

بررسی عددی تأثیر هندسه نازل انژکتور دیزل و فاصله سوزن بر شکل‌گیری افشانه

مجید روزبهانی^۱، میراعلم مهدی^۲

۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، m.mahdi@sru.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۰۵

چکیده

در این مقاله شبیه‌سازی تأثیر شکل هندسه نازل و ارتفاع سوزن بر روی افشانه سوخت دیزل با استفاده از نرم‌افزار فلونت بررسی شده است. با تغییر شکل نشیمنگاه و فاصله سوزن تا نشیمنگاه در شرایط ثابت، اندازه و محل شکل‌گیری کاویتاسیون درون نازل تغییر خواهد کرد. به همین دلیل ابتدا به صورت گذرا و با شبکه‌بندی متحرک و همچنین روش اسکندر - سائور، تأثیر هندسه نازل و فاصله سوزن تا نشیمنگاه بر شکل‌گیری کاویتاسیون درون نازل دیزل، شبیه‌سازی شده، سپس با استفاده از نتایج بدست آمده افشانه سوخت با روش تحلیل تصادفی قطره ثانویه^۱ شبیه‌سازی شده است. با هدف افزایش دقت حل مسئله نسبت به مقادیر تجربی و آزمایشگاهی، مراحل بررسی جریان سوخت درون نازل به صورت گذرا حل شده و سپس از نتایج مستخرج در بالادست، به عنوان مقادیر ورودی جریان در پایین دست و افشانه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر شکل نشیمنگاه و فاصله سوزن، کاویتاسیون و به طبع آن طول نفوذ افشانه چگونه تغییر خواهد کرد.

واژگان کلیدی

افشانه، نازل دیزل، شکل نشیمنگاه، سوزن نازل، کاویتاسیون.

۱. مقدمه

عملکرد نازل در پایین دست داشته باشد. تغییر سطح مقطع عبور سیال درون نازل که خود نیز تحت تأثیر مشخصه‌های دیگری است، یکی از عوامل اصلی شکل‌گیری پدیده کاویتاسیون درون نازل به شمار می‌رود. کاهش سطح مقطع جریان موجب افزایش سرعت و افت ناگهانی فشار می‌شود که در این حین در برخی سطح مقطع، فشار موضعی از فشار بخار سوخت کمتر شده و پدیده کاویتاسیون رخ می‌دهد. بنابراین محل و اندازه شکل‌گیری

شکل و مشخصه افشانه سوخت دیزل به هنگام پاشش در محفظه احتراق یکی از اصلی‌ترین موارد موثر بر کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی ناشی از احتراق است که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. هرچه میزان اختلاط سوخت و هوا در پایین دست بهبود یابد، عملکرد نازل سوخت دیزل بهینه‌تر خواهد شد. اما باید توجه داشت که تغییر در هریک از موارد فیزیکی و شیمیایی جریان در بالادست، می‌تواند تأثیر مستقیم بر کیفیت

کاویتاسیون تغییر خواهد کرد. پدیده کاویتاسیون منجر به افزایش سرعت سیال و افزایش برخورد قطرات می‌شود، که این امر طول نفوذ افشانه را افزایش و اختلاط سوخت و هوا را بهبود می‌بخشد.

در سال ۲۰۰۲ سینگ واکلی و همکاران [۱] تأثیر مشخصه جریان بر شکل‌گیری افشانه را مورد بررسی قرار دادند. براساس این آزمایش با تغییر سوخت دیزل به سوختی با نقطه جوش و چگالی کمتر، میزان بخار سوخت و طول نفوذ افزایش و آلودگی نیز کاهش یافت. در سال ۲۰۰۴ پیری و همکاران [۲] به مطالعه اثر کاویتاسیون بر شکل افشانه پرداختند. این آزمایش نشان داد که در نازل‌هایی با حفره استوانه‌ای، افزایش کاویتاسیون منجر به افزایش زاویه پاشش افشانه می‌شود که این امر در نهایت موجب اختلاط بهتر سوخت و هوا خواهد شد. دلاکورت و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۵ نیز به صورت آزمایشگاهی اثر فشار بالادست بر شکل افشانه و طول نفوذ را بررسی کردند که به خوبی نشان از یک رابطه مستقیم بود. در سال ۲۰۰۷ رویزن و همکاران [۴] تحقیق متفاوتی را در این زمینه انجام دادند. آن‌ها با افزایش فشار محفظه احتراق و ثابت نگه‌داشتن سایر موارد در بالادست و پایین دست، کاهش طول نفوذ سوخت را مشاهده کردند. به مرور انژکتورهای فشار بالا و سوخت بایودیزل مورد توجه قرار گرفتند. در سال ۲۰۱۲ کوتی و همکاران [۵] تأثیر فشار انژکتور، مشخصه سوخت و ابعاد نازل را بر شکل‌گیری افشانه سوخت بایودیزل بررسی کردند. نتایج آزمایش حاکی از آن بود که با افزایش نقطه جوش سوخت، طول هسته مایع در افشانه بیشتر می‌شود. در همان سال کوان دانگ و همکاران [۶] هندسه وی شکل نازل را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها در آزمایشگاه، نازل یک سوراخه قائم را با نازل یک سوراخه وی شکل مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش زاویه در نازل وی شکل، نسبت به نازل قائم، طول نفوذ کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۵ سالوادور و همکاران [۷] توانستند دو هندسه نازل بدون کیسه و نیمه کیسه‌ای را مقایسه کنند. نتایج آن‌ها نشان داد که نازل بدون کیسه، ضریب تخلیه و دبی جرمی کمتر و کاویتاسیون بیشتری ایجاد می‌کند. این شبیه‌سازی نشان داد که هندسه نازل بر طول نفوذ و زاویه پخش افشانه موثر است. پارک و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵ نیز اثر دمای سوخت را بررسی کردند و دریافتند که با کاهش دمای سوخت، طول نفوذ هسته مایع سوخت افزایش و زاویه پخش افشانه کاهش می‌یابد. پیری و

همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶ تحقیقات تجربی را انجام دادند که نتایج آن حاکی از آن بود که دمای محفظه احتراق اثر چندانی بر طول نفوذ بخار سوخت ندارد اما همان دما، اثر بزرگی بر ناحیه سوخت مایع و طول نفوذ آن دارد. در سال ۲۰۱۷ کارمان پانگ و همکاران [۱۰] تأثیر قطر اوریفیس نازل بر طول شعله را بررسی کردند که نتایج نشان داد با افزایش اندازه قطر اوریفیس، طول شعله کاهش می‌یابد. در این مقاله با توجه به کارهای انجام شده در این زمینه، عملکرد سه هندسه نازل با یکدیگر مقایسه و همچنین تأثیر فاصله سوزن نازل تا نشیمنگاه نازل بررسی شده است. زو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم اسپری R404A را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج ایشان نشان داد که پروفیل افشانه و طول نفوذ وابستگی زیادی به فشار محیط دارد. در مقاله دیگری از ادوارد گومز و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۰ با تحلیل عددی نازل دیزل چند سوراخه در ابعاد حقیقی مشخص شد که افزایش خلاء در هنگام باز و بسته شدن نازل موجب افزایش سرعت حرکت سوخت خواهد شد اما از طرفی به دلیل کاهش سطح مقطع جریان، عبور سوخت سخت‌تر و محدود خواهد شد. در سال ۲۰۲۰ توسط الکر تمیزر [۱۳] تأثیر سوخت نیز در مقایسه با سایر موارد بررسی شد که استفاده از سوخت‌های متفاوت تغییر چشمگیری در نرخ فشار و حرارت آزاد شده از موتور ایجاد نکرد.

در این مقاله به صورت عددی تأثیر هندسه نازل و جابجایی سوزن که به صورت گذرا شبیه‌سازی شده، بر روی حجم حفره کاویتاسیون و طول نفوذ افشانه بررسی شده تا مشخص شود استفاده از چه نوع نازلی موجب افزایش طول نفوذ افشانه شده یا تغییرات ارتفاع سوزن چه تأثیری بر روی جریان خواهد داشت.

۲. معادلات حاکم

شکل‌گیری کاویتاسیون درون نازل انژکتور دیزل به دلیل فشار ورودی بسیار بالا و ابعاد خیلی کوچک مسیر جریان سیال و در نتیجه سرعت بسیار زیاد جریان، پدیده‌ای سریع و گذرا می‌باشد. به همین خاطر انتقال حرارت مربوط به شکل‌گیری و فروپاشی حباب‌های پدید آمده، قابل چشم‌پوشی است و در نتیجه جریان در تعادل حرارتی قرار دارد. در این مدل جریان دوفاز درون نازل، مخلوط همگنی از بخار و مایع است.

تبدیل می‌شود. مرحله دوم زمانی شکل می‌گیرد که تکه‌های کوچک جریان به قطرات ریز شکسته می‌شوند. با مقابله نیروی برشی سوخت در مقابل برش هوا توسط نازل این پدیده رخ می‌دهد. عدد وبر که در معادله ۷ نشان داده شده است، عدد بدون بعدی است که بیانگر نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی است. هرچه این مقدار بیشتر باشد، تغییرات نیروی فشاری خارجی نیز بیشتر است.

$$We = \frac{\rho L U^2}{\sigma} \quad (7)$$

در این شبیه سازی بر اساس مقایسه نتایج عددی و تجربی، از مدل شکست تصادفی قطره ثانویه استفاده شده است. این مدل شکست قطره را به عنوان یک رویداد تصادفی در نظر می‌گیرد که مقیاس قطر توزیع، بیش از یک محدوده است. قطر اولیه بخش اسپری شده در محیط، در تنظیمات نرم افزار مشخص می‌شود. این مدل شکست زمانی را که شکست رخ و تعداد و مشخصات قطرات جدید را پیش‌بینی می‌کند. قطرات بزرگ‌تر از یک شعاع بحرانی دچار شکست می‌شوند که در رابطه ۸ مشخص شده است.

$$r_c = \frac{We_c \sigma_l}{\rho_g U^2} \quad (8)$$

که در رابطه فوق We_c و U به ترتیب بیانگر عدد وبر بحرانی و سرعت نسبی است. عدد پیش فرض برای وبر بحرانی ۶ در نظر گرفته شده است. زمان شکست نیز از طریق رابطه ۹ مشخص می‌شود.

$$t_{bu} = B \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \frac{r}{|U|} \quad (9)$$

که در عبارت فوق B مقدار ثابت شکست می‌باشد که به طور پیش فرض $1/73$ در نظر گرفته می‌شود. قطراتی با شعاع بزرگتر از شعاع بحرانی (که بر اساس عدد وبر بحرانی مشخص می‌شود)، زمان شکستشان افزایش یافته است. زمانی که زمان شکست بیشتر از زمان شکست بحرانی می‌شود (به طور معمول بر اساس شرایط سلول و بخش حل تعیین می‌شود)، شکست رخ می‌دهد. قطر قطرات ثانویه تابعی از لوگاریتم طبیعی شعاع قطرات است.

$$T(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\xi^2)}} \exp\left[-\frac{(x-x_0-\xi^2)^2}{2\xi^2}\right] \quad (10)$$

که در رابطه فوق ξ^2 و ξ مقادیر این مدل هستند. ξ که باید توسط کاربر مشخص شود یک عدد بدون بعد منفی است. البته باید توجه داشت که مقدار آن را می‌توان مطابق با رابطه ۱۱ در نظر گرفت.

$$\xi^2 = -0.1 \ln\left(\frac{We_c}{We}\right) \quad (11)$$

در روش مدل‌سازی کائیتاسیون در جریان چند فازی، یک مدل پایه کائیتاسیون دو فازی، شامل معادلات حاکم جریان استاندارد ویسکوز در انتقال مخلوط (مدل مخلوط) یا فازها (چند فاز اولری) و یک مدل آشفته‌گی رایج (مدل $k-\epsilon$) است. در حالت کائیتاسیون، مطابق با معادله ۱ انتقال جرم مایع - بخار (تبخیر یا میعان) تحت معادلات انتقال بخار محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{V}_v) = R_e - R_c \quad (1)$$

در رابطه فوق عبارت v نماد فاز بخار، α بیانگر کسر حجمی بخار، ρ_v بیانگر چگالی فاز بخار، \vec{V}_v نشان‌دهنده سرعت فاز بخار، R_e و R_c به ترتیب عبارت منبع انتقال جرم مربوط به رشد و انهدام حباب‌های بخار را نشان می‌دهند. همانطور که پیش‌تر گفته شد، جهت شبیه‌سازی کائیتاسیون از معادلات اسکندر - سائور استفاده شده است. این مدل نیز از یک روش مشابه در توصیف دقیق انتقال جرم از مایع به بخار استفاده می‌کند. معادله کلی برای کسر حجمی بخار به صورت معادله ۲ است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{V}) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{d\alpha}{dt} \quad (2)$$

عبارت چشمه جرم به صورت معادله ۳ نوشته می‌شود:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

در این مدل از رابطه ۴ در تفسیر ارتباط کسر حجمی بخار با تعداد حباب در حجم مایع استفاده می‌شود.

$$\alpha = \frac{n_b \times \frac{4}{3} \pi \times \mathfrak{R}_B^3}{1 + n_b \times \frac{4}{3} \pi \times \mathfrak{R}_B^3} \quad (4)$$

همچنین در این مدل روابط به صورت معادلات ۵ و ۶ استفاده می‌شود:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2 P_v - P}{3 \rho_l}} \quad (5)$$

$$\mathfrak{R}_B = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \times \frac{3}{4\pi} \times \frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

در این مدل تنها متغیری که باید معلوم باشد، تعداد حباب‌های کروی در واحد حجم مایع است. آگه فرض مسئله بر این باشد که هیچ حبابی بوجود نیاید و یا از بین نرود، آن‌گاه چگالی تعداد حباب‌ها ثابت باقی خواهد ماند.

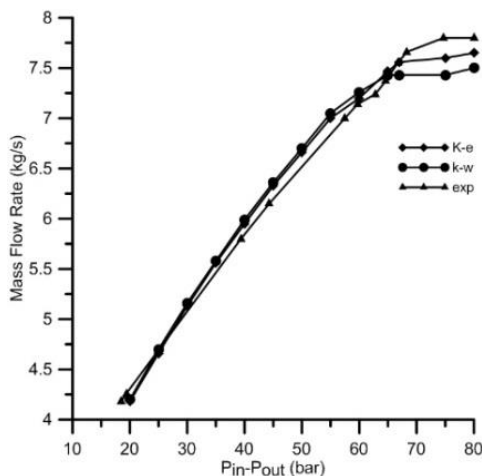
افشانه سوخت نیز به عنوان یک سیال دو فازی محسوب می‌شود. بخش سوخت مایع به عنوان فاز گسسته و بخش بخار یا همان گاز به عنوان فاز پیوسته تعیین شده است. گسستگی جریان مایع یا همان تمیزه شدن در دو مرحله اتفاق می‌افتد. مرحله اول تمیزه شدن زمانی رخ می‌دهد که جریان به تکه‌هایی کوچکتر

۳. اعتبارسنجی

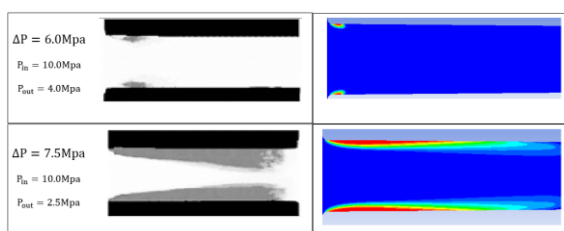
زمانی که استقلال از شبکه و نوع شبکه بندی تعیین می‌شود، باید مدل مناسبی برای شکل‌گیری کاپیتاسیون انتخاب شود. با ایجاد شبکه مناسب، میدان جریان با دو مدل آشفتگی $k-\omega$ و $k-\epsilon$ مورد تحلیل قرار گرفت. شبکه ایجاد شده برای مدل آشفتگی $k-\omega$ به اندازه کافی در کنار دیواره مترکم است که مقدار $y^+ = 1$ باشد. تعداد سلول‌های شبکه مربوط به مدل $k-\epsilon$ حدود ۱۸۵۰۰۰ است در حالی که برای مدل $k-\omega$ به مقدار ۲۵۰۰۰۰ افزایش یافته است. لازم به ذکر است که برای انتخاب این تعداد سلول، استقلال از شبکه نیز بررسی شده است. به همین منظور تغییرات سرعت برای هر دو مدل آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی در مقطعی از نازل به فاصله ۵۳ میکرومتر از لبه ورودی بررسی شده است. روند تغییر نمودارها برای هر دو حالت تحت شرایطی که کاپیتاسیون وجود داشته باشد و وجود نداشته باشد مورد تحلیل و مقایسه با نتایج عددی صورت گرفته است که نتایج قابل قبولی را به همراه داشته است.

روند تغییر نمودارها مشابه یکدیگر می‌باشد به طوری که بر روی دیواره نازل مقدار سرعت صفر بوده است و بلافاصله سرعت جریان نزدیک دیواره به مقدار بیشینه می‌رسد و سپس در مرکز نازل مقدار سرعت کمی کاهش می‌یابد. مقایسه نمودارهای سرعت در فاصله ۵۳ میکرومتری از ورودی نازل به صورت عددی و آزمایشگاهی در نمودار شکل ۱ قابل مشاهده است.

آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با افزایش اختلاف فشار مقدار دبی جرمی افزایش یافته تا جایی که به یک مقدار بیشینه می‌رسد. سپس با افزایش بیشتر مقدار اختلاف فشار، تغییری در دبی جرمی ایجاد نمی‌شود. در این حالت حفره کاپیتاسیون به حالت سوپر کاپیتاسیون تبدیل شده و کل فضای داخل نازل را پوشش داده و جریان چوک شده است. از طرفی برای دو اختلاف فشار $\Delta P = 6 \text{ MPa}$ و $\Delta P = 7.5 \text{ MPa}$ توزیع کسر بخار در صفحه میانی نازل در شکل ۳ آورده شده است. مطابقت خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی در این شکل مشاهده می‌شود. با افزایش اختلاف فشار حجم حفره کاپیتاسیون درون نازل افزایش می‌یابد.

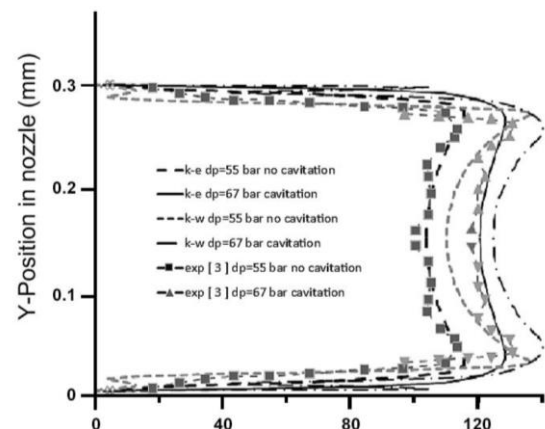


شکل ۲. تغییرات دبی جرمی نازل بر حسب اختلاف فشار [۱۲]



شکل ۳. توزیع کسر بخار در صفحه میانی نازل برای اختلاف فشار مختلف [۱۲]

اولین گام برای انجام شبیه‌سازی، تعیین و تایید روندی مناسب برای تنظیمات حل نرم‌افزار برای مقایسه دقیق‌تر نتایج عددی و آزمایشگاهی جریان سیال و افشانه درون نازل و پایین دست (محفظه احتراق) می‌باشد. به همین منظور برای انجام اعتبارسنجی در این فصل، از مقاله قاسمی و همکاران [۱۳] که هم‌داری نتایج عددی و هم نتایج آزمایشگاهی است، استفاده شده



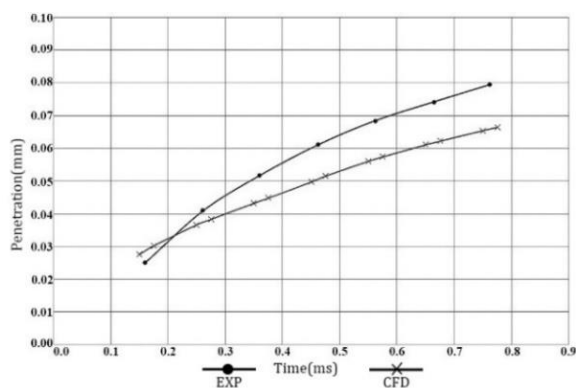
شکل ۱. توزیع سرعت در مقطع عرضی به فاصله $53 \mu\text{m}$ از لبه ورودی نازل [۱۴]

سپس اعتبارسنجی انتخاب مدل کاپیتاسیونی مطابق با نازل وینکهورف صورت گرفته است. شکل ۲ به ازای اختلاف فشارهای مختلف دو طرف نازل، مقدار دبی جرمی سوخت را برای دو مدل

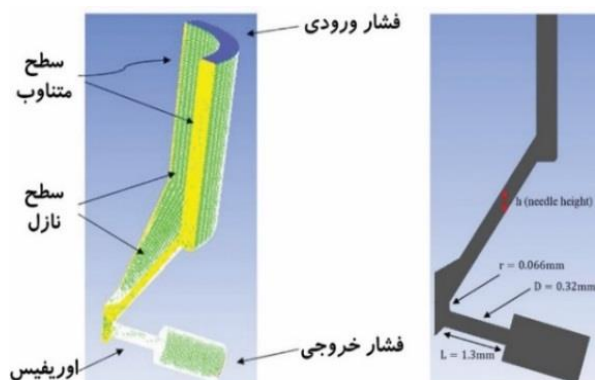
اعتبار سنجی انجام شده در حالت ناپایا بین مقادیر تجربی و عددی، میزان خطای گزارش شده قابل قبول و مورد استفاده است. مقدار خطای اعتبارسنجی انجام شده در مقایسه با خطای ۱۷/۷۴ درصد که بین نتایج عددی و تجربی در مقاله قاسمی و همکاران تایید شده است، قابل قبول می‌باشد.

۴. بحث بر روی نتایج

سه نازل انژکتور دیزل با هندسه متفاوت همانند شکل ۶ مدل‌سازی و شبکه‌بندی شده‌اند. نازل اصلی دارای چهار سوراخ با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم بوده که جهت کاهش حجم محاسبات، یک چهارم نازل شبیه‌سازی شده و از شرط تکرار متناوب در صفحات کناری استفاده شده است. در شکل ۶ نمایشی از شبکه بندی، شرایط مرزی و ابعاد اوریفیس نازل در صفحه میانی نازل کیسه‌ای (استاندارد) نشان داده شده است. باتوجه به مقایسه نتایج بین سه هندسه، اوریفیس نازل‌ها با ابعاد یکسان طراحی شده است. در شکل ۷ نیز، صفحه میانی هندسه هر سه نازل کیسه‌ای^۲، بهینه^۳ و بدون کیسه^۴ نشان داده شده تا محل و هندسه نازل مشخص شود.

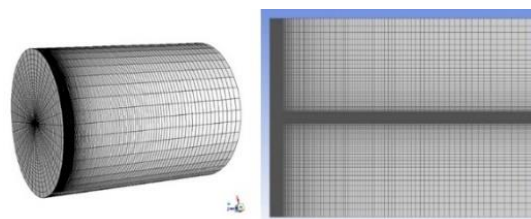


شکل ۵. نمودار مقایسه نتایج عددی و تجربی [۱۵]



شکل ۶. شبکه بندی و شرایط مرزی نازل انژکتور

است. در مقاله مذکور، تاثیر مشخصه‌های جریان بر میزان طول نفوذ و شکل گیری افشانه به صورت تجربی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. استوانه‌ای با قطر ۶۰ میلی‌متر و طول ۸۰ میلی‌متر در نرم‌افزار فلوئنت طراحی شده است. در نهایت شبکه ای با 105×675 سلول با سازمان جهت شبیه سازی استفاده شد. به منظور افزایش دقت حل، شبکه بندی در ناحیه ورودی سوخت به محفظه با تراکم نسبتاً زیادی نسبت به سایر نقاط دوردست جریان انجام شده که در شکل ۴ نشان داده شده است. از اساس حل لاگرانژی اولری چندفازی برای محاسبات و تعامل گسسته (سوخت) و فاز پیوسته (هوا) استفاده شده است. معادلات ناپایای میانگین رینولدز، ناویر استوکس برای فاز پیوسته (سوخت) با مدل استاندارد آشفتگی $k-\epsilon$ حل شده است. در بخش تنظیمات حل، روش حجم محدود با الگوریتم حل کوئیک برای عبارت‌های مومنتم و معادلات آشفتگی و روش حل استاندارد برای تعاملات فشار استفاده شده است. گسسته‌سازی‌های ضمنی معادلات، از روش مرتبه اول با گام زمانی $6-10 \times 10^{-6}$ انجام شده است. روش حل معادلات برای تعامل فشار-سرعت، الگوریتم حل سیمپل سی انتخاب شد. سوخت مورد استفاده، دیزل با مشخصات مذکور در جدول ۱ است.

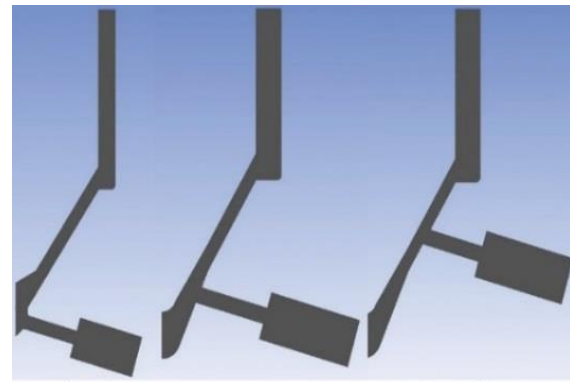


شکل ۴. هندسه سه بعدی و شبکه‌بندی هندسه محفظه احتراق

جدول ۱: مشخصات فیزیک سوخت دیزل

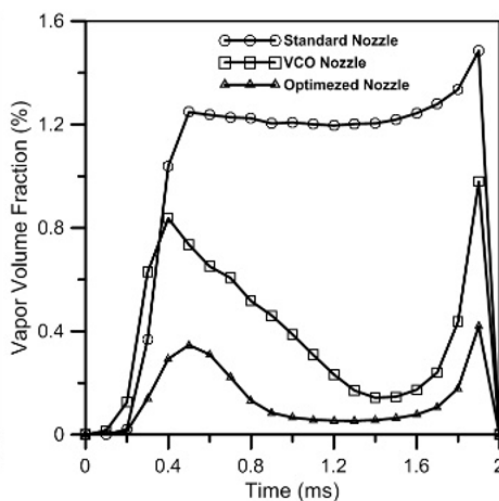
مقدار	پارامتر
۸۳۰	چگالی (kg/m^3)
۳/۳۶	لزجت (mm^2/s)
۲۵/۵	کشش سطحی (mN/m)
۵۵	عدد ستان
۴۳/۱	مقدار گرما (Mj/Kg)

بنابر مقادیر به دست آمده در نمودار شکل ۵ روند تغییرات بین حالت عددی و تجربی مشابه و نهایتاً در کل زمان پاشش سوخت در محفظه پایین دست، حداکثر میزان خطا نسبت به حالت تجربی در فشار ورودی ۳۰۰ MPa به ۱۶/۴ درصد می‌رسد بر اساس



شکل ۷. صفحه میانی سه هندسه نازل

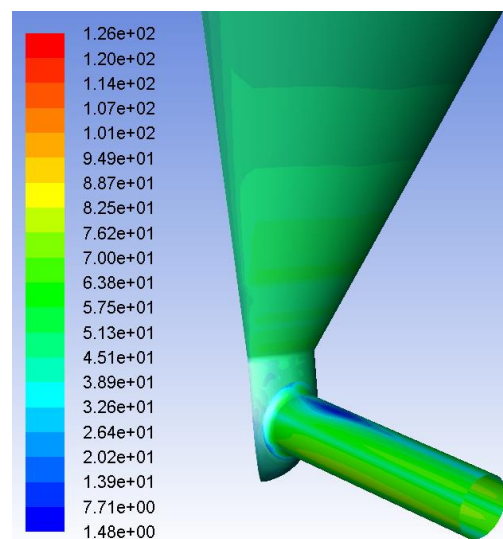
شکل ۸ توزیع مقدار γ^+ بر روی دیواره نازل را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه γ^+ در این شبکه بندی حدود ۱۲۶ است. با توجه به اینکه تابع دیواره در این شبیه‌سازی scalable انتخاب شده است این محدوده برای γ^+ قابل قبول است. شکل ۹ کسر بخار حجمی برای سه هندسه استاندارد، بهینه و بدون کیسه در حالت گذرا را نشان می‌دهد. نازل استاندارد دارای بیشترین کسر حجمی بخار و نازل بهینه کمترین کسر حجمی بخار را دارد. تقریباً روند تغییرات کسر حجم بخار در هر سه هندسه مشابه است. مقدار بخار تا حدود زمان ۰/۴ میلی ثانیه افزایش یافته و سپس حدوداً تا زمان ۱/۵ میلی ثانیه کاهش می‌یابد. مجدداً تا پایان بسته شدن نازل مقدار بخار افزایش چشم گیری می‌یابد. در دو هندسه بهینه و بدون کیسه برخلاف هندسه استاندارد کاهش مقدار بخار در بین زمان ۰/۴ الی ۱/۵ میلی ثانیه کاملاً واضح و چشمگیر است. علت این پدیده تفاوت هندسه و تاثیر آن در محل وقوع بیشینه سرعت و در نتیجه تغییر محل جدایش جریان در نازل است.



شکل ۹. نمودار تغییرات کسر حجمی بخار بر حسب زمان برای سه هندسه مختلف

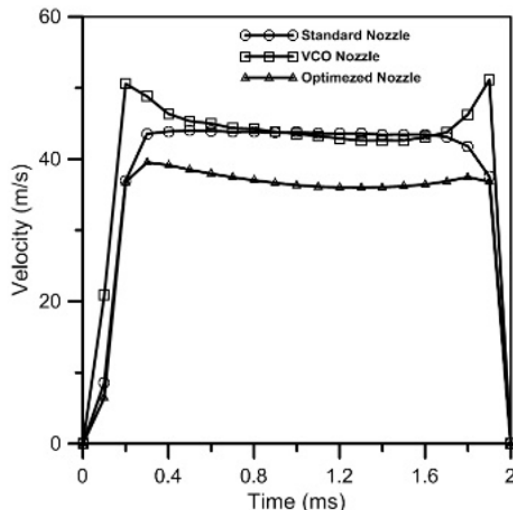
با ثابت بودن دبی جرمی و بیشتر شدن حجم بخار در نازل، سطح مقطع عبور جریان کاهش می‌یابد و در نتیجه سرعت جریان افزایش خواهد یافت. از طرفی محل و اندازه تشکیل کاویتاسیون در تغییرات سطح مقطع جریان و سرعت سوخت موثر است. به همین دلیل همانطوری که شکل ۱۰ نشان می‌دهد سرعت جریان سوخت در نازل بهینه نسبت به دو نازل دیگر کمتر است.

روند شبیه‌سازی عددی بدین صورت است که با تعریف شرایط مرزی فشار ورودی ۱/۶ MPa و فشار خروجی 1×10^5 Pa (فشار داخل سیلندر فشار محیط در نظر گرفته شده است) یا به طور دقیق برای ریشه دوم عدد کاویتاسیون $1/0.318$ ، به دلیل وجود اختلاف فشار جریان درون نازل برقرار خواهد شد. برای یک مقدار اختلاف فشار ثابت، بسته به فاصله سوزن تا نشیمنگاه، مقدار دبی جرمی درون نازل برقرار می‌شود. به دلیل ماهیت ذاتی فرآیند که به صورت گذرا می‌باشد برای رسیدن به نتایج دقیق، شبیه‌سازی به صورت گذرا انجام شده است. با استفاده از قابلیت شبکه متحرک از لحظه‌ای که سوزن در پایین‌ترین موقعیت خود قرار دارد شبیه سازی شروع شده و ارتفاع سوزن به مقدار بیشینه خود رسیده و دوباره به موقعیت اولیه برمی‌گردد. این سیکل چندین بار انجام شده که در اینجا تنها نتایج مربوط به یک سیکل آورده شده است.

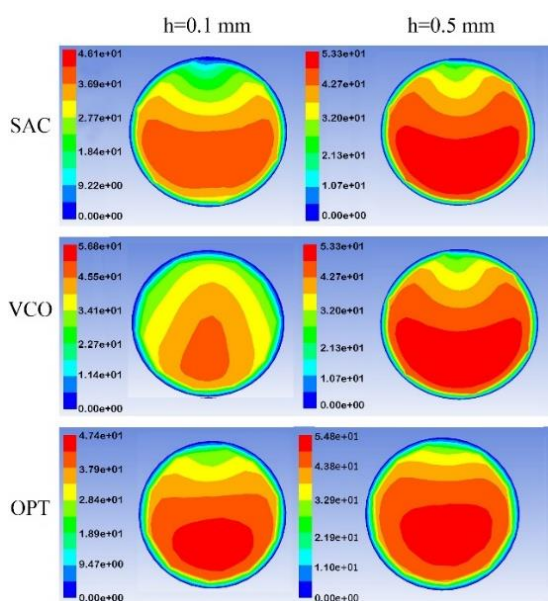


شکل ۸. توزیع γ^+ بر روی دیواره نازل

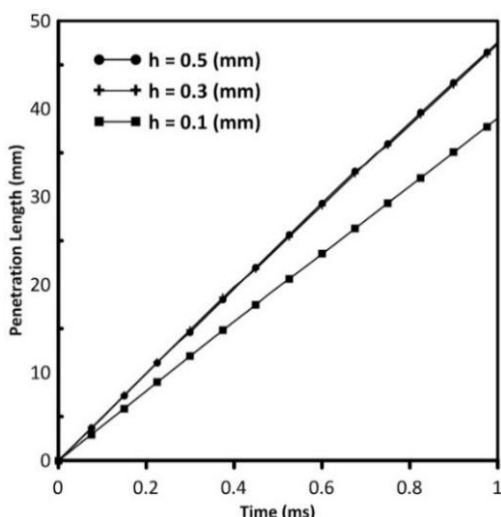
کاویتاسیون و مقدار آن در اوریفیس نازل افزایش می‌یابد که با کاهش سطح مقطع عبور سوخت، سرعت جریان نیز بیشتر خواهد شد، که این امر موجب می‌شود در شرایطی تقریباً ثابت و مشابه، با افزایش فاصله سوزن تا نشیمنگاه میزان طول نفوذ سوخت بیشتر شود. اما از زمانی که سوزن نازل حدوداً بیش از ۵۰ درصد مسیر خود را طی کند، مقدار تغییرات دبی جرمی تقریباً ثابت می‌شود، به همین ترتیب مقدار طول نفوذ نیز تغییر محسوسی نخواهد داشت. از طرفی نمودار شکل ۱۲ و نتایج این بخش حاکی از آن است که طول مسافت حرکت سوزن، تا حد مشخصی موثر بوده و الزاماً با افزایش بیش از حد فاصله سوزن، نمی‌توان انتظار تغییرات چشم‌گیری داشت.



شکل ۱۰. تغییرات سرعت جریان در خروجی نازل بر حسب زمان



شکل ۱۱. پروفیل سرعت در سطح مقطع اوریفیس و پایین دست

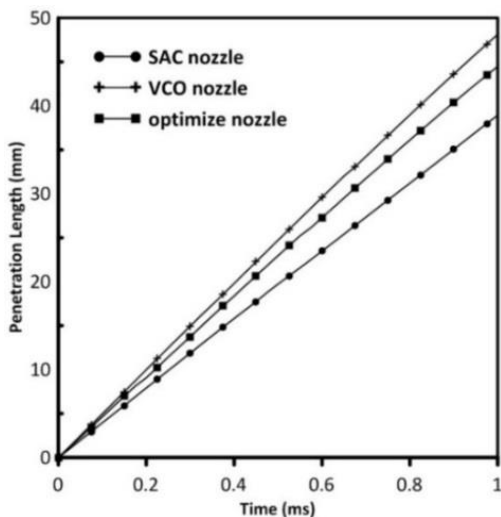


شکل ۱۲. اثر فاصله سوزن تا نشیمنگاه بر طول افشانه برای نازل کیسه‌ای

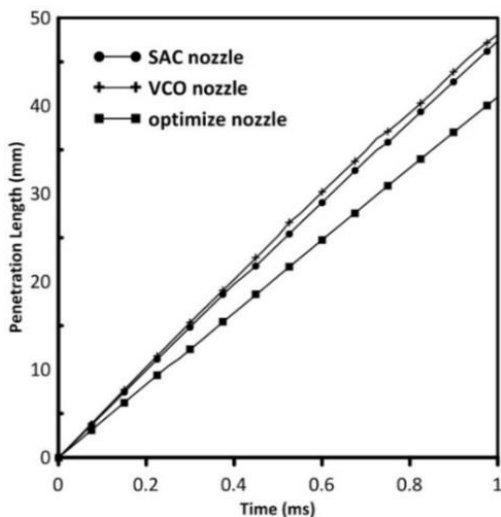
به دلیل تشکیل حفره کاویتاسیون در اوریفیس نازل، سطح مقطع عبور جریان کاهش یافته که این امر منجر به افزایش سرعت حرکت سوخت در اوریفیس و ناحیه متصل به پایین دست خواهد شد. عدم پراکندگی متقارن حباب‌های کاویتاسیون باعث می‌شود که پروفیل سرعت در مقطع خروجی یکسان نباشد. بنابراین جهت بالابردن دقت حل مسئله از میانگین سطحی سرعت در مقطع اتصال اوریفیس به محفظه احتراق استفاده شده که در شکل ۱۱ پروفیل سرعت در سطح مقطع برای هر سه نازل در سه ارتفاع مشخص و معین، به خوبی نشان داده شده است. به دلیل تشکیل حفره کاویتاسیون در بالادست خروجی جریان، توزیع سرعت در خروجی نازل غیریکنواخت شده و هندسه متفاوت انژکتور موجب می‌شود که جریان با توزیع سرعت مشخص از نازل خارج شده و وارد محفظه احتراق می‌شود. یکی از پارامترهایی که در طول نفوذ افشانه تأثیر گذار است مقدار و نحوه سرعت خروجی از نازل می‌باشد. در ادامه از این توزیع سرعت جهت شبیه‌سازی افشانه استفاده شده است.

بعد از بررسی نتایج به صورت گذرا در بالادست، تأثیر فاصله سوزن تا نشیمنگاه بر طول نفوذ افشانه شبیه سازی و اجرا شد. مطابق نتایج بدست آمده و نمودار شکل ۱۲، با افزایش مقدار فاصله بین سوزن و سطح نشیمنگاه نازل، مقدار طول نفوذ افشانه افزایش می‌یابد که نشان از بهبود شکل افشانه و در نتیجه تأثیر مثبت آن در اختلاط سوخت و هوا خواهد بود. هرچه فاصله سوزن از سطح نشیمنگاه نازل بیشتر شود، مقدار دبی جرمی جریان سوخت دیزل بیشتر خواهد شد. از طرفی با افزایش فاصله، طول

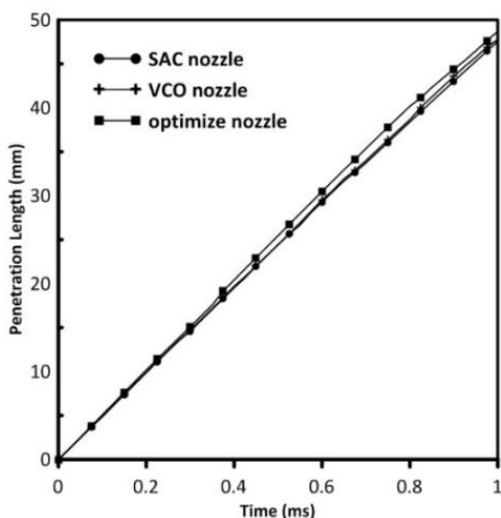
شرایط، کمی بیشتر از دو حالت دیگر است. علت این امر دبی جرمی بیشتر در نازل بهینه نسبت به دو هندسه دیگر، می‌باشد.



شکل ۱۳. مقایسه تاثیر هندسه بر طول نفوذ آفشانه در ارتفاع ۰/۱ میلی‌متر



شکل ۱۴. مقایسه تاثیر هندسه در ارتفاع ۰/۳ میلی‌متری سوزن نازل



شکل ۱۵. مقایسه تاثیر هندسه در ارتفاع ۰/۵ میلی‌متری سوزن نازل

در ادامه تاثیر هندسه نازل بر طول نفوذ آفشانه تحت شرایط کاملاً یکسان برای سه ارتفاع متفاوت، شبیه‌سازی شد. طول نفوذ آفشانه برای هر سه هندسه برای ارتفاع سوزن ۰/۱ میلی‌متری، شبیه‌سازی شده و نتایج در نمودار شکل ۱۳ آمده است. برای هر سه هندسه با گذشت زمان طول آفشانه به صورت خطی زیاد می‌شود. همچنین برای یک زمان مشخص طول نفوذ نازل کیسه‌ای نسبت به هندسه دیگر کمتر است. روند این مقایسه در ارتفاع ۰/۳ میلی‌متر نیز انجام شده که نتایج بدست آمده از آن در نمودار شکل ۱۴ نشان داده شده است. بنابر نتایج مندرج در نمودار شکل ۱۴ به مرور زمان با افزایش فاصله سوزن نازل از سطح نشیمنگاه، عملکرد نازل کیسه‌ای و بدون کیسه نسبتاً مشابه است. اما کماکان تا به این‌جا عملکرد نازل بهینه به دلیل شکل، اندازه و محل شکل‌گیری حفره کاپیتاسیون درون اوریفیس، به گونه‌ای است که طول نفوذ کمتری نسبت به دو هندسه دیگر دارد، که این امر از نظر بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌گی، مطلوب نمی‌باشد. همچنین مشخص است که با افزایش ارتفاع سوزن عملکرد آفشانه برای هندسه کیسه‌ای افزایش پیدا کرده حتی نسبت به هندسه بهینه نیز بهتر می‌شود. شکل ۱۵ لحظه‌ای را نمایش می‌دهد که سوزن نسبتاً باز شده و فاصله آن با سطح نازل حدوداً به حداکثر مقدار خود رسیده است. در این لحظه بنابر نتایج به دست آمده در بخش قبلی، مقدار سرعت و ضریب تخلیه برای هر سه هندسه نازل در فشارهای نسبتاً زیاد و زمانی که فاصله نازل تا نشیمنگاه به حداکثر مقدار خود می‌رسد، مشابه یکدیگر است. به همین منظور بنابر اطلاعات استفاده شده در این بخش نیز مقدار میانگین سطحی سرعت برای هر سه هندسه، مشابه است که همین امر موجب خواهد شد در این شرایط مطابق با شکل ۱۵، روند تغییرات و طول نفوذ سوخت در پایین دست برای ارتفاع ۰/۵ میلی‌متری برای هر سه هندسه مشابه و نسبتاً یکسان باشد. زمانی که سوزن نازل در فاصله ۰/۵ میلی‌متری قرار گرفته است و به عبارت دیگر نازل کاملاً باز است، عملکرد هر سه نازل مشابه یکدیگر بوده و تفاوت چشم‌گیری بین نتایج وجود ندارد. براساس نتایج نمودار شکل ۱۵، میانگین سرعت سطحی برای هر سه نازل در شرایط یکسان برای ارتفاع ۰/۵ میلی‌متری مشابه و نسبتاً یکسان است، به همین علت طول نفوذ آن‌ها با یکدیگر مشابه خواهد شد، اما طول نفوذ در نازل بهینه در این

۵. نتیجه گیری

به دلیل افزایش دبی جرمی سوخت، میزان طول نفوذ زیاد می‌شود ولی بیشتر از این مقدار بر روی حجم کاویتاسیون و طول نفوذ افشانه مؤثر نیست. بررسی نتایج مربوط به یک حالت خاص نشان می‌دهد که سرعت خروجی سوخت از نازل بدون کیسه نسبت به هندسه بهینه ۱۵/۴۲ درصد و به نازل کیسه‌ای ۳ درصد افزایش پیدا کرده که نتیجه آن افزایش طول نفوذ سوخت نسبت به دو هندسه دیگر به ترتیب ۲۶/۳۱ درصد و ۹/۹ درصد می‌باشد.

با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی با رویکرد حجم کنترل جریان درون سه نازل انژکتور دیزل با هندسه متفاوت به صورت گذرا شبیه‌سازی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که نوع هندسه بر میزان حفره کاویتاسیون تشکیل شده درون نازل تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. به طوری که در هندسه بهینه، حجم بخار کمتر و ضریب تخلیه بیشتر از دو هندسه دیگر است. با افزایش فاصله سوزن از نشیمنگاه تا حدود ۶۰ درصد مسیر حرکت مؤثر،

۶. مأخذ

- [1] S. Lee, D. Tanaka, J. Kusaka, Y. Daisho, Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a Diesel engine, *JSAE Review*, Vol. 23 pp. 407–414, 2002.
- [2] 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, *J. of Fuel*, Vol. 83, pp. 419–431, 2004.
- [3] E. Delacourta, B. Desmet, B. Besson, Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques, *J. of Fuel*, Vol. 84, pp. 859–867, 2005.
- [4] I.V. Roisman, L. Araneo, C. Tropea, Effect of ambient pressure on penetration of a diesel spray, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 33, pp. 904–920, 2007.
- [5] O. A. Kuti, J. Zhu, K. Nishida, X. Wang, Z. Huang, Characterization of spray and combustion processes of biodiesel fuel injected by diesel engine common rail system, *J. of Fuel*, Vol. 104, pp. 838–846, 2013.
- [6] Q. Dong, W. Long, T. Ishima, H. Kawashima, Spray characteristics of V-type intersecting hole nozzles for diesel engines, *J. of Fuel*, Vol. 104, pp. 500–507, 2013.
- [7] F.J. Salvador, M. Carreres, D. Jaramillo, J. Martínez-López, Comparison of microsac and VCO diesel injector nozzles in terms of internal nozzle flow characteristics, *J. of Energy Conversion and Management*, Vol. 103, pp. 284–299, 2015.
- [8] Y. Park, J. Hwang, C. Bae, K. Kim, J. Lee, S. Pyo, Effects of diesel fuel temperature on fuel flow and spray characteristics, *J. of Fuel*, Vol. 162, pp. 1–7, 2015.
- [9] R. Payri, J. Gimeno, G. Bracho, D. Vaquerizo, Study of liquid and vapor phase behavior on Diesel sprays for heavy duty engine nozzles, *J. of Applied Thermal Engineering*, Vol. 107, pp. 365–378, 2016.
- [10] K. M. Pang, M. Jangi, X.S. Bai, J. Schramm, J. H. Walther, Effects of Nozzle Diameter on Diesel Spray Flames: A numerical study using an Eulerian Stochastic Field Method, *J. of Energy Procedia*, Vol. 142, 1028–1033, 2017.
- [11] Z. F. Zhou, G. Y. Lu, B. Chen, Numerical study on the spray and thermal characteristics of R404A flashing spray using OpenFOAM. *Int. J. Heat Mass Transf*, Vol. 117, pp. 1312–1321, 2018.
- [12] E. G. Santos, J. Shi, M. Gavaises, C. Soteriou, M. Winterbourn, W. Bauer, Investigation of cavitation and air entrainment during pilot injection in real size multi-hole diesel nozzles, *J. of Fuel*, Vol. 263, 116746, 2020.
- [13] İ. Temizer, The combustion analysis and wear effect of biodiesel fuel used in a diesel engine, *J. of Fuel*, Vol. 270, 117571, 2020.
- [14] E. Winklhofer, E. Kull and E. Kelz, Comprehensive hydraulic and flow field documentation in model throttle experiments under cavitation conditions, Proceedings of the ILASS-Europe conference, Zurich; pp. 574–9, 2001.
- [15] A. Ghasemi, R.M. Barron, R. Balachandar, Spray-induced air motion in single and twin ultra-high injection diesel sprays, *J. of Fuel*, Vol. 121, pp. 284–297, 2014.

پی‌نوشت

1. SSD (Stochastic Secondary Droplet)
2. SAC
3. OPT (optimize)
4. VCO (Valve closes orifice)