



## مقایسه نتایج شبیه‌سازی ۲ بعدی و ۳ بعدی در پیش‌بینی مشخصه‌های جریان سیال داخل انژکتور پیچشی مماسی

جواد منصوریزاده<sup>۱\*</sup>، علی میر محمدی<sup>۲</sup>

Mansourizadeh.j3282@gmail.com  
a.mirmohammadi@sru.ac.ir

<sup>۱\*</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی  
<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

### چکیده

انژکتورهای پیچشی مماسی به صورت گسترده در موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع از انژکتورها شامل: ورودی‌های مماسی، محفظه چرخش، بخش همگرا و اوریفیس خروجی هستند. در این مقاله با استفاده از روش حجم سیال (VOF) به شبیه‌سازی جریان سیال در داخل انژکتور پیچشی مماسی پرداخته شده است. در شبیه‌سازی ۲ بعدی (به صورت محوری چرخشی) و ۳ بعدی، با حل همزمان معادلات ناویر استوکس و مدل VOF به بررسی مشخصه‌های جریان در داخل انژکتور، اوریفیس انژکتور و ارزیابی رفتار سیال پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های ۲ بعدی و ۳ بعدی نشان دادند، از نقطه نظر کسر حجمی و ضخامت لایه فیلمی نفت سفید تشکیل شده در اوریفیس انژکتور به حالت تئوری نزدیکتر است هر دو شبیه‌سازی خطایی زیر ۵ درصد دارند، اما از نظر مشخصه‌های جریان از جمله سرعت کل در اوریفیس انژکتور و زاویه پاشش شبیه‌سازی سه بعدی به حالت تجربی و تئوری نزدیکتر است.  
**کلیدواژه‌ها:** انژکتور پیچشی مماسی، شبیه‌سازی، VOF، نفت سفید.

## Compare of characterization of fluid flow in simplex injector in 2D and 3D simulation

Javad mansourizadeh<sup>1</sup>, Ali Mir mohammadi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

Mansourizadeh.javad@gmail.com

<sup>2\*</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

a.mirmohammadi@sru.ac.ir

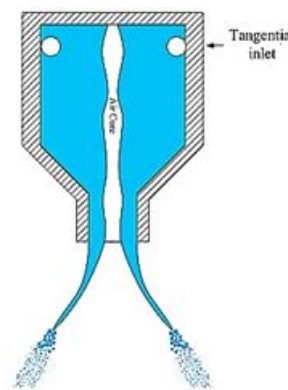
### Abstract

The simplex atomizers are widely used in an internal combustion engine. Commonly, this type of injectors consists of tangential inlet ports, a swirl chamber, a converging spin chamber, and a discharge orifice. In this paper, the Volume-of-Fluid (VOF) method is used to simulate internal fluid flow in simplex atomizers. The two-dimensional (axisymmetric swirl) and three-dimensional, Navier-Stokes equations coupled with the VOF method are employed for accounting for the formation mechanism of the liquid film inside the swirl chamber, the orifice hole injector, and evaluation of fluid behavior. The 2D and 3D simulations showed that volume fraction and liquid film of kerosene in orifice injector like theoretical data and have an error less than 5 percent, but the characterization of fluid flow such as velocity magnitude in the orifice of injector and cone angle in 3D simulation close the experimental and theoretical.

**Keywords:** Simplex atomizer, Simulation, VOF, Kerosene

## ۱. مقدمه

پایداری احتراق و عملکرد موتورهای احتراقی بشدت به فرایند اتمیزاسیون و اختلاط سوخت و اکسیدکننده بستگی دارد. انواع مختلفی از انژکتورها وجود دارند که از بین انژکتورهای موجود با توجه به عملکرد بهتر انژکتورهای پیچشی مماسی در فشارهای تزریق پایین، این انژکتورها به صورت گسترده در موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. گسترش وسیع استفاده از انژکتورهای پیچشی مماسی به علت سادگی در ساختار، قابل اطمینان بودن و تاثیر بهینه آن‌ها در اتمیزاسیون سیالات و همچنین دستیابی به چتر پاشش مناسب در آنها است [۱، ۲]. در این پژوهش جریان داخلی انژکتور پیچشی مماسی مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۱ شماتیک انژکتور پیچشی مماسی را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۱. انژکتور پیچشی مماسی [۳].

