

## بررسی عددی تأثیر فاصله سوزن و شکل نشیمنگاه بر پدیده کاویتاسیون درون نازل انژکتور

میراعلم مهدی<sup>۱</sup> و محمد سالاری<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران (نویسنده مخاطب)، m.mahdi@srttu.edu  
۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، mohammadsalari1350@yahoo.com  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵/۲۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۴/۱۱/۳۰، پذیرش: ۹۴/۱۲/۲۷)

**چکیده:** در این مقاله، جریان سیال داخل نازل انژکتور موتور دیزل با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و به کمک نرم افزار انسیس فلونت شبیه سازی شده است. جریان دوفاز به صورت مخلوط همگن در نظر گرفته شده و مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  و مدل کاویتاسیون اسکنر-سویر برای شبیه سازی عددی انتخاب شده است. ابتدا نازلی که نتایج آزمایشگاهی برای آن موجود بوده شبیه سازی شده و با اعتبارسنجی نتایج، مدل آشفتگی مناسب انتخاب شده است. سپس یک نازل انژکتور واقعی چهارسوراخه برای شبیه سازی انتخاب شده است. برای کاهش هزینه محاسبات، تنها یک چهارم نازل مدل سازی شده و به ازای اختلاف فشارهای مختلف، مقدار دبی جریان و ضریب تخلیه به دست آمده است. تحلیل های انجام شده برای سه نشیمنگاه مختلف با ارتفاع متفاوت سوزن انژکتور انجام شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که ارتفاع سوزن انژکتور و شکل نشیمنگاه علاوه بر ضریب تخلیه بر محل تشکیل حفره کاویتاسیون نیز تأثیرگذار است.

**کلیدواژگان:** انژکتور، کاویتاسیون، شکل نشیمنگاه، ارتفاع سوزن، ضریب تخلیه

### مقدمه

احتراق گازوییل و سوخت دیزل موجب انتشار گازها و ذرات مضر متعددی می شود. یکی از راهکارهای کنترل آلاینده ها کاهش تولید مواد آلوده کننده داخل سیلندر است. کاهش مواد آلوده کننده داخل سیلندر با جریان داخلی نازل و گردافشانی<sup>۱</sup> مرتبط می شود. گردافشانی سوخت در پایین دست نازل به وقوع می پیوندد و کنترل این پدیده سطح بهینه ای از ترکیب سوخت و هوای مورد نیاز برای احتراق را حفظ می کند.

در سوخت نازل انژکتوری، کاویتاسیون معمولاً با تغییر ناگهانی در هندسه داخلی نازل، که موجب می شود فشار کمتر از فشار بخار شود، شکل می گیرد. انژکتورهای سوخت معمولاً کوچک اند و هدف اولیه آن ها تزریق سوخت به محفظه احتراق طی حالتی کنترل شده است. به دلیل انقباض سریع در ورودی نازل، لایه مرزی تمایل به جدایش دارد و جریان برگشتی در اثر کاهش فشار مشاهده می شود. وقتی فشار در این ناحیه از فشار اشباع سوخت کمتر شود، تغییر فاز روی داده را کاویتاسیون گویند. به دلیل جدایش در ورودی نازل، ناحیه فشردگی جریان<sup>۲</sup> شکل می گیرد. این کاهش مساحت برای جریان در دسترس روی می هد. کاهش مساحت منجر به افزایش سرعت در ورودی نازل می شود. افزایش سرعت درون سوخت انژکتور نازل برای گردافشانی پایین دست مفید است که موجب افزایش کیفیت ترکیب سوخت و هوای در دسترس در سیلندر اتومبیل می شود. کاویتاسیون در سوخت نازل انژکتوری، گردافشانی را از طریق شکست اولیه بهبود می بخشد و در نتیجه احتراق سوخت را نیز

1. Atomization  
2. Vena Contracta

بهبود می‌بخشد که موجب کم‌شدن آلاینده‌ها می‌شود. گردافشانی بهتر کاهش آلاینده‌های هیدروکربنی را ممکن می‌کند و کارایی موتور را بهبود می‌بخشد.

برگورک [۱] یکی از اولین مشاهدات در زمینه کاویتاسیون سوخت انژکتور دیزل را انجام داد. او جریان را در اوریفیس نازلی مشابه سایز واقعی انژکتور سوخت مطالعه کرد. ایشان جریان داخل اوریفیس نازل را با اثر عدد کاویتاسیون، تیزی لبه بالادست و نسبت طول به قطر مرتبط کرد و حضور کاویتاسیون داخل نازل را شرح داد. دهه‌ها بعد، بوئد و همکاران [۲] مطالعه دیگری در مورد جریان درون نازل شفاف با اندازه واقعی انجام دادند. اگرچه شرایط فشار در مطالعه ذکر شده کمتر از شرایط واقعی تزریق بود، آنان فیلم کاویتاسیونی را که در گوشه ورودی اوریفیس با افزایش اختلاف فشار پدیدار شد، مشاهده کردند. وینکهورف و همکاران [۳] یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های عملی را بر روی جریان کاویتاسیون در سوخت‌پاش‌ها انجام دادند و نمودار بسیار مهمی را بین ضریب تخلیه و عدد کاویتاسیون ترسیم کردند. ایشان به‌ازای اختلاف فشارهای مختلف شروع و توسعه پدیده کاویتاسیون را درون نازل مشاهده کردند. نتایج حاصل از این آزمایش پایه بسیاری از اعتبارسنجی نتایج عددی است.

کارهای عددی اولیه در ارتباط با شبیه‌سازی جریان کاویتاسیون درون نازل انژکتور به‌صورت اویلری-لاگرانژی بود. در این رویکرد، میدان جریان به‌صورت اویلری و دینامیک حباب به‌صورت لاگرانژی شبیه‌سازی می‌شد. گواسیس [۴] از مدل اویلری-لاگرانژی برای شبیه‌سازی کاویتاسیون استفاده کرد. اسکندر و همکاران [۵] از فرضیه رشد حباب برای بستن معادلات حاکم بر شبیه‌سازی کاویتاسیونی سوخت نازل انژکتور بهره گرفتند. سینگال [۶] ترکیبی از معادله رایلی پلاست<sup>۱</sup> و معادله پایه‌ای انتقال را به معادله‌ای ریاضی ساده‌سازی کرد. لی و ریتز [۷] از کد کیوا<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی جریان داخل انژکتور دیزل استفاده کردند. سالوادور و همکاران [۸] از نرم‌افزار اوپن‌فوم<sup>۳</sup> برای شبیه‌سازی جریان داخل نازل انژکتور، که داده‌های آزمایشگاهی برای آن وجود داشت، استفاده کردند. به‌ازای اختلاف فشارهای مختلف مقدار دبی جرمی به‌دست آمده از شبیه‌سازی ایشان مطابقت خیلی خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. سام و همکاران [۹] با استفاده از نرم‌افزار فلونت پارامترهای کاویتاسیون را درون نازل انژکتور به‌ازای اختلاف فشار و ارتفاع سوزن مختلف شبیه‌سازی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که پارامترهای کاویتاسیون خیلی وابسته به ارتفاع سوزن هستند. جیا و همکاران [۱۰] شکل مخروطی پاشش سوخت را با استفاده از فلونت شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که کاویتاسیون، علاوه بر سرعت جریان خروجی نازل، بر روی زاویه پاشش نیز تأثیر دارد. اچوچن و همکاران [۱۱] اثر زبری سطح نازل را بر روی پدیده کاویتاسیون با استفاده از نرم‌افزار فلونت بررسی کردند. ایشان نشان دادند که میزان کاویتاسیون بر روی سطح زبر در شرایط فشار پایین کاهش می‌یابد، ولی با افزایش میزان فشار تزریق، مقدار زبری موجب افزایش حفره کاویتاسیون می‌شود. هی و همکاران [۱۲] با استفاده از نرم‌افزار فلونت رابطه حرکت سوزن با عدد کاویتاسیون و عدد رینولدز را بررسی کردند. زو و همکاران [۱۳] تأثیر پارامترهای هندسی نازل انژکتور را بر روی جریان و پدیده کاویتاسیون به‌صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار فلونت بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که نسبت طول به قطر اوریفیس و شعاع انحای ورودی تأثیر قابل ملاحظه بر ضریب جریان و پدیده کاویتاسیون درون نازل دارد.

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت، جریان داخل نازل انژکتور شبیه‌سازی شده است. ابتدا شبیه‌سازی بر روی نازل وینکهورف، که نتایج آزمایشگاهی برای آن موجود است، انجام شده است. با انجام این شبیه‌سازی مدل آشفستگی و مدل کاویتاسیون مناسب انتخاب شده است. سپس یک نازل واقعی مدل‌سازی و تحلیل شده است. شبیه‌سازی برای ارتفاع مختلف سوزن انژکتور و شکل نشیمنگاه انجام شده تا علاوه بر تأثیر ارتفاع سوزن، نوع نشیمنگاه نیز در میزان کاویتاسیون درون نازل بررسی شود.

1. Rayleigh-Plesset  
2. Kiva 3v  
3. OpenFOAM

## معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی جریان درون نازل انژکتور، ابتدا مدل آن در نرم‌افزار گمبیت ساخته شده و شبکه‌بندی مناسب در میدان جریان ایجاد شده، سپس، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، تحلیل عددی صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه نتایج حاصل از تحلیل عددی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی وابستگی زیادی به نوع و تعداد شبکه ایجاد شده، نوع مدل آشفتگی، نوع مدل کاویتاسیون و شرایط مرزی دارد، لازم است روش عددی مناسبی جهت دستیابی به نتایج درست انتخاب شود. در ادامه، روش عددی انتخاب شده برای شبیه‌سازی کاویتاسیون آمده است.

در این تحقیق، معادلات حاکم برای جریان دوفازی برپایه رویکرد سیال منفرد (مخلوط همگن) است. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت حاکم بر میدان جریان همگن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \cdot \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} \quad (2)$$

$\vec{v}_m$  بردار میدان سرعت جریان همگن است و چگالی  $\rho_m$  و لزجت  $\mu_m$  مخلوط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v \quad (3)$$

$$\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v \quad (4)$$

$\alpha$  کسر حجمی هر یک از فازهاست. برای یک حجم کنترل مقادیر  $\alpha_l$  و  $\alpha_v$  می‌توانند، با توجه به فضای اشغال شده فاز مایع یا بخار، مقدار معینی داشته باشند. زیر نویس‌های  $l$  و  $v$  برای خواص مخلوط، بخار و مایع خالص اند. اگر شعاع حباب  $R_B$  در نظر گرفته شود، مقدار  $\alpha_v$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_v = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3} \quad (5)$$

که در آن  $n_b$  تعداد حباب‌ها در واحد حجم از مایع خالص تعریف می‌شود.

برای به دست آوردن انتقال جرم مایع به بخار از مدل ارائه شده توسط اسکندر و سویر [۵] استفاده شده است. این معادله برای کسر حجمی بخار شکل عمومی زیر را دارد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \cdot \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \cdot \rho_v \cdot V_v) = \frac{\rho_v \cdot \rho_l}{\rho} \cdot \frac{d\alpha_v}{dt} \quad (6)$$

در اینجا، جمله کلی چشمه جرم به شکل زیر است:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{d\alpha_v}{dt} \quad (7)$$

اسکندر و سویر از معادله زیر برای ارتباط بین تعداد کسر حجمی بخار حباب‌های واحد حجم مایع بهره گرفته‌اند:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3 \rho_l}} \quad (8)$$

شعاع حباب نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_B = \left( \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi n_b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

دو پارامتر بدون بعد مهم ضریب تخلیه و عدد کاویتاسیون برای توصیف پدیده کاویتاسیون درون نازل انژکتور تعریف می‌شود. ضریب تخلیه نسبت دبی جرمی واقعی به دبی جرمی ایدئالی که از معادله برنولی به دست می‌آید به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Cd = \frac{\dot{m}}{A \sqrt{2\rho_l(P_{in} - P_{back})}} \quad (10)$$

$\dot{m}$  دبی جرمی واقعی و  $A$  سطح مقطع نازل است. عدد کاویتاسیون به صورت زیر تعریف می شود:

$$K = \frac{P_{in} - P_v}{P_{in} - P_{back}} \quad (11)$$

$P_v$  فشار بخار اشباع است.

## اعتبارسنجی نتایج

برای بررسی دقت روش عددی از نتایج آزمایشگاهی وینکهور برای مقایسه استفاده شده است. وینکهور پدیده کاویتاسیون را درون یک نازل شیشه‌ای به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده است. هندسه استفاده شده در آزمایش وینکهور مطابق شکل ۱ است، که در این تحقیق برای شبیه‌سازی مدل شده است. شکل ۲ شبکه ایجاد شده در صفحه میانی میدان جریان را نشان می‌دهد. تنظیمات انجام شده از قبیل شرایط مرزی و خواص فیزیکی سوخت در جدول ۱ آورده شده است.

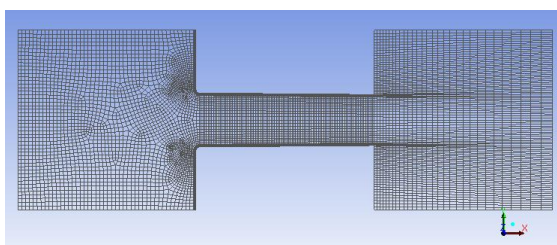


Figure 2- Mesh generated in nozzle flow field

شکل ۲- شبکه ایجاد شده در میدان جریان نازل

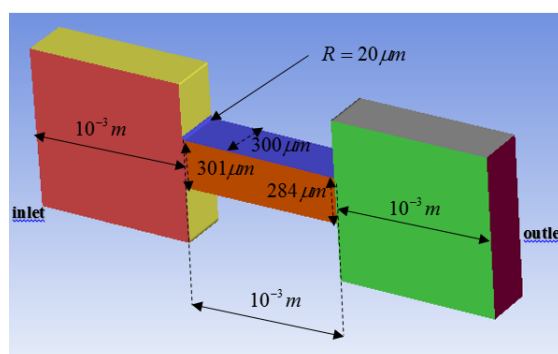


Figure 1- Winklhofer nozzle model

شکل ۱- مدل نازل وینکهور

شرط مرزی ورودی به صورت فشار ورودی در نظر گرفته شده که مقدار فشار سکون در این مرز همواره برابر ۱۰ Mpa است. مقدار فشار استاتیک در شرط مرزی خروجی متغیر است. با کاهش فشار استاتیک در مرز خروجی، سرعت جریان افزایش یافته و مقدار فشار استاتیکی در لبه ورودی نازل کاهش می‌یابد. شکل ۳ توزیع سرعت در صفحه میانی میدان جریان نازل را برای  $\Delta p = 6 \text{ Mpa}$  نشان می‌دهد. در قسمت ورودی نازل، به دلیل کاهش سطح مقطع، سرعت جریان افزایش یافته که این افزایش سرعت در لبه ورودی بیشتر از نقاط دیگر است که منجر به کاهش فشار استاتیکی می‌شود (شکل ۴). هرگاه کاهش فشار استاتیکی به مقدار بحرانی برسد، حفره کاویتاسیون تشکیل می‌شود و هرچه مقدار فشار خروجی کمتر شود، طول حفره نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۱- شرایط ورودی برای شبیه‌سازی عددی

Table 1- Detailed settings for numerical simulation

	Diesel (Main phase)	Diesel steam (Second phase)
Physical properties	Density (kg/m <sup>3</sup> )	840
	Viscosity (kg/m s)	0.0025
	Surface tension (N/m)	0.02
	Saturated vapour pressure (Pa)	870
Boundary condition	Boundary at inlet	Pressure inlet=10Mpa
	Boundary at outlet	Pressure outlet=1-6 Mpa
	Turbulence intensity	$0.16 \times Re^{-1/8}$
	Turbulence length scale	0.07D
Cavitation model	Cavitation model	Schnerr-Saue model
	Volumetric number density of bubbles (m <sup>-3</sup> )	$n_b = n_{ref} \times ((p_v - p)/p_v)^{3/2}$
	Critical pressure of cavitation (Pa)	$p_{cr} = p_v + 2\mu(1 + C_t\mu_t/\mu) \times S_{max}$

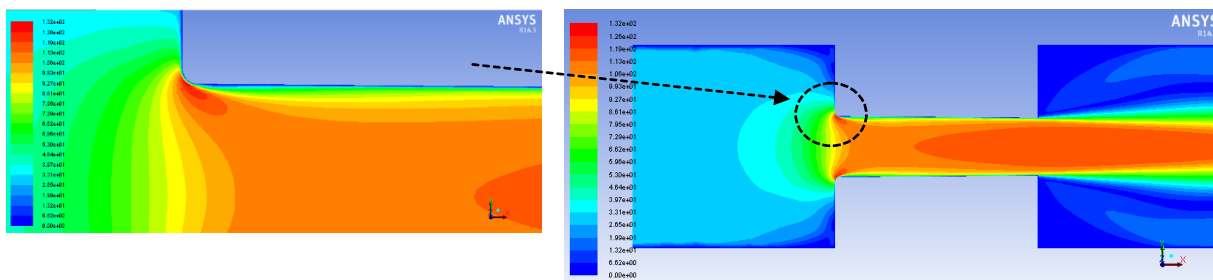


Figure 3- Velocity contour on symmetry plan at  $\Delta p = 6\text{Mpa}$   
 شکل ۳- توزیع سرعت در صفحه میانی میدان جریان برای  $\Delta p = 6\text{Mpa}$

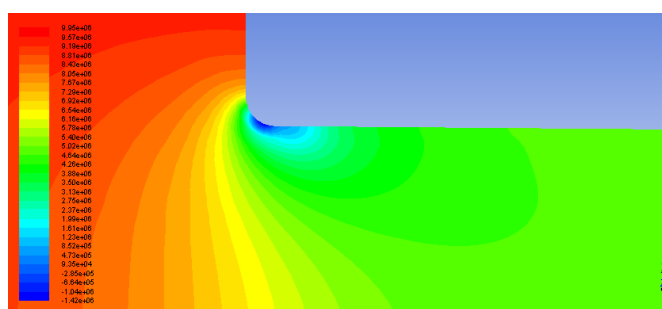


Figure 4- Prussre contour on symmetry plan at  $\Delta p = 6\text{Mpa}$   
 شکل ۴- توزیع فشار استاتیکی در صفحه میانی میدان جریان برای  $\Delta p = 6\text{Mpa}$

با ایجاد شبکه مناسب، میدان جریان با دو مدل آشفتگی  $k - \omega$  و  $k - \varepsilon$  تحلیل شد. 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  $k - \varepsilon$  حدود ۱۸۵۰۰۰ است، در حالی که برای مدل  $k - \omega$  به مقدار ۲۵۰۰۰۰ افزایش یافته است. شایان ذکر است که برای انتخاب این تعداد سلول، استقلال از شبکه نیز بررسی شده است. شکل ۵ تغییرات سرعت را برای این دو مدل آشفتگی، و نتایج آزمایشگاهی را در مقطعی از نازل، که به فاصله  $53\mu\text{m}$  از لبه ورودی است، برای دو حالتی که کاویتاسیون وجود دارد و کاویتاسیون وجود ندارد، نشان می‌دهد. نمودارها مشابه یکدیگرند، به طوری که بر روی دیواره نازل مقدار سرعت صفر بوده و بلافاصله سرعت جریان نزدیک دیواره به مقدار بیشینه می‌رسد و سپس، در مرکز نازل، مقدار سرعت کمی کاهش می‌یابد. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که توزیع سرعت مربوط به مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است.

شکل ۶ به‌ازای اختلاف فشارهای مختلف دوطرف نازل، مقدار دبی جرمی سوخت را برای دو مدل 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 کاویتاسیون به حالت سوپرکاویتاسیون تبدیل شده و کل فضای داخل نازل را پوشش داده و جریان خفه<sup>۱</sup> شده است. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد بین نتایج عددی و آزمایشگاهی اختلاف کمی وجود دارد و نتایج مدل  $k - \varepsilon$  به آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. با توجه به اینکه در مدل  $k - \varepsilon$  از توابع دیواره کنار دیوارهای نازل استفاده می‌شود و نسبت به مدل  $k - \omega$  نیاز به تعداد سلول کمتری است، بنابراین، در این تحقیق برای شبیه‌سازی عددی جریان داخل نازل از مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  استفاده شده است. برای دو اختلاف فشار  $\Delta p = 6\text{Mpa}$  و  $\Delta p = 7\text{Mpa}$  توزیع کسر بخار در صفحه میانی نازل، در شکل ۷، آورده شده است. مطابقت خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی در این شکل مشاهده می‌شود. با افزایش اختلاف فشار حجم حفره کاویتاسیون درون نازل افزایش می‌یابد.

1. Choked

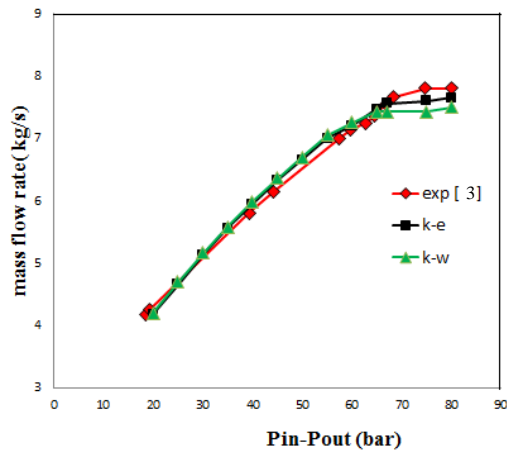


Figure 6- comparison of mass flow rate with experimental data  
 شکل ۶- مقایسه دبی جرمی با داده‌های تجربی

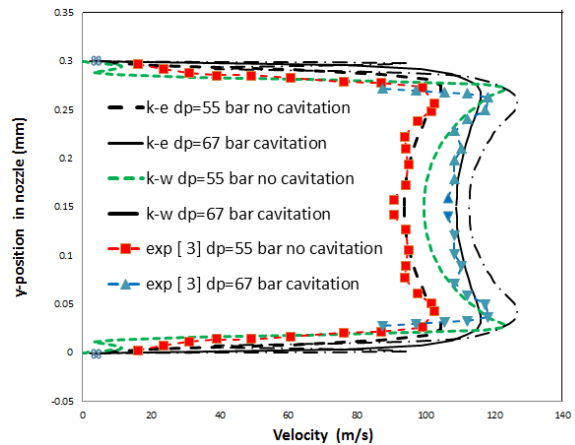


Figure 5- predicted and measured velocity profiles at a location 53 μm from the nozzle inlet  
 شکل ۵ - توزیع سرعت در مقطع عرضی به فاصله ۵۳ μm از لبه ورودی نازل

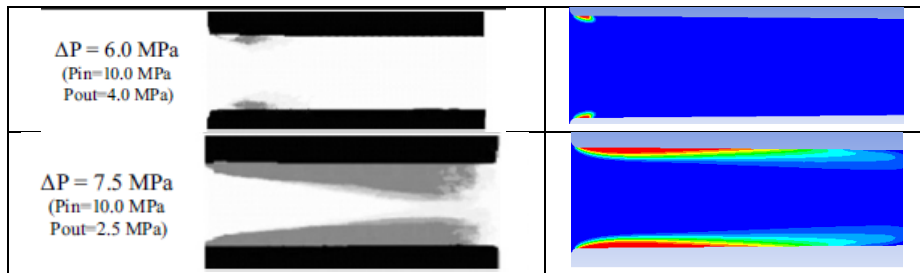


Figure 6- Vapor volume fraction contour on symmetry plan for different pressure difference  
 شکل ۷- توزیع کسر بخار در صفحه میانی نازل برای اختلاف فشار مختلف

## هندسه و ابعاد نازل انژکتور

یک نازل چهارسوراخه، که ابعاد و اندازه آن موجود بود، برای شبیه‌سازی انتخاب شد. شکل ۸ هندسه و ابعاد نازل را در صفحه میانی نشان می‌دهد. قطر اوریفیس برابر ۰/۳۲ mm و طول آن ۱/۳ mm است. انژکتور از یک سوزن تشکیل شده است که با حرکت آن به طرف بالا و پایین مقدار دبی جریان کنترل می‌شود. فاصله بین سطح سوزن و سطح نشیمنگاه با  $h$  مشخص شده است. این نازل انژکتور، که در این مقاله به‌عنوان استاندارد نامیده شده، دارای یک حجم کیسه‌ای در انتهاست که سوراخ اوریفیس انژکتور در آنجا قرار دارد. با بالا آمدن سوزن، جریان وارد این حجم کیسه‌ای شده و از آنجا وارد اوریفیس می‌شود. با پایین آمدن سوزن، مقدار  $h$  کاهش یافته و دبی جریان نیز کاهش می‌یابد. در این نوع نازل، با تماس سطح سوزن با سطح شیب‌دار نشیمنگاه جریان ورودی حجم کیسه‌ای شکل قطع شده و هیچ تماسی بین سوزن و ورودی اوریفیس اتفاق نمی‌افتد. با توجه به ابعاد نازل انژکتور، مدلسازی یک‌چهارم آن انجام شده و شرایط مرزی همانند شکل ۹ تعریف شده است. برای اعمال بهتر شرط مرزی در قسمت خروجی نازل، حجم استوانه‌ای شکل ایجاد شده و شرط مرزی فشار خروجی برای این قسمت اعمال شده است. شبکه‌بندی باسازمان در میدان جریان استفاده شده است. شکل ۱۰ کیفیت شبکه ایجاد شده در اطراف ورودی و اطراف اوریفیس را نشان می‌دهد. با معیار قراردادن ضریب جریان، استقلال از شبکه بررسی شد. تعداد شبکه مناسب جهت تحلیل ۲۴۵۶۰۰ انتخاب شده است.

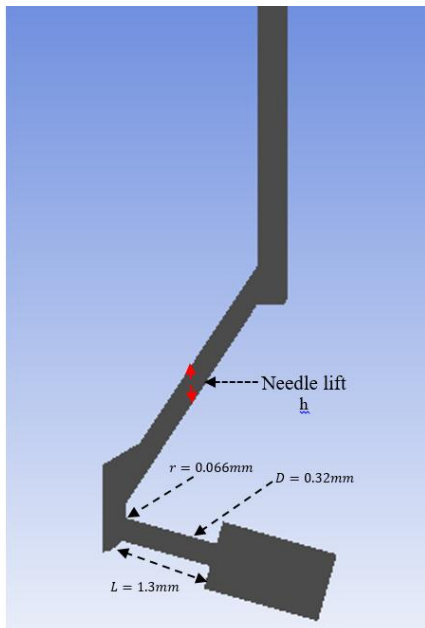


Figure 8- Standard nozzle model  
شکل ۸- هندسه و ابعاد نازل استاندارد

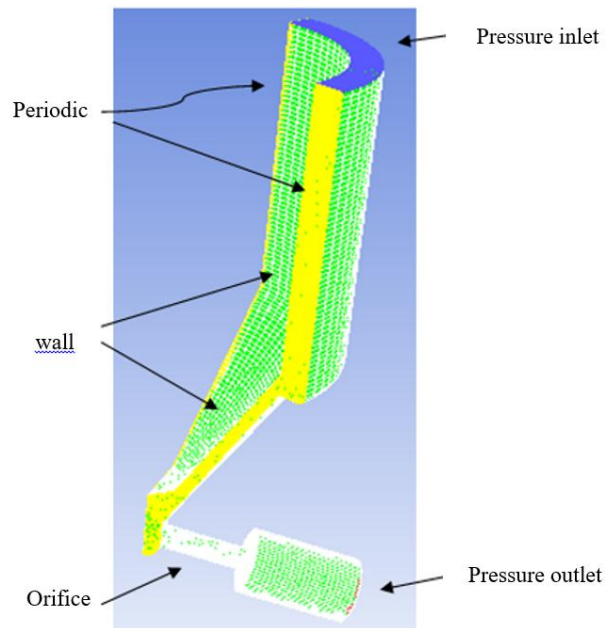


Figure 9- Boundary condition  
شکل ۹- تعریف شرایط مرزی

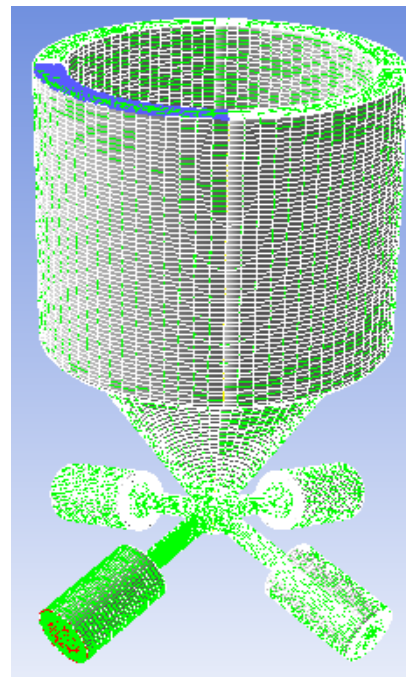
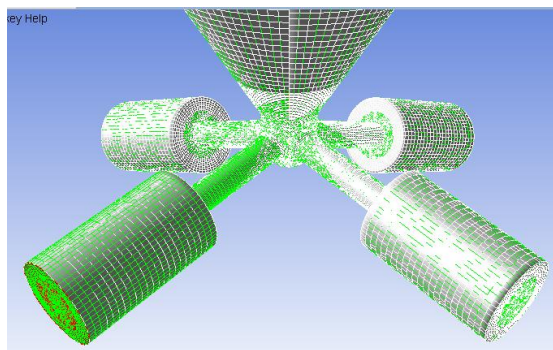


Figure 10- Mesh generated in the flow field  
شکل ۱۰- شبکه ایجادشده بر میدان جریان

## بررسی نتایج

شرایط تحلیل نازل انژکتور همانند نازل وینکهورف است (جدول ۱). در کلیه تحلیل‌ها مقدار فشار خروجی برابر ۱۰۰ kpa است. با تغییر فشار ورودی (عدد کاویتاسیون) و ارتفاع سوزن، تحلیل‌های مختلف صورت گرفته است. مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  استاندارد

با توابع دیواره و الگوریتم حل سیمپل انتخاب شده است. در مدل کاویتاسیون اسکندر که در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان انتخاب شده، تعداد حباب در واحد حجم مایع،  $n_b$ ، یک پارامتر تأثیرگذار در شبیه‌سازی جریان است. این پارامتر معمولاً با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی به دست می‌آید. با بررسی مراجع مختلف برای نازل انتخاب شده مقدار  $n_b$  برای سیال آب موجود بود. بنابراین، سیال انتخاب شده برای شبیه‌سازی در این تحقیق آب است که خواص آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی آب

Table 2- Physical properties of water

properties	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	998
Viscosity (kg/m s)	0.001
Saturated vapour pressure (Pa)	2360
Temperature (K)	293
Volumetric number density of bubbles (m <sup>-3</sup> )	$1.9 \times 10^{11}$

با ثابت قراردادن مقدار فشار خروجی نازل، متناسب با عدد کاویتاسیون مقدار فشار ورودی در شرط مرزی ورودی اعمال می‌شود. ارتفاع سوزن انژکتور از مقدار بیشینه  $h=0.54\text{mm}$  تا مقدار کمینه  $h=0.04\text{mm}$  تغییر می‌کند. به ازای هر مقدار ارتفاع مشخص، با تغییر فشار ورودی شبیه‌سازی جریان صورت گرفته است. شکل ۱۱ توزیع سرعت جریان در صفحه میانی نازل را برای حالت  $h=0.1\text{mm}$ ,  $k^{1/2}=1.094$  نشان می‌دهد. هنگام ورود جریان به درون اوریفیس، به دلیل کاهش سطح مقطع، سرعت جریان افزایش یافته و افت فشار استاتیکی در جریان ایجاد می‌شود. بنابراین، در سیال تغییر فاز رخ داده و حفره کاویتاسیون به وجود می‌آید. باتوجه به اینکه سیال در قسمت پایین حجم کیسه‌ای شکل گیرافتاده و به صورت مانع در برابر جریان عمل می‌کند، میزان سرعت جریان ورودی در قسمت بالایی اوریفیس بیشتر بوده و افت فشار استاتیکی و احتمال تشکیل حفره کاویتاسیون در این ناحیه نیز بیشتر است. توزیع کسر حجمی بخار به ازای اعداد کاویتاسیون مختلف در شکل ۱۲ آمده است. برای حفره کاویتاسیون در ورودی و قسمت بالایی اوریفیس تشکیل شده (شکل ۱۲-الف)، با کاهش عدد کاویتاسیون (افزایش فشار ورودی) طول حفره افزایش یافته و برابر طول اوریفیس می‌شود (شکل ۱۲-پ). کاهش بیشتر عدد کاویتاسیون باعث خروج حفره کاویتاسیون از نازل می‌شود (شکل ۱۲-ت). شکل‌های ۱۲-ج و ح نشان می‌دهند که کاهش بیشتر عدد کاویتاسیون از مقدار  $k^{1/2}=1.0318$  تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر طول آن ندارد.

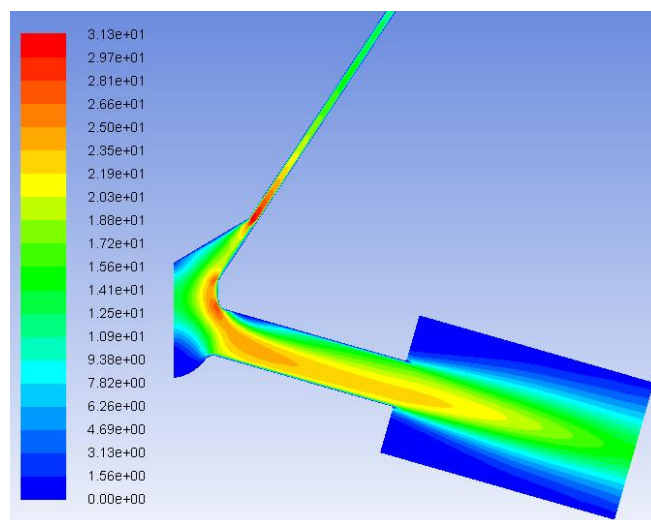


Figure 11- Velocity contour in symmetry plan at  $h=0.1\text{mm}$ ,  $k^{1/2}=1.094$

شکل ۱۱- توزیع سرعت در صفحه میانی نازل برای حالت  $h=0.1\text{mm}$ ,  $k^{1/2}=1.094$



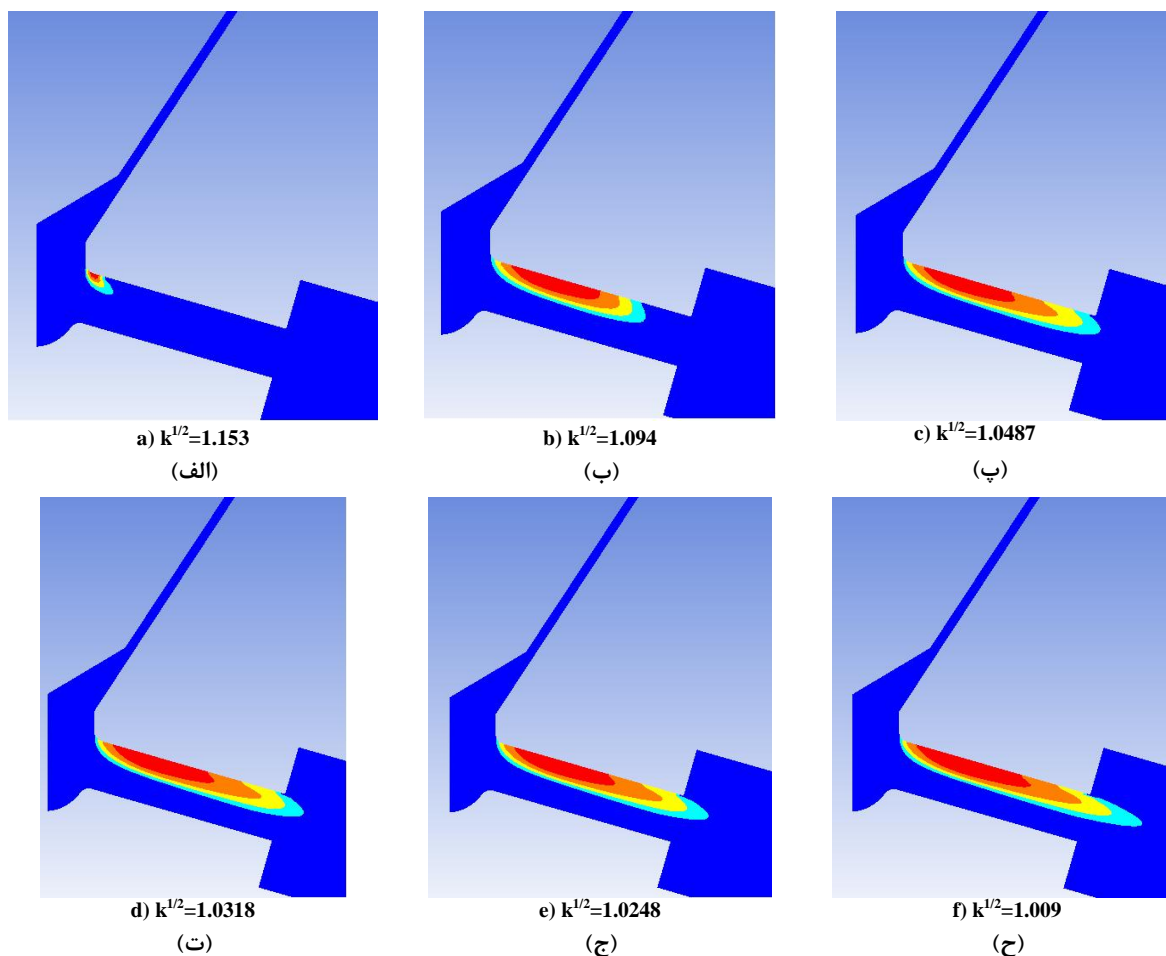


Figure 12- Vapor volume fraction contour at  $h=0.1\text{mm}$  for different cavitation numbers  
 شکل ۱۲- توزیع کسر حجمی بخار برای حالت  $h=0.1\text{mm}$  و به‌ازای عدد کاویتاسیون مختلف

برای بررسی تأثیر ارتفاع سوزن بر رفتار جریان درون نازل انژکتور، مطابق شکل ۱۳، شبیه‌سازی نازل برای سه ارتفاع مختلف صورت گرفته است. کاهش ارتفاع سوزن، علاوه بر طول حفره کاویتاسیون، بر محل تشکیل آن نیز تأثیر گذاشته است. زمانی که ارتفاع سوزن زیاد است دبی جریان زیاد بوده، بنابراین، افزایش سرعت جریان موجب تشکیل حفره کاویتاسیون با طول بزرگ می‌شود (شکل ۱۳-الف). با کاهش ارتفاع سوزن، طول حفره کاویتاسیون نیز کاهش می‌یابد. زمانی که ارتفاع سوزن نزدیک مقدار کمینه خود برسد، دبی جریان به‌اندازه کافی کم شده و حفره کاویتاسیون، به‌جای تشکیل شدن در محل ورودی اوریفیس، در نزدیکی سوزن تشکیل می‌شود (شکل ۱۳-پ). در این حالت، احتمال فرسایش سوزن ناشی از فروریزش حباب‌های کاویتاسیون زیاد است.

شکل ۱۴ تغییرات ضریب جریان را برحسب مجذور عدد کاویتاسیون به‌ازای ارتفاع مختلف سوزن نشان می‌دهد. در اکثر نمودارها برای اعداد کاویتاسیون خیلی بالا و خیلی پایین، ضریب جریان مستقل از عدد کاویتاسیون است. در عدد کاویتاسیون بالا حفره کاویتاسیون وجود ندارد و ضریب جریان تنها تابع عدد رینولدز است. برای عدد کاویتاسیون خیلی پایین، طول حفره کاویتاسیون به‌اندازه کافی بزرگ است که کل طول اوریفیس را دربر گرفته و کاهش بیشتر عدد کاویتاسیون تأثیری بر ضریب جریان ندارد. با کاهش عدد کاویتاسیون (افزایش فشار ورودی)، مقدار ضریب جریان به‌دلیل افزایش طول و ضخامت حفره کاویتاسیون کاهش می‌یابد. در یک عدد کاویتاسیون معین، کاهش ارتفاع سوزن موجب کاهش ضریب جریان می‌شود. هرچه ارتفاع سوزن کمتر شود تأثیر آن بر روی ضریب جریان بیشتر نمایان می‌شود. در ارتفاع نزدیک به مقدار کمینه، باتوجه به اینکه

حفره کاویتاسیون در اوریفیس تشکیل نمی‌شود، تغییر ضریب جریان با عدد کاویتاسیون نسبت به ارتفاع‌های دیگر از شیب کمتری برخوردار است.

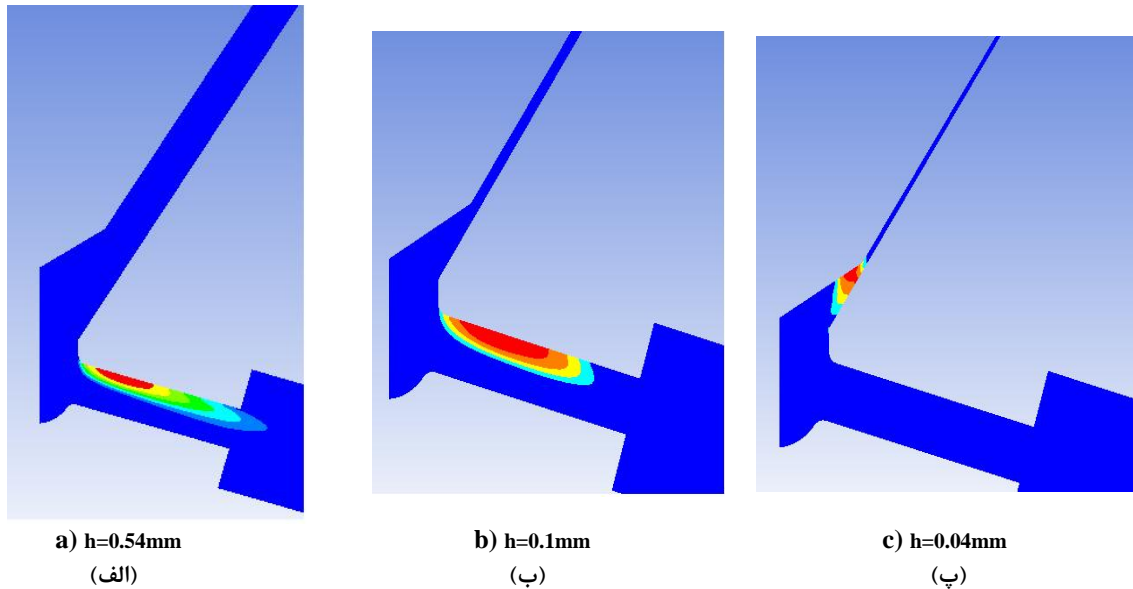


Figure 13- Vapor volume fraction contour at  $k^{1/2}=1.094$  for different needle lift  
 شکل ۱۳- توزیع کسر حجمی بخار  $k^{1/2}=1.094$  به ازای ارتفاع سوزن مختلف

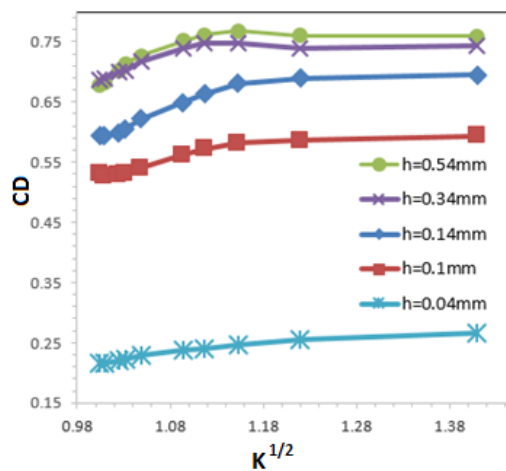


Figure 14- Variation of flow coefficient with cavitation number for different needle lift  
 شکل ۱۴- تغییرات ضریب جریان بر حسب عدد کاویتاسیون به ازای ارتفاع مختلف سوزن برای نازل استاندارد

پس از بررسی تأثیر ارتفاع سوزن بر پدیده کاویتاسیون درون نازل، حال، اثر شکل نشیمنگاه بر این پدیده بررسی می‌شود. شکل ۱۵ هندسه سه نازل انژکتور با اوریفیس یکسان ولی با شکل نشیمنگاه متفاوت را در صفحه میانی نشان می‌دهد. شکل ۱۵-الف نازلی است که در قسمت قبلی بررسی شد. این نازل، نازل استاندارد نامیده شده است. در این نازل اوریفیس به حجم کیسه‌ای متصل است و سوزن انژکتور مستقیم با دهانه اوریفیس در تماس نیست، بلکه، هنگام پایین آمدن سوزن، سطح آن با سطح نشیمنگاه تماس گرفته و جریان ورودی حجم کیسه‌ای شکل را قطع می‌کند. نوع VCO نازل در شکل ۱۵-ب آورده شده است.

#### 1. Valve-Covered-Orifice (VCO)

در این نوع نشیمنگاه هنگام قطع سوخت، سطح سوزن مستقیم بر سطح ورودی اوریفیس نشسته و جریان سوخت قطع می‌شود. شکل ۱۵-پ نازل استاندارد بهینه‌شده را نشان می‌دهد. در این نوع نازل، حجم کیسه‌ای شکل وجود نداشته و شکل نازل همانند VCO است. با توجه به اینکه این نازل عملکرد بهتری نسبت به VCO دارد، بنابراین، در این مقاله نازل بهینه‌شده شناخته می‌شود. در این نازل، همانند حالت استاندارد، سوزن مستقیم ورودی اوریفیس را نمی‌بندد، بلکه سطح سوزن با سطح شیب‌دار نشیمنگاه تماس پیدا کرده و جریان ورودی به اوریفیس قطع می‌شود. هندسه سه‌بعدی این سه نازل در شکل ۱۶ آمده است.

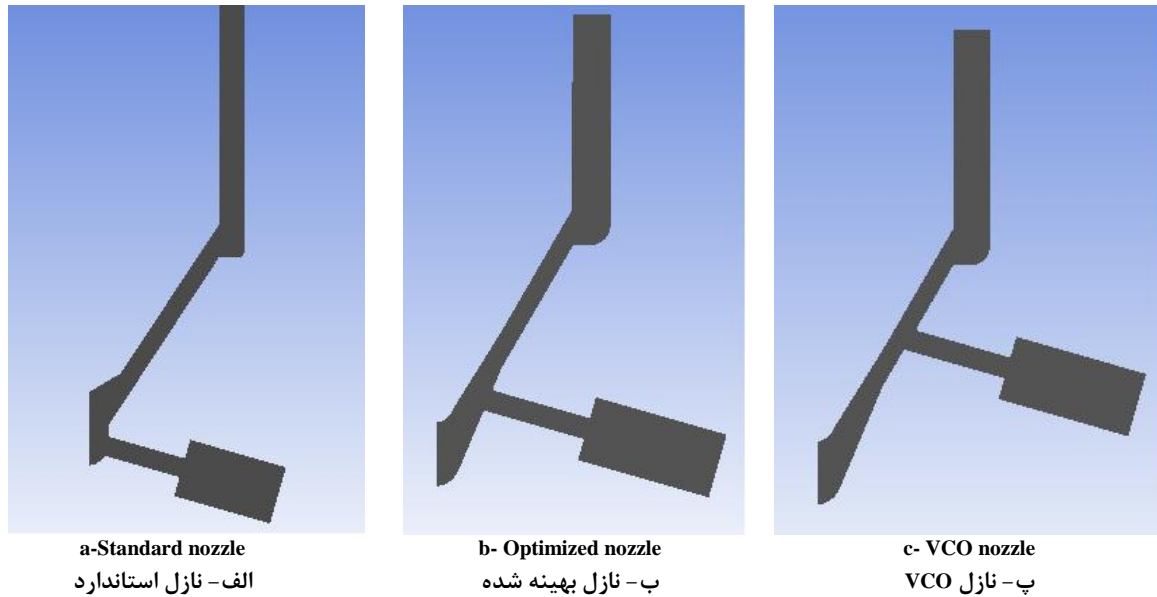


Figure 15- Nozzle geometry with different seat on symmetry plan  
شکل ۱۵- هندسه نازل با شکل نشیمنگاه متفاوت در صفحه میانی

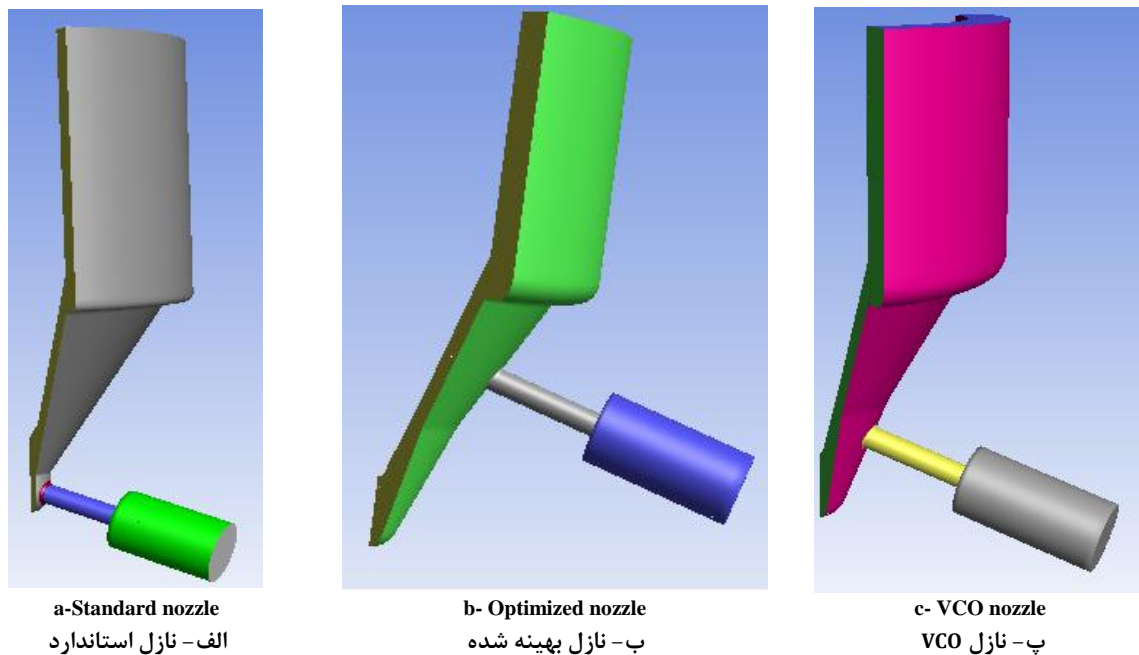


Figure 16- Quarter nozzle geometry with different seat  
شکل ۱۶- هندسه یک‌چهارم نازل با شکل نشیمنگاه متفاوت

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ تغییرات ضریب جریان برحسب عدد کاویتاسیون را به ترتیب برای نازل بهینه و VCO برای سه ارتفاع مختلف سوزن نشان می‌دهد. روند تغییر نمودارها مشابه نازل استاندارد است. با کاهش ارتفاع سوزن مقدار ضریب جریان کاهش یافته و برای ارتفاع‌های کمتر کاهش مقدار ضریب جریان با شدت بیشتری صورت می‌گیرد. در یک ارتفاع سوزن مشخص، با کاهش عدد کاویتاسیون با تشکیل حفره کاویتاسیون، ضریب جریان کاهش می‌یابد. در یک مقایسه کلی، این نتیجه حاصل می‌شود که روند تغییرات ضریب جریان برحسب عدد کاویتاسیون برای هر سه شکل نشیمنگاه تقریباً مشابه است.

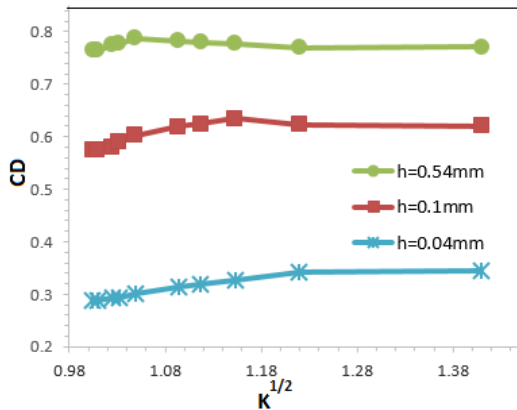


Figure 18- Variation of VCO nozzle flow coefficient with cavitation number

شکل ۱۸- تغییرات ضریب جریان نازل VCO با عدد کاویتاسیون

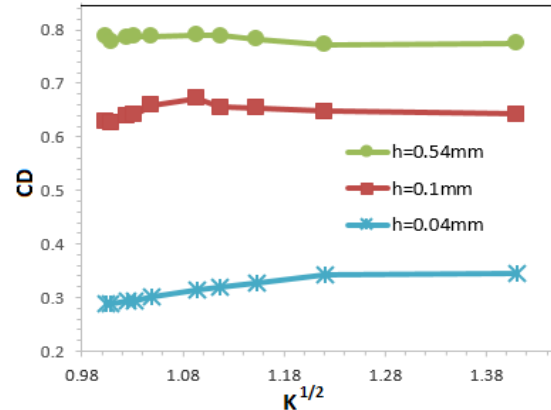


Figure 17- Variation of Optimized nozzle flow coefficient with cavitation number

شکل ۱۷- تغییرات ضریب جریان نازل بهینه با عدد کاویتاسیون

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر شکل نشیمنگاه بر ضریب جریان، به‌ازای ارتفاع سوزن انژکتور مشخص، نمودار ضریب جریان برحسب عدد کاویتاسیون در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ آورده شده است. در هر شکل کمترین مقدار ضریب جریان در عدد کاویتاسیون معین مربوط به نازل استاندارد است و بیشترین مقدار مربوط به نازل بهینه است. با کاهش ارتفاع سوزن اختلاف بین ضریب جریان بیشتر می‌شود؛ مثلاً برای  $K^{1/2} = 1.41$  اختلاف بیشینه بین ضریب جریان برای ارتفاع  $h=0.54\text{mm}$  برابر ۲ درصد است. با کاهش ارتفاع سوزن به مقدار  $h=0.1\text{mm}$  مقدار اختلاف بیشینه ۸ درصد افزایش یافته و در نهایت برای  $h=0.04\text{mm}$  اختلاف ضریب جریان به ۳۲ درصد می‌رسد.

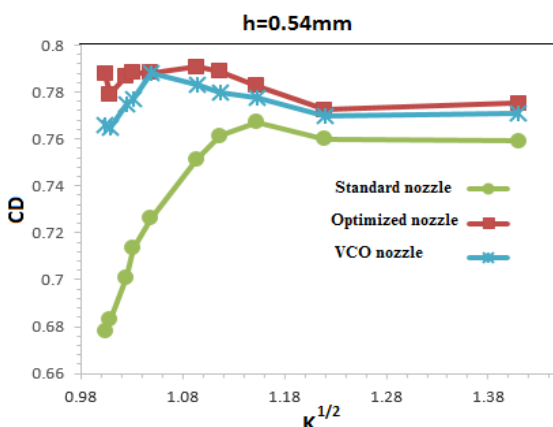


Figure 19- Variation of different nozzles flow coefficient with cavitation number at  $h=0.54\text{mm}$

شکل ۱۹ - تغییرات ضریب جریان نازل‌های مختلف با عدد کاویتاسیون برای  $h=0.54\text{mm}$

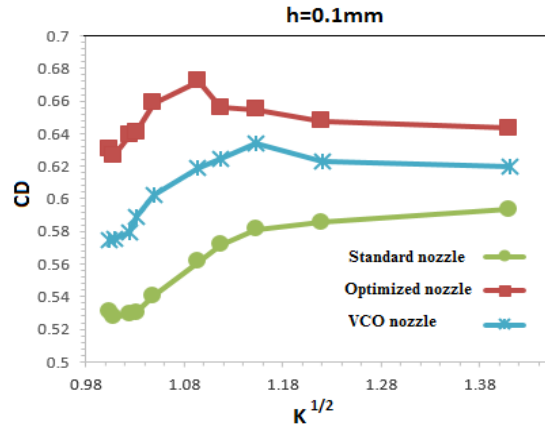


Figure 20- Variation of different nozzles flow coefficient with cavitation number at  $h=0.1\text{mm}$

شکل ۲۰- تغییرات ضریب جریان نازل‌های مختلف با عدد کاویتاسیون برای  $h=0.1\text{mm}$

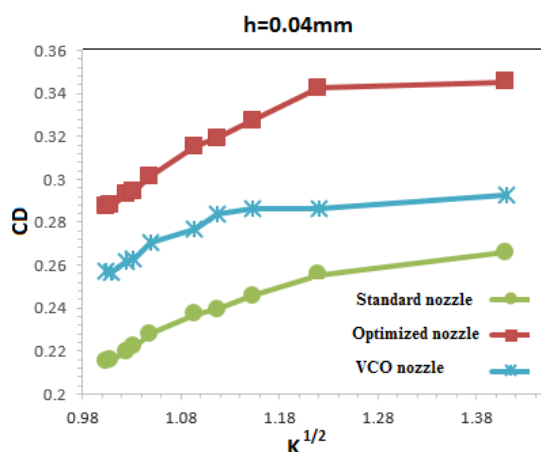


Figure 21- Variation of different nozzles flow coefficient with cavitation number at  $h=0.04mm$   
 شکل ۲۱- تغییرات ضریب جریان نازل‌های مختلف با عدد کاویتاسیون برای  $h=0.04mm$

توزیع سرعت در صفحه میانی نازل انژکتور در شرایط  $h=0.1mm$ ,  $k^{1/2}=1.0487$  برای هر سه نشیمنگاه در شکل ۲۲ آمده است.

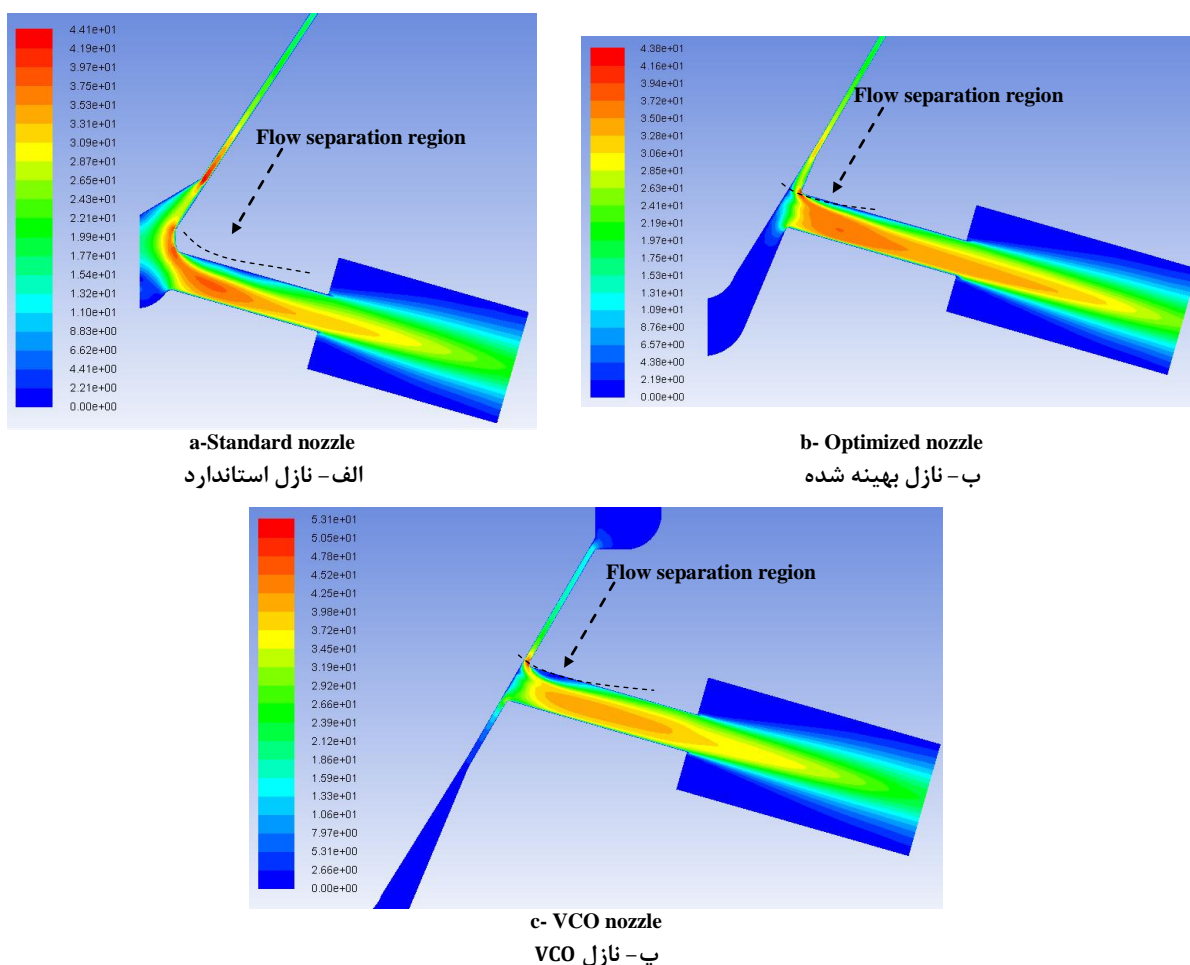


Figure 22- Velocity contour on nozzle symmetry plan for  $h=0.1mm$ ,  $k^{1/2}=1.0487$   
 شکل ۲۲- توزیع سرعت در صفحه میانی نازل انژکتور برای شرایط  $h=0.1mm$ ,  $k^{1/2}=1.0487$

برای نازل استاندارد، سرعت بیشینه حدود  $44\text{m/s}$  و خارج از اوریفیس در نزدیکی سوزن اتفاق می‌افتد. بنابراین، سوخت با سرعت زیاد وارد مخزن کیسه‌ای می‌شود. مطابق شکل ۲۲-الف، سرعت بالای سوخت ورودی به حجم کیسه‌ای موجب شده که ناحیه جدایش جریان در قسمت بالایی اوریفیس حجم نسبتاً زیادی از اوریفیس را اشغال کرده و سوخت از فضای کمتری عبور کند. در نازل بهینه‌شده، مطابق شکل ۲۲-ب، مقدار بیشینه سرعت در قسمت ورودی اوریفیس اتفاق می‌افتد. ناحیه جدایش جریان حجم کمتری از اوریفیس را اشغال کرده است. سرعت بیشینه در نازل VCO حدود  $53\text{m/s}$  است که در مجاورت سوزن و نشیمنگاه اتفاق می‌افتد (شکل ۲۲-پ). سرعت بالای جریان سوخت ورودی به اوریفیس موجب شده که ناحیه جدایش جریان در این نازل نیز منطقه بزرگی از اوریفیس را اشغال کند.

شکل ۲۳ توزیع کسر حجمی بخار را برای شرایط  $h=0.1\text{mm}$ ,  $k^{1/2}=1.0487$  مربوط به سه نازلی که در شکل ۲۲ توزیع سرعت آنها ارائه شده بود نشان می‌دهد. حجم فاز بخار موجود متناسب است با اندازه منطقه جدایش جریان که در قسمت قبل توضیح داده شد. حجم حفره کاویتاسیون مربوط به نازل استاندارد بیشتر از دو نازل دیگر است و برای نازل بهینه کمتر از بقیه است. بزرگ بودن حجم حفره کاویتاسیون، مقدار کوچک ضریب جریان را نتیجه می‌دهد که این موضوع در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ توضیح داده شد.

در بررسی‌هایی که بر روی سه نشیمنگاه مختلف صورت گرفت، معین شد که در شرایط یکسان حجم حفره کاویتاسیون در نشیمنگاه استاندارد بزرگ‌تر از بقیه است. بنابراین، ضریب تخلیه جریان مربوط به این نشیمنگاه نسبت به حالت‌های دیگر کمتر است. علاوه بر ضریب جریان، نکته مهم دیگری که در ارتباط با طراحی نازل انژکتور مورد توجه قرار می‌گیرد کیفیت جریان خروجی از اوریفیس انژکتور است. هرچه شدت آشفته‌گی جریان سوخت خروجی از نازل انژکتور بیشتر باشد، ترکیب سوخت و هوا در محفظه احتراق بهتر صورت گرفته و فرایند احتراق با کیفیت بیشتری انجام می‌شود.

شکل ۲۴ توزیع شدت آشفته‌گی جریان در صفحه خروجی اوریفیس را نشان می‌دهد. با مقایسه این شکل‌ها، چنین نتیجه می‌شود که در سطح خروجی اوریفیس مربوط به نشیمنگاه استاندارد شدت آشفته‌گی جریان بیشتر از دو حالت دیگر است و منطقه‌ای که بیشینه شدت آشفته‌گی را دارد در نزدیکی محور اوریفیس است. بنابراین، هرچند که ضریب جریان مربوط به نازل با نشیمنگاه استاندارد نسبت به دو حالت دیگر کمتر است، ولی کیفیت جریان خروجی از آن برای فرایند احتراق بهتر است.

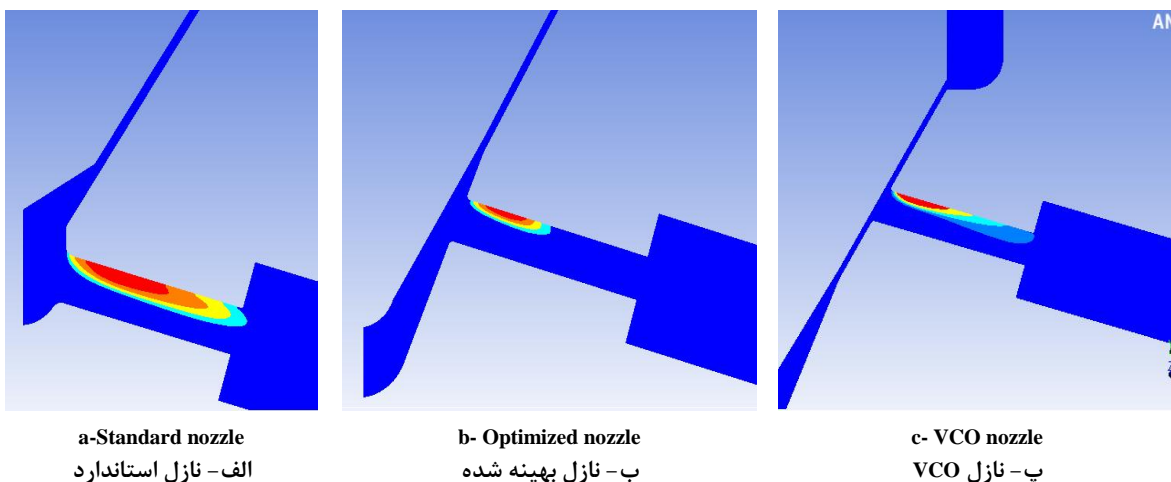


Figure 23- Vapor volume fraction contour on nozzle symmetry plan for  $h=0.1\text{mm}$ ,  $k^{1/2}=1.0487$

شکل ۲۳- توزیع کسر بخار در صفحه میانی نازل انژکتور برای شرایط  $h=0.1\text{mm}$ ,  $k^{1/2}=1.0487$

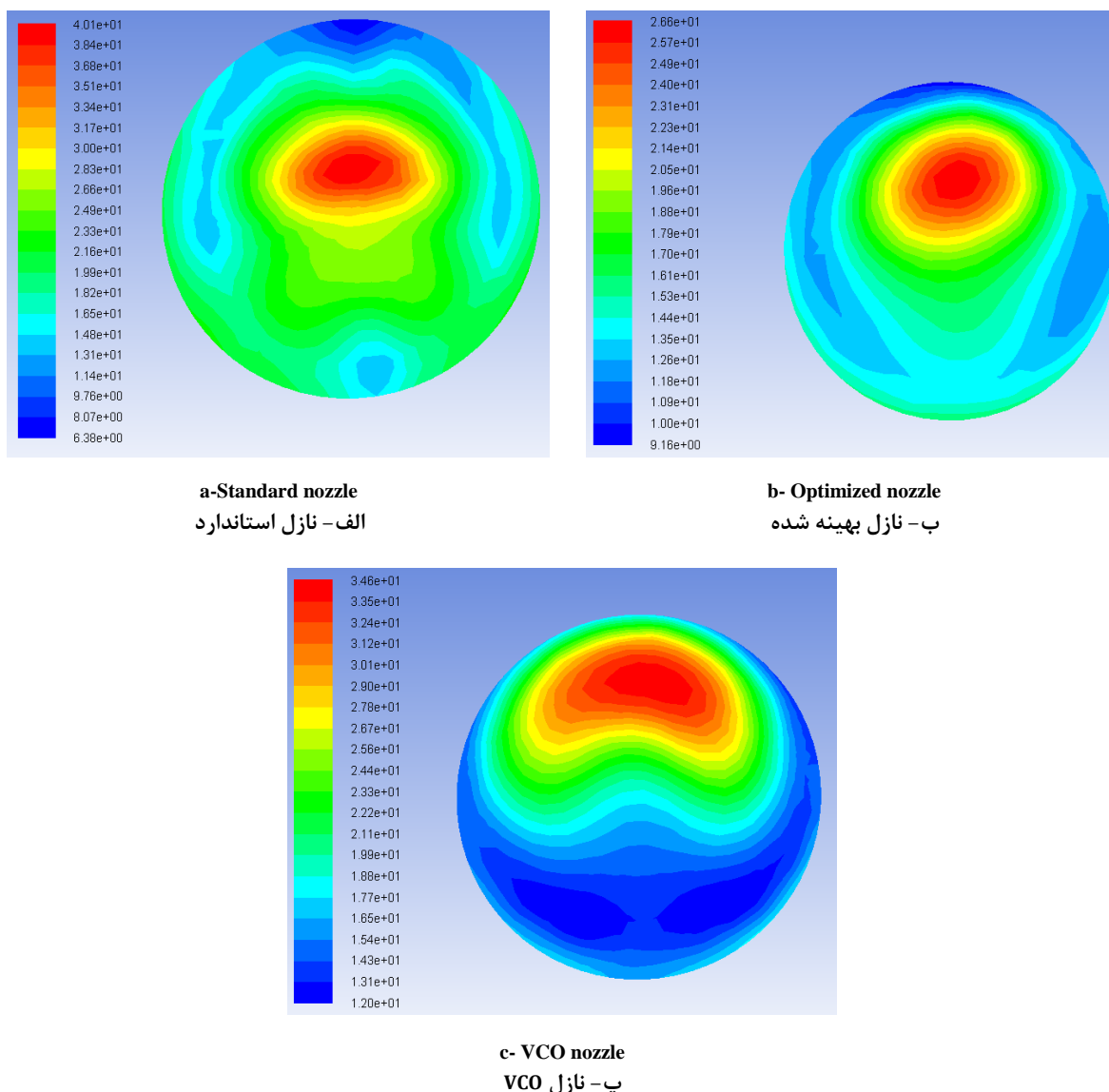


Figure 24- Turbulence Intensity contour on nozzle outlet plan for  $h=0.1\text{mm}$ ,  $k^{1/2}=1.0487$   
 شکل ۲۴- توزیع شدت آشفتگی در صفحه خروجی نازل انژکتور برای شرایط  $h=0.1\text{mm}$ ,  $k^{1/2}=1.0487$

### نتیجه گیری

جریان سیال داخل نازل انژکتور موتور دیزل با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی شد. جریان دوفاز به صورت مخلوط همگن در نظر گرفته شد و مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  و مدل کاویتاسیون اسکندر-سویر برای شبیه سازی عددی استفاده شد. مقدار ضریب تخلیه به ازای اعداد کاویتاسیون مختلف برای چندین ارتفاع سوزن انژکتور و سه نوع نشیمنگاه بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد ضریب تخلیه برای عدد کاویتاسیون خیلی بالا و خیلی پایین مستقل از عدد کاویتاسیون بوده و تقریباً ثابت است. با نزدیک شدن ارتفاع سوزن به مقدار کمینه خود، حفره کاویتاسیون در مجاورت سوزن تشکیل شده که احتمال فرسایش سوزن را افزایش می دهد. مقدار ضریب تخلیه برای نازل با نشیمنگاه استاندارد نسبت به دو حالت دیگر کمتر بوده، ولی شدت اغتشاش جریان در اوریفیس این نازل نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است که در نتیجه کیفیت پاشش سوخت در این نوع نازل افزایش می یابد.

## منابع

1. W. Bergwerk, "Flow Pattern in Diesel Nozzle Spray Holes," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 173, 1959, pp. 655-660.
2. J. Bode, H. Chaves, F. Obermeier and T. Schneider, "Influence of Cavitation in Turbulent Nozzle Flow on Atomization and Spray Formation of a Liquid Jet," *Proc. Con. Sprays and Aerosols*, Guildford, Surrey Gu2 5XH U.K, 1991, pp. 107-112.
3. E. Winkhofer, 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, 2001, pp. 574-9.
4. M. Gavaises, E. Giannadakis and C. Arcoumanis, "Modelling of Cavitation in Diesel Injector Nozzles," *Journal of Fluid Mechanics*, 616, 2008, pp. 153- 193.
5. G. H. Schnerr, J. Sauer and W. Yuan, "Modeling and Computation of Unsteady Cavitation Flows in Injection Nozzles," *Mécanique & Industries*, 2, 2001, pp. 383-394.
6. A. K. Singhal, M. M. Athavale, H. Li and Y. Jiang, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," *Journal of Fluids Engineering*, 124, 2002, pp. 617-624.
7. W. G. Lee and R. D. Reitz, "A Numerical Investigation of Transient Flow and Cavitation within Minisac and Valve-Covered Orifice Diesel Injector Nozzles," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 132, 2010, pp. 1-8.
8. F. J. Salvador, J. V. Romero and M. D. Rosello, "Validation of a Code for Modeling Cavitation Phenomena in Diesel Injector Nozzles," *Math Comput Mode*, 52, 2010, pp. 1123-32.
9. S. Som, A. I. Ramirez and D. E. Longman, "Effect of Nozzle Orifice Geometry on Spray, Combustion, and Emission Characteristics under Diesel Engine Conditions," *Fuel*, 90, 2011, pp. 1267-76.
10. M. Jia, M. Xie and H. Liu, "Numerical Simulation of Cavitation in the Conical Spray Nozzle for Diesel Premixed Charge Compression Ignition Engines," *Fuel*, 90, 2011, pp. 2652-61.
11. F. Echouchene, H. Belmabrouk and P. L. Le, "Numerical Simulation of Wall Roughness Effects in Cavitating Flow," *Int J Heat Fluid Flow*, 32, 2011, pp. 1068-75.
12. Z. He, Z. Zhong, Q. Wang, Z. Jiang and Y. Fu, "An Investigation of Transient Nature of the Cavitating Flow in Injector Nozzles," *Applied Thermal Engineering*, 54, 2013, pp. 56-64.
13. 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*, 89, 2015, pp. 843-861.

## English Abstract

## Numerical Analysis of the Effects of Needle Lift and Seat on the Cavitation Flow in the Diesel Injector Nozzle

Miralam Mahdi and Mohammad Salari

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Training Teacher University, Tehran, Iran

(Received: 2015.8.17, Received in revised form: 2016.2.18, Accepted: 2016.3.17)

In this paper, cavitation flow inside the injector nozzle has been numerically simulated using ANSYS Fluent v15. The validations were performed with experimental results of Winkhofer et al. (2001). The calculated results from the three dimensional numerical simulation of cavitating flow in the nozzle with mixture multi-phase cavitating flow model have good agreement with the experimental data. Several important parameters such as mass flow rate and velocity profiles were used for the validations. The cavitation model used in the simulations is Schnerr and Sauer cavitation model. Due to high Reynolds numbers, turbulence effects have been taken into account by RANS methods using RNG  $k-\epsilon$  model. PRESTO discretization method is used for pressure equation and second upwind discretization method is used for momentum equation. The discharge coefficient is computed for several cavitation numbers and needle lift. The results show that the needle lift and seat shape of the nozzle have a strong influence on the volume fraction of diesel vapor and the discharge coefficient in the nozzle.

**Keywords:** Injector, Cavitation, Seat shape, Needle lift, Flow coefficient