

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

میراعلم مهدی' و محمد سالاری'

n.mahdi@srttu.edu ، 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، wohammadsalari1350@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 نرمافزار انسیس فلوئنت شبیهسازی شده است. جریان دوفاز بهصورت مخلوط همگن درنظر گرفته شده و مدل آشفتگی ٤ – k و مدل کاویتاسیون اسکنر-سویر برای شبیهسازی عددی انتخاب شده است. ابتدا نازلی که نتایج آزمایشگاهی برای آن موجود بوده شبیهسازی شده و با اعتبارسنجی نتایج، مدل آشفتگی مناسب انتخاب شده است. سپس یک نازل انژکتور واقعی چهارسوراخه برای شبیهسازی انتخاب شده است. برای کاهش هزینه محاسبات، تنها یکچهارم نازل مدلسازی شده و بهازای اختلاف فشارهای مختلف، مقدار دبی جریان و ضریب تخلیه بهدست آمده است. تحلیلهای انجامشده برای سه نشیمنگاه مختلف با ارتفاع متفاوت سوزن انژکتور انجام شده است. نتایج شبیهسازی نشان میدهد که ارتفاع سوزن انژکتور و شکل نشیمنگاه علاوه بر ضریب تخلیه بر محل تشکیل حفره کاویتاسیون نیز تأثیرگذار است.

كليدوا ژگان: انژكتور، كاويتاسيون، شكل نشيمنگاه، ارتفاع سوزن، ضريب تخليه

## مقدمه

احتراق گازوییل و سوخت دیزل موجب انتشار گازها و ذرات مضر متعددی می شود. یکی از راهکارهای کنترل آلایندهها کاهش تولید مواد آلوده کننده داخل سیلندر با جریان داخلی نازل و گردافشانی مرتبط می شود. گردافشانی سوخت و هوای 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 معمولا با تغییر ناگهانی در هندسه داخلی نازل، که موجب می شود فشار کمتر از فشار بخار شود، شکل می گیرد. انژکتورهای سوخت معمولا کوچکاند و هدف اولیه آنها 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 به بود می بخشد و درنتیجه احتراق سوخت را نیز

1. Atomization

<sup>2.</sup> 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 ذکرشده کمتر از شرایط واقعی تزریق بود، آنان فیلم کاویتاسیونی را که در گوشه ورودی اوریفیس با افزایش اختلاف فشار پدیدار شد، مشاهده کردند. وینکهوفر 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. گاواسیس[۴] از مدل اویلری-لاگرانژی برای شبیهسازی کاویتاسیون استفاده کرد. اسکنر 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>'</sup> و معادله پایهای انتقال را به معادلهای ریاضی سادهسازی کرد. لی و ریترز[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 فلوئنت 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 فلوئنت شبیهسازی کردند و نشان دادند که کاویتاسیون، علاوهبر 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 فلوئنت بررسی کردند. ایشان نشان دادند که میزان کاویتاسیون بر روی سطح زبر در شرایط فشار پایین کاهش مییابد، ولی با افزایش میزان فشان دادند موجب افزایش حفره کاویتاسیون میشود. هی و همکاران[۱۲] با استفاده از نرمافزار فلوئنت برسی 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 فلوئنت رابطه حرکت سوزن با عدد 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[۱۳] تأثیر پارامترهای هندسی نازل انژکتور را بر روی جریان و یویده کاویتاسیون به صورت عددی و با استفاده از نرمافزار فلوئنت راسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که نسبت طول

در این مقاله، با استفاده از نرمافزار انسیس فلوئنت، جریان داخل نازل انژکتور شبیهسازی شده است. ابتدا شبیهسازی بر روی نازل وینکهوفر، که نتایح آزمایشگاهی برای آن موجود است، انجام شده است. با انجام این شبیهسازی مدل آشفتگی و مدل کاویتاسیون مناسب انتخاب شده است. سپس یک نازل واقعی مدلسازی و تحلیل شده است. شبیهسازی برای ارتفاع مدل کاویتاسیون از کنور و شکل نشیمنگاه انجام شده تا علاوهبر تأثیر ارتفاع سوزن، نوع نشیمنگاه نیز در میزان کاویتاسیون درون نازل برسی شکر از مافزار انشیس از را مافتگی و مختلف سوزن انژکتور و شکل نشیمنگاه انجام شده تا علاوهبر تأثیر ارتفاع سوزن، نوع نشیمنگاه نیز در میزان کاویتاسیون درون نازل بررسی شود.

<sup>1.</sup> Rayleigh-Plesset

<sup>2.</sup> Kiva 3v

<sup>3.</sup> OpenFOAM

## معادلات حاكم

(۴)

برای شبیه سازی جریان درون نازل انژکتور، ابتدا مدل آن درنرمافزار گمبیت ساخته شده و شبکه بندی مناسب در میدان جریان ایجاد شده، سپس، با استفاده از نرمافزار فلوئنت، تحلیل عددی صورت می گیرد. باتوجه 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 شبیه سازی 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 بهصورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{m}) + \nabla (\rho_{m}\vec{v}_{m}) = 0$$
(1)
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{m}) + \nabla (\rho_{m}\vec{v}_{m}.\vec{v}_{m}) = -\nabla p + \nabla ([\mu_{m}(\nabla\vec{v}_{m} + \nabla\vec{v}_{m}^{T})] + \rho_{m}\vec{g}$$
(7)

 $\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \rho_v$ 

 $\alpha$  کسر حجمی هر یک از فازهاست. برای یک حجم کنترل مقادیر  $\alpha_v$  و  $\alpha_v$  و  $\alpha_v$  میتوانند، با توجه به فضای اشغال شده فاز مایع یا بخار، مقدار معینی داشته باشند. اگر شعاع حباب  $R_B$  بخار، مقدار معینی داشته باشند. اگر شعاع حباب  $R_b$  درنظر گرفته شود، مقدار  $\alpha_v$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\alpha_{v} = \frac{n_{b} \frac{4}{3} \pi R_{B}^{3}}{1 + n_{b} \frac{4}{3} \pi R_{B}^{3}}$$
( $\Delta$ )

که در آن n<sub>b</sub> تعداد حبابها در واحد حجم از مایع خالص تعریف میشود.

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

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

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

$$R_{\rm B} = \left(\frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n_b}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(9)

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

$$Cd = \frac{m}{A\sqrt{2\rho_{l}(P_{in} - P_{back})}}$$
(1.)

میراعلم مهدی و محمد سالاری

ش دبی جرمی واقعی و A سطح مقطع نازل است. عدد کاویتاسیون به صورت زیر تعریف می شود:  

$$K = \frac{P_{in} - P_v}{P_{in} - P_{back}}$$
(۱۱)
  
 $q$  فشار بخار اشباع است.

برای بررسی دقت روش عددی از نتایج آزمایشگاهی وینکهوفر برای مقایسه استفاده شده است. وینکهوفر پدیده کاویتاسیون را درون یک نازل شیشهای بهصورت آزمایشگاهی بررسی کرده است. هندسه استفادهشده در آزمایش وینکهوفر مطابق شکل ۱ است، که در این تحقیق برای شبیهسازی مدل شده است. شکل ۲ شبکه ایجادشده 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 1- Winklhofer nozzle model شکل ۱- مدل نازل وینکهوفر

Figure 2- Mesh generated in nozzle flow field شکل ۲- شبکه ایجادشده در میدان جریان نازل

شرط مرزی ورودی به صورت فشار ورودی درنظر گرفته شده که مقدار فشار سکون در این مرز همواره برابر Mpa ۱۰ 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 و مقدار فشار استاتیکی در قسمت ورودی نازل کاهش مییابد. شکل ۳ توزیع سرعت در صفحه میانی میدان خریان نازل را برای موجه مقدار فشار استاتیکی در قسمت ورودی نازل کاهش می اید. شکل ۳ توزیع سرعت در صفحه میانی میدان خریان نازل را برای سرعت در لبه ورودی بیشتر از نقاط دیگر است که منجر به کاهش فشار استاتیکی می شود (شکل ۴). هرگاه کاهش فشار استاتیکی به مقدار بحرانی برسد، حفره کاویتاسیون تشکیل می شود و هرچه مقدار فشار خروجی کمتر شود، طول حفره نیز افزایش مییابد.

Table 1- Deteailed settings for numerical simulation			
		Diesel (Main phase)	Diesel steam (Second phase)
Physical properties	Density (kg/m3)	840	0.029
	Viscosity (kg/m s)	0.0025	3.1×10 <sup>-6</sup>
	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	$n_b = n_{ref} \times \left( (p_v - p) / p_v \right)^{3/2}$	
	(m_3)		
	Critical pressure of cavitation (Pa)	$p_{cr} = p_v + 2\mu($	$1 + C_t \mu_t / \mu \times S_{max}$

جدول ۱ – شرایط ورودی برای شبیهسازی عددی تفاصینه ایمانیویسی میکودی برای شبیهسازی عددی



Figure 3- Velocity contour on symmetry plan at  $\Delta p=6Mpa$  شکل ۳- توزیع سرعت در صفحه میانی میدان جریان برای  $\Delta p$ =۶Mpa



Figure 4- Prussre contour on symmetry plan at  $\Delta p = 6Mpa$ شکل ۴- توزیع فشار استاتیکی در صفحه میانی میدان جریان برای  $\Delta p$ =۶Mpa

با ایجاد شبکه مناسب، میدان جریان با دو مدل آشفتگی x - k = w و w - k تحلیل شد. شبکه ایجادشده برای مدل آشفتگی k - w با ایجاد شبکه مربوط به مدلی شبکه مربوط به مدل k - w به مقدار k - w باشد. تعداد سلولهای شبکه مربوط به مدل k - w حدود ۱۸۵۰۰۰ است، در حالی که برای مدل w - k به مقدار ۲۵۰۰۰ افزایش یافته است. شایان ذکر است که برای انتخاب این تعداد سلول، استقلال از شبکه نیز بررسی شده است. شکل ۵ تغیرات سرعت را برای این دو مدل آشفتگی، و نتایج آزمایشگاهی را در مقطعی از نازل، که به فاصله است. شکل ۵ تغیرات سرعت را برای این دو مدل آشفتگی، و نتایج آزمایشگاهی را در مقطعی از نازل، که به فاصله  $m \mu m$  از لبه ورودی است، برای دو حالتی که کاویتاسیون وجود دارد و آزمایشگاهی را در مقطعی از نازل، که به فاصله  $m \mu m$  از لبه ورودی است، برای دو حالتی که کاویتاسیون وجود دارد و آزمایشگاهی را در مقطعی از نازل، که به مقدار بیشینه میرسد و سپس، در مرکز نازل مقدار سرعت کمی کاهش میابد. کاویتاسیون از می محلور به مقدار بیشینه میرسد و سپس، در مرکز نازل، مقدار سرعت کمی کاهش میابد.

شکل ۶ بهازای اختلاف فشارهای مختلف دوطرف نازل، مقدار دبی جرمی سوخت را برای دو مدل آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد. با افزایش اختلاف فشار مقدار دبی جرمی افزایش یافته تا جایی که به یک مقدار بیشینه می رسد. سپس، با افزایش بیشتر مقدار اختلاف فشار، تغییری در دبی جرمی ایجاد نمی شود. در این حالت، حفره کاویتاسیون به حالت سپس، با افزایش بیشتر مقدار اختلاف فشار، تغییری در دبی جرمی ایجاد نمی شود. در این حالت، حفره کاویتاسیون به حالت سپس، با افزایش بیشتر مقدار اختلاف فشار، تغییری در دبی جرمی ایجاد نمی شود. در این حالت، حفره کاویتاسیون به حالت سپس، با افزایش بیشتر مقدار اختلاف فشار، تغییری در دبی جرمی ایجاد نمی شود. در این حالت، حفره کاویتاسیون به حالت سپس، با افزایش بیشتر مقدار اختلاف فشار، تغییری در دبی جرمی ایجاد نمی شود. در این حالت، حفره کاویتاسیون به حالت سوپرکاویتاسیون تبدیل شده و کل فضای داخل نازل را پوشش داده و جریان خفه شده است. مقایسه نمودارها نشان می دهد بین نتایج عددی و آزمایشگاهی اختلاف کمی وجود دارد و نتایج مدل z - x به آزمایشگاهی نزدیکتر است. با توجه به اینکه در مدل z - x از توابع دیواره کنار دیوارهای نازل استفاده می شود و نسبت به مدل w - x ایناز به تعداد سلول کمتری است، بنابراین، در این تحقیق برای شبیه سازی عددی جریان داخل نازل از مدل آشفتگی z - k استفاده شده است. برای دو اختلاف فشار مدر می این ایزل، در شکل x - x اینو به تعداد سلول کمتری است، منابراین، در این تحقیق برای شبیه سازی عددی جریان داخل نازل از مدل آشفتگی z - x استفاده شده است. برای دو اختلاف فشار دور ی و آزمایشگاهی در این شکل مشاهده می شود. با افزایش اختلاف فشار حجم حفره کاویتاسیون درون نازل افزایش می یادی و آزمایشگاهی در این شکل مشاهده می شود. با افزایش اختلاف فشار حجم حفره کاویتاسیون درون نازل افزایش می از در می کار کنون آزم مده است. مطابقت خوب نتایج فشار مور و آزمایشگاهی در این شکل مشاهده می شود. با افزایش اختلاف فشار حجم حفره کاویتاسیون درون نازل افزایش می یادی و آزمایشگاهی در این شکل می این در این حدی و آزمایشگاهی در این شکل می و آزمایشگاهی در این می و آزمایشگاهی در این در این در می مود. با افزایش می و در در و آزمایشگاهی در این در این این در سکل و آزمایشگاه در در با در در در در در درون در درو درو داول در و درو در درو درو در

<sup>1.</sup> Choked

میراعلم مهدی و محمد سالاری



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

ورودی نازل



Figure 6- Vapor volume fraction contour on symmetry plan for different pressure difference شکل ۷- توزیع کسربخار 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 اریفیس برابر mm ۲۳/۲ و طول آن mm ۱/۳ 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 نشمینگاه با ۸ 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 بالاآمدن سوزن، جریان وارد این حجم کیسهای شده و از آنجا وارد اوریفیس میشود. با پایینآمدن سوزن، مقدار ۸ کاهش یافته و دبی جریان وارد این حجم کیسهای شده و از آنجا وارد اوریفیس میشود. با شیبدار نشیمنگاه جریان ورودی حجم کیسهای شکل قطع شده و هیچ تماسی بین سوزن و ورودی اوریفیس اتفاق نمیافتد. بهتر شرط مرزی در قسمت خروجی نازل، حجم استوانهای شکل ایجاد شده و شرا عران خروجی برای این قسمت اعمال شده است. 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 شبرای این قسمت اعمال شده است. شبکه بندی باسازمان در میدان جریان استفاده شده است. شکل ۱۰ کیفیت شبرای این قسمت اعمال شرا اوریفیس را نشان میدهد. با معیار قراردادن ضریب جریان، استقلال از شبکه بررسی شد. تعداد شبکه مناسب جهت تحلیل ۲۴۵۶۰۰ انتخاب شده است.



نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق، سال هشتم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۴

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

# بررسي نتايج

شرایط تحلیل نازل انژکتور همانند نازل وینکهوفر است (جدول ۱). در کلیه تحلیلها مقدار فشار خروجی برابر kpa است. با تغییر فشار ورودی (عدد کاویتاسیون) و ارتفاع سوزن، تحلیلهای مختلف صورت گرفته است. مدل آشفتگی k – *ɛ* استاندارد با توابع دیواره و الگوریتم حل سیمپل انتخاب شده است. در مدل کاویتاسیون اسکنر که در این تحقیق برای شبیهسازی جریان انتخاب شده، تعداد حباب در واحد حجم مایع،*n*<sub>b</sub>، یک پارامتر تأثیرگذار در شبیهسازی جریان است. این پارامتر معمولاً با استفاده از روشهای آزمایشگاهی بهدست میآید. با بررسی مراجع مختلف برای نازل انتخابشده مقدار *n*<sub>b</sub> برای سیال آب موجود بود. بنابراین، سیال انتخابشده برای شبیهسازی در این تحقیق آب است که خواص آن در جدول ۲ آمده است.

Table 2- Physical properties of water		
properties		
Density (kg/m3)	998	
Viscosity (kg/m s)	0.001	
Saturated vapour pressure (Pa)	2360	
Temperature (K)	293	
Volumetric number density of bubbles (m_3)	$1.9 \times 10^{11}$	

جدول ۲- خواص فیزیکی آب Table 2- Physical properties of wate



Figure 11- Velocity contour in symmetry plan at h=0.1mm, k<sup>1/2</sup>=1.094 h=0.1mm , k<sup>1/2</sup>=1.094 شکل ۱۱- توزیع سرعت در صفحه میانی نازل برای حالت



نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق، سال هشتم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۴

Figure 12- Vapor volume fraction contour at h=0.1mm for different cavitation numbers شکل ۱۲– توزیع کسر حجمی بخار برای حالت h=0.1mm 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، علاوهبر 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 (شکل۱۳–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

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 می یابد. در یک عدد کاویتاسیون معین، کاهش ارتفاع سوزن موجب کاهش ضریب جریان می شود. هرچه ارتفاع سوزن کمتر شود تأثیر آن برروی ضریب جریان بیشتر نمایان می شود. در ارتفاع نزدیک به مقدار کمینه، باتوجه به اینکه







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

پس از بررسی تأثیر ارتفاع سوزن بر پدیده کاویتاسیون درون نازل، حال، اثر شکل نشیمنگاه بر این پدیده بررسی می شود. 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 می کند. نوع ۷۵۰۰ نازل در شکل ۱۵ –ب آورده شده است.

<sup>1.</sup> Valve-Covered-Orifice (VCO)

در این نوع نشیمنگاه هنگام قطع سوخت، سطح سوزن مستقیم بر سطح ورودی اوریفیس نشسته و جریان سوخت قطع می شود. شکل ۱۵–پ نازل استاندارد بهینه شده را نشان می دهد. در این نوع نازل، حجم کیسه ای شکل وجود نداشته و شکل نازل همانند VCO است. با توجه به اینکه این نازل عملکرد بهتری نسبت به ۷۵۵ دارد، بنابراین، در این مقاله نازل بهینه شده شناخته می شود. در این نازل، همانند حالت استاندارد، سوزن مستقیم ورودی اوریفیس را نمی بندد، بلکه سطح سوزن با سطح شیب دار نشیمنگاه تماس پیدا کرده و جریان ورودی به اوریفیس قطع می شود. هندسه سه بعدی این سه نازل در شکل ۱۶ آمده است.



a-Standard nozzle الف– نازل استاندار د

الف- نازل استاندارد







پ- نازل VCO

b- Optimized nozzle ب– نازل بهینه شده 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 بهترتیب برای نازل بهینه و ۷CO 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

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

شکل ۱۸- تغییرات ضریب جریان نازل ۷CO با عدد کاویتاسیون

شکل ۱۷- تغییرات ضریب جریان نازل بهینه با عدد کاویتاسیون

1.38

برای بررسی دقیق تر تأثیر شکل نشیمنگاه بر ضریب جریان، بهازای ارتفاع سوزن انژکتور مشخص، نمودار ضریب جریان بر عدد 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 می شود؛ مثلاً برای  $K^{1/2} = 1.41$  اختلاف بیشینه بین ضریب جریان برای ارتفاع سوزن از ۲۸ بین ضریب جریان برای ارتفاع سوزن اختلاف این ضریب جریان برای ارتفاع سوزن اختلاف بین ضریب جریان بیشتر می شود؛ مثلاً برای استاندارد است و معین ضریب جریان برای ارتفاع سوزن اختلاف بین ضریب جریان برای ارتفاع سوزن اختلاف این ضریب جریان برای ارتفاع سوزن اختلاف این ضریب جریان برای ارتفاع سوزن برای مراج می مراج می مرد می مرد می مرد می مرد می مرد می شود. مثلاً برای ۱۹۹ معدار مراج میشینه بین ضریب جریان برای ارتفاع سوزن برای مراج می مراج می مرد می مرد؛ مثلاً برای ۱۹۹ می محلاف بیشینه بین ضریب جریان برای ارتفاع سوزن اختلاف این مراج می مراج می مرد؛ مثلاً برای ۱۹۹ می مرد می مرد می مرد می مرد می مرد می مراج می مراج می مرد می مرد می مراج می مرد می مرد می مرد می مرد؛ مثلاً برای ۱۹۹ می مرد از مراح می مرد می مرد از محاله می مرد می می مرد می مرد می مرد می مرد می



Figure 19- Variation of different nozzles flow coefficient with cavitation number at h=0.54mm





Figure 20- Variation of different nozzles flow coefficient with cavitation number at h=0.1mm



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

توزیع سرعت در صفحه میانی نازل انژکتور در شرایط h=0.1mm, k<sup>1/2</sup>=1.0487 برای هر سه نشیمنگاه در شکل ۲۲ آمده است.



Figure 22- Velocity contour on nozzle symmetry plan for h=0.1mm, k<sup>1/2</sup>=1.0487 h=0.1mm , k<sup>1/2</sup>=1.0487 شکل ۲۲ – توزیع سرعت در صفحه میانی نازل انژکتور برای شرایط

برای نازل استاندارد، سرعت بیشینه حدود 44m/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 ۷CO حدود sml 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=0.1mm , k<sup>1/2</sup>=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. بزرگبودن حجم حفره کاویتاسیون، مقدار کوچک ضریب جریان را نتیجه میدهد که این موضوع در شکلهای ۱۹ تا ۲۱ توضیح داده شد.

در بررسیهایی که برروی 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 آشفتگی جریان سوخت خروجی از نازل انژکتور بیشتر باشد، ترکیب سوخت و هوا در محفظه احتراق بهتر صورت گرفته و فرایند احتراق با کیفیت بهتری انجام می شود.

شکل ۲۴ توزیع شدت آشفتگی جریان در صفحه خروجی اوریفیس را نشان میدهد. با مقایسه این شکلها، چنین نتیجه می شود که در سطح خروجی اوریفیس مربوط به نشیمنگاه استاندارد شدت آشفتگی جریان بیشتر از دو حالت دیگر است و منطقهای که بیشینه شدت آشفتگی 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 بهجر است.





نتيجەگىرى

جریان سیال داخل نازل انژکتور موتور دیزل با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیهسازی شد. جریان دوفاز به  $-e_{c}$  مورت مخلوط همگن درنظر گرفته شد و مدل آشفتگی  $-e_{c}$  و مدل کاویتاسیون اسکنر-سویر برای شبیهسازی عددی استفاده شد. مقدار ضریب تخلیه بهازای اعداد کاویتاسیون مختلف برای چندین ارتفاع سوزن انژکتور و سه نوع نشیمنگاه بررسی شد. نتایج بهدست آمده نشان میدهد ضریب تخلیه برای عدد کاویتاسیون خیلی بالا و خیلی پایین مستقل از عدد کاویتاسیون برای چندین ارتفاع سوزن انژکتور و سه نوع نشیمنگاه بررسی شد. نتایج بهدست آمده نشان میدهد ضریب تخلیه برای عدد کاویتاسیون خیلی بالا و خیلی پایین مستقل از عدد کاویتاسیون بوده و تقریباً ثابت است. با نزدیکشدن ارتفاع سوزن به مقدار کمینه خود، حفره کاویتاسیون در مجاورت سوزن تشکیل شده که احتمال فرسایش سوزن را افزایش میدهد. مقدار ضریب تخلیه برای نازل با نشیمنگاه استاندارد نسبت به دوحالت دیگر کمتر بوده، ولی شدت است است. که در اوریفیس این نازل نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است که درنتیجه دوحالت دیگر بیشتر است که در نتیجه میان در اوریفیس این نازل نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است که در تکتور موتون در اوریفیس این نازل نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است که درنتیجه کی باش سوخت در این نوع نازل افزایش میدهد. مقدار ضریب تخلیه برای نازل با نشیمنگاه استاندارد نسبت به دوحالت دیگر بیشتر است که درنتیجه که میاین پایش سوخت در این نوع نازل افزایش میابد.

c- VCO nozzle VCO پ– نازل VCO Figure 24- Turbulence Intensity contour on nozzle outlet plan for h=0.1mm, k<sup>1/2</sup>=1.0487 h=0.1mm , k<sup>1/2</sup>=1.0487 توزیع شدت آشفتگی در صفحه خروجی نازل انژکتور برای شرایط 10487

1.54e+01 1.43e+01 1.31e+01 1.20e+01

#### میراعلم مهدی و محمد سالاری

منابع

- 1. W. Bergwerk, "Flow Pattern in Diesel Nozzle Spray Holes," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 173, 1959, pp. 655-660.
- 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. 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, 2001, pp. 574-9.
- 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.
- 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.
- 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 Conicalspray 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.
- 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 Winkhofler et al. (2001). The calculated results from the three dimensional numerical simulation of cavitating flow in the nozzle with mixture multiphase 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– $\varepsilon$  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