پارامترهای مهمی از قبیل: قطر هسته هوا، زاویه اسپری، ضخامت لایه سیال و سرعت سیال به شدت جریان داخل انژکتور پیچشی مماسی وابسته هستند [۳]. از اولین کارهای انجام شده در مورد جریان داخلی می‌توان به کار تیلور اشاره کرد [۴]. تیلور از تئوری لایه مرزی برای تعیین مشخصه جریان در داخل اوریفیس انژکتور فشاری پیچشی استفاده کرد. وی ادعا نمود جریان لایه مرزی فضای دهانه خروجی انژکتور را در بر می‌گیرد و استفاده از تئوری پتانسیل در اوریفیس و ناحیه همگرایی، دقت کافی ندارد. به با استفاده از سه مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای خطی<sup>۱</sup> و یک مدل جبری صریح تنش رینولدزی<sup>۲</sup> شبیه‌سازی جریان داخل انژکتور پیچشی مماسی انتها همگرا را مورد بررسی قرار داد [۵]. بعد از بررسی نتایج شبیه‌سازی

مشخص شد که مدل جبری صریح تنش رینولدز مناسب‌تر است. بالهدف و همکارانش اقدام به شبیه‌سازی جریان خارج انژکتور پیچشی مماسی کردند [۶]. آنها از روش اویلری<sup>۳</sup> جهت شبیه‌سازی جریان دو فازی درون انژکتور و مدل تنش رینولدزی<sup>۴</sup> برای آشفتگی استفاده کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در خصوص مقدار سرعت محوری جریان خارج انژکتور با نتایج تجربی مقایسه کردند و نشان داده مدل آشفتگی تنش رینولدز مناسب برای پیش بینی رفتار سیال در انژکتور پیچشی مماسی است. کبریایی رساله دکتری خود را در زمینه شبیه‌سازی جریان درون انژکتور فشاری پیچشی ارائه داد [۷]. وی از روش تنظیم سطح<sup>۵</sup> برای مدل‌سازی جریان دو فاز استفاده کرد و جریان را به صورت آرام و آشفته شبیه‌سازی کرده و از روش تنش رینولدزی برای رژیم آشفته استفاده کرده است. نتایج بیانگر آن بود که در رژیم آرام جریان درون محفظه چرخش تطبیق خوبی با نتایج تجربی دارد در حالی که در اوریفیس رژیم آشفته دقت بالاتری را نشان می‌دهد. امی و همکاران به بررسی تاثیر ویسکوزیته مایع و سرعت چرخش سیال بر فرایند اتمیزاسیون در یک انژکتور دو سیاله پرداختند [۸]. ایشان نشان دادند با افزایش ویسکوزیته طول شکست اولیه<sup>۶</sup> افزایش و با افزایش سرعت چرخش ناپایداری افزایش و طول شکست کاهش می‌یابد. اخیرا نیز در یک مطالعه جدید که توسط فی انجام شده است به تاثیر فشار محیط تخلیه بر روی انژکتور پیچشی مماسی پرداخته شده است [۹]. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که پروفایل سرعت محوری مستقل از فشار محیط تخلیه است در حالی که زاویه پاشش با افزایش فشار محیط تخلیه در برخی موارد کاهش پیدا می‌کند. همچنین رازقی و همکاران جریان داخلی و رفتار اسپری انژکتور پیچشی مماسی را به دو روش عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. در این مطالعه مشاهدات تجربی به دست آمده از روش‌های پراکندگی میا و لیف<sup>۷</sup> نشان می‌دهد که چهار ناحیه با دانسیته بالا از سیال در محیط پاشش شکل گرفته است.

با توجه به مطالب گفته شده می‌توان نتیجه گرفت که در زمینه تحقیقات عددی، جریان داخل انژکتور پیچشی مماسی به صورت ۲ بعدی و ۳ بعدی شبیه‌سازی شده است، اما در خصوص مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعه ۳ بعدی و ۲ بعدی پژوهشی صورت نگرفته

<sup>3</sup> Euler

<sup>4</sup> Reynolds Stress

<sup>5</sup> Level Set

<sup>6</sup> Primary breakup

<sup>7</sup> Mie and LIF Scattering

<sup>1</sup> Linear Eddy Viscosity Models (LEVM)

<sup>2</sup> Algebraic Reynolds Stress Model (ARSM)



۲/۵	طول ناحیه همگرا در جهت محور انژکتور (mm)
-----	---

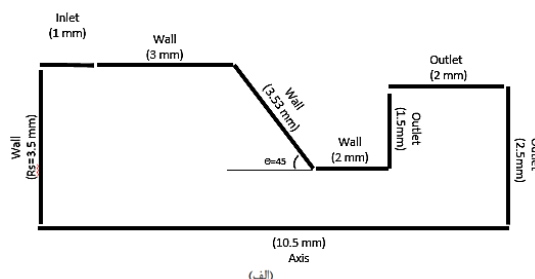
به علت نوع جریان سه بعدی در داخل انژکتورهای پیچشی مماسی، در مدل سازی ۲ بعدی، از یک مدل دوبعدی متقارن محوری با در نظر گرفتن چرخش استفاده می‌شود. به علت ماهیت حل دو بعدی متقارن محوری تعداد کانال‌های ورودی در یک انژکتور واقعی باید با مقدار متناظر آن در روش دو بعدی متقارن محوری جایگزین گردد. در مدل دو بعدی عرض قسمت ورودی و همچنین محاسبه سرعت مماسی و شعاعی با استفاده از معادله ممتوم زاویه‌ای و دبی جرمی کلی سیال در ابتدای محفظه چرخش بدست می‌آید. بنابراین در مدل دو بعدی مقدار سرعت مماسی با معادله (۴) و مقدار سرعت شعاعی با معادله (۵) در ورودی دامنه حل محاسبه می‌شود.

$$u_s = \frac{\dot{m} D_s - d_p}{\rho A_p D_s} \quad (4)$$

$$u_r = \frac{\dot{m}}{\rho \pi D_s (l_{inlet})} \quad (5)$$

در معادلات فوق،  $(D_s)$  قطر محفظه چرخش انژکتور،  $(\dot{m})$  دبی جرمی عبوری،  $(\rho)$  دانسیته سیال و  $(A_p)$  سطح مقطع موثر روزنه-های ورودی،  $(l_{inlet})$  طول ناحیه ورودی در شبیه‌سازی دو بعدی و  $(d_p)$  قطر روزنه ورودی به انژکتور است [۹، ۱۰].  
 مدل سه بعدی بر اساس ابعاد نشان داده شده در جدول ۱ رسم شده است.

دامنه حل، ابعاد هندسی و نوع مرزها در انژکتور پیچشی مماسی برای مدل ۲ بعدی در (شکل ۲-الف) و مدل ۳ بعدی در (شکل ۲-ب) نشان داده شده است. در این پژوهش شرایط مرزی برای شبیه‌سازی دو بعدی و تقارن محوری همراه با چرخش (شکل ۲)، دیواره، محور تقارن، سرعت ورودی جریان (بر اساس فشار تزریق ۱۰ بار) و فشار محیط در خروج در نظر گرفته شده است. برای شرط مرزی دیواره شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی ۳ بعدی فشار ورودی ۱۰ بار و فشار خروجی فشار محیط و مابقی مرزها به عنوان دیوار در نظر گرفته شده است.



است، لذا در این مقاله با انجام شبیه‌سازی ۲ بعدی و ۳ بعدی، به مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ۲ بعدی و ۳ بعدی از نظر توزیع کسر حجمی سیال، زاویه پاشش، سرعت خروجی و ضخامت لایه فیلمی مایع در شرایط عملیاتی یکسان پرداخته خواهد شد.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. معادلات حاکم

معادلات حاکم برای جریان دو فازی در انژکتور پیچشی مماسی معادلات بقای جرم یا پیوستگی (معادله ۱) و مومنتوم یا ناویر استوکس (معادله ۲) هستند. در مدل VOF مقدار کسر حجمی هر فاز در هر سلول محاسباتی توسط معادله دیگری تحت عنوان معادله کسر حجمی (معادله ۳) محاسبه می‌شود.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (2\mu D) + g + \frac{1}{\rho} F_b \quad (2)$$

$$f(x, t) = \begin{cases} 0 & \text{In gas} \\ 0 < f < 1 & \text{at the gas-liquid interface} \\ 1 & \text{In liquid} \end{cases} \quad (3)$$

در معادلات (۱) و (۲)،  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب، بردار سرعت، ویسکوزیته سیال، مقدار فشار و چگالی هستند. پارامتر  $g$  شتاب گرانش بوده و  $F_b$  بیانگر نیروی تنش سطحی که تنها در سطح مشترک دو سیال رخ می‌دهد را نشان می‌دهد.  $D$  تانسور تنش (تغییر شکل) می‌باشد. در معادله (۳)،  $t$  زمان و  $X$  شماره گره در مدل عددی است.

### ۲-۲. شکل هندسی

شکل هندسی ۲ بعدی و ۳ بعدی در این مقاله، از کار تجربی انجام شده توسط کیم و همکاران [۱۱] استخراج شده است. ابعاد هندسی انژکتور استفاده شده توسط کیم و همکاران در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. ابعاد هندسی انژکتور استفاده شده توسط کیم و همکاران [۱۱].

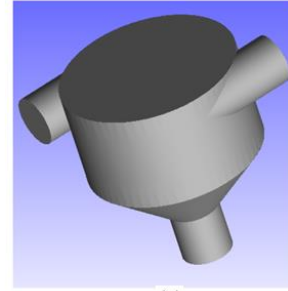
مقدار	مشخصه
۲	قطر روزنه ورودی (mm)
۲	تعداد روزنه
۷	قطر محفظه چرخش (mm)
۴	طول محفظه چرخش (mm)
۲	قطر اوریفیس (mm)
۲	طول اوریفیس (mm)
۴۵	زاویه همگرا (deg)



$(\text{kg/s})\dot{m}_{exp}$	۰/۰۲۸	۰/۰۳۵	۰/۰۴	۰/۰۴۷
$(\text{kg/s})\dot{m}_{num}$	۰/۰۲۶	۰/۰۳۳	۰/۰۳۹	۰/۰۴۵
خطا (%)	۴/۹۱	۳/۶۲	۳/۰۶	۳/۶۰

### ۳. بحث بر روی نتایج

با توجه به هدف مقاله، نتایج به دست آمده مربوط به کسر حجمی نفت سفید، زاویه پاشش، سرعت نفت سفید و ضخامت لایه فیلمی مورد مقایسه قرار می‌گیرد که در ادامه به این موضوعات پرداخته شده است.



(ب)

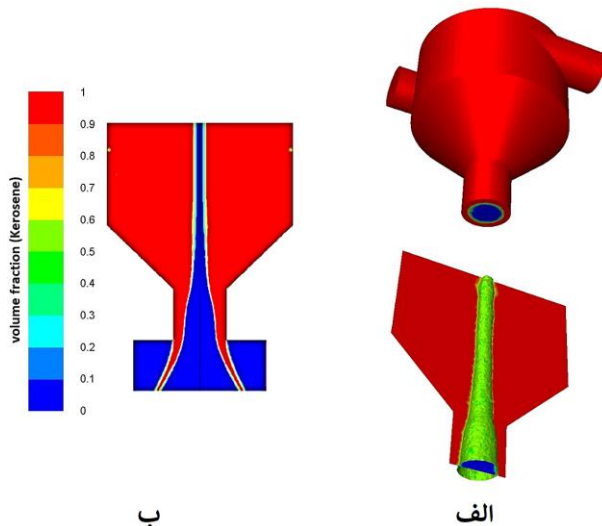
شکل ۲. دامنه و ابعاد انژکتور الف) مدل ۲ بعدی ب) مدل ۳ بعدی

### ۳-۲. روش شبیه‌سازی

نرم افزار FLUENT برای حل عددی جریان داخل انژکتور پیچشی مماسی استفاده شده است. برای حل معادلات، از روش عددی حل کننده بر اساس فشار و با الگوریتم مجزا، استفاده شده است. طرح درونبایی IPRESTO برای محاسبه‌ی مقدار فشار بر روی هر سطح سلول استفاده شده است. زیرا این طرح برای مسائلی با جریان‌های چرخشی، طرح مناسبی می‌باشد. طرح بالادست مرتبه‌ی دوم برای معادلات مومنتوم و انرژی جنبشی توربولانس و نرخ اتلاف، استفاده شده است. زیرا هنگامی که جریان از خطوط شبکه‌بندی به صورت مورب، عبور کند، طرح بالادست مرتبه‌ی اول، خطای گسسته‌سازی عددی را افزایش می‌دهد. الگوریتم SIMPLE برای کوپلینگ فشار-سرعت استفاده شد. مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) در انژکتورهای پیچشی مماسی به دلیل چرخش قوی و گردان‌های فشار شدید پیش‌بینی بهتری از جریان سیال دارد. روش Compressive برای کسر حجمی استفاده شده است.

### ۳-۱. کسر حجمی نفت سفید

شکل ۳ نشان می‌دهد در یک فشار عملیاتی یکسان (۱۰ بار) شکل هسته هوای تشکیل شده در راستای محور انژکتور در هر دو شبیه‌سازی ۲ بعدی و ۳ بعدی مشابه هم می‌باشد. این امر نشان می‌دهد الگوی هسته هوا تشکیل شده با معیارهای فیزیکی مطرح شده در مورد انژکتورهای پیچشی مماسی مطابقت دارد و قطر هسته هوا به تدریج در داخل انژکتور در هر دو شبیه‌سازی رفته رفته کاهش می‌یابد. لذا با توجه به توزیع کسر حجمی نفت سفید از نظر شکل هسته هوای تشکیل شده بین مدل ۲ بعدی و ۳ بعدی تفاوت چشم‌گیری وجود ندارد [۱].



شکل ۳. توزیع کسر حجمی نفت سفید الف) مدل ۳ بعدی ب) مدل ۲ بعدی.

### ۳-۴. اعتبار سنجی

نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی به روش حجم سیال در حالت عملکرد پایای انژکتور پیچشی مماسی و داده‌های آزمایشگاهی از مرجع [۱۱] در جدول ۱ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که خطا برای مقدار دبی خروجی آزمایشگاهی و مقدار به دست آمده از روش عددی در فشارهای پاشش ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ مگاپاسکال زیر ۵ درصد است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه در مرجع [۱۱] سوخت کروسین در شرایط ترمودینامیکی ۲۵ درجه سانتی‌گراد با دانسیته  $800 \text{ kg/m}^3$ ، کشش سطحی  $0.027 \text{ N/m}$  و ویسکوزیته دینامیکی  $0.024 \text{ Pa.s}$  به عنوان سیال عامل به کار رفته است، در شبیه‌سازی‌های این پژوهش نیز از داده‌های این مرجع استفاده شده است.

جدول ۲. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی دبی انژکتور پیچشی مماسی.

فشار (MPa)	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۱
------------	-----	-----	-----	---

### ۳-۲. ضخامت لایه فیلمی

یکی از مهم‌ترین پارامترها در انژکتور پیچشی مماسی که تاثیر بسزایی در طول شکست لایه فیلمی دارد، ضخامت لایه فیلمی است. جدول ۳ ضخامت لایه فیلمی شکل گرفته در اوریفیس انژکتور را بر اساس



(۷) نیروی ائرو دینامیکی، این نیروی وابسته به مجذور سرعت سیال است.

$$F_{aero} = C_d \rho_{gas} A \frac{(u_{fluid} - u_{gas})^2}{2} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، (Cd) ضریب نیروی باز دارنده یا ضریب درگ، (u<sub>gas</sub>) سرعت محیط تزریق یا سرعت گاز در خارج از انژکتور، (u<sub>fluid</sub>) سرعت مایع، (p<sub>gas</sub>) چگالی محیط تزریق یا گاز و (A) سطح تصویر شده مایع بر روی صفحه عمود بر جهت جریان می باشد [۲].  
 لذا بر این اساس سرعت کل لایه فیلمی در جدول ۵ نشان داده است. مشاهده می شود که سرعت کل سیال به دست آمده از مدل ۳ بعدی به مقدار تئوری رابطه (۸) نزدیکتر است. رابطه (۸) بر اساس رابطه برنولی با نادیده گرفتن انرژی پتانسیل در جهت ارتفاع (Z) نوشته شده است.

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \alpha \frac{V_{fluid}^2}{2} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، (ΔP) اختلاف فشار، (p) دانسیته مایع و (α) ضریب تصحیح سرعت است. در جریان های آشفته این مقدار در حدود ۱/۰۸ می باشد. با قرار دادن مقدار ۱/۰۸ در این معادله مقدار سرعت تئوری ۴۸/۱ به دست خواهد آمد [۱۲]. لذا با توجه به داده های جدول ۵ نتایج شبیه سازی ۳ بعدی به حالت تئوری نزدیکتر بوده و طبق رابطه نیروی ائرو دینامیکی عملکرد فرایند اتمیزاسیون بهتر خواهد بود.

جدول ۵. مقایسه سرعت کل نفت سفید در مدل ۲ بعدی و ۳ بعدی.

۲ بعدی	۳ بعدی	تئوری	
۴۴/۲	۴۵/۶	۴۸/۱	سرعت محوری (m/s)
۸/۱۰	۵/۱۹	-	درصد خطا (%)

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله انژکتور پیچشی مماسی به صورت ۲ بعدی و ۳ بعدی در فشار تزریق یکسان ۱۰ بار شبیه سازی شد و مشخصه های مهم جریان سیال از قبیل: کسر حجