two-fluid modeling

S. Sohrabi¹, A. Zandi², M. Shams^{3*}

¹K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, sohrabi.pgu@gmail.com

²K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, zandi.ab@gmail.com

³K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, shams@kntu.ac.ir

*Corresponding Author, Phone Number: +98-21-84063214

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 April 2014

Accepted: 02 July 2014

Keywords:

Cavitation

Nozzle geometry

Diesel injection

Numerical simulation

Multi-hole nozzle

ABSTRACT

In this paper, the effect of the injector geometry has been investigated on characteristics of the internal nozzle flow and the cavitation phenomenon. To this end, the cavitation flow inside a multi-hole diesel injector was simulated using the computational fluid dynamics. The flow inside the nozzle was considered transient and biphasic (liquid phase and vapor phase) and was simulated using the Eulerian two-fluid model, which is a non-homogeneous model. In this model, governing equations were solved for each phase separately. The interaction between phases was modeled using relevant interfacial exchange terms. To investigate the effect of the nozzle geometry on the cavitation flow, the number of injector holes was varied from 2 to 8. Results showed that by increasing the number of nozzle holes, the structure and the intensity of the vortex flow in the nozzle sac and holes are extremely varied. From the nozzle flow characteristics point of view, an increase in the number of nozzle holes, resulted in a reduction in the injection velocity and the mass flow rate and an increase in the cavitation intensity. Furthermore, the discharge coefficient and the effective area of the nozzle fall with increasing the number of nozzle holes. The simulation method was validated by comparing numerical results with experimental data and a good agreement was achieved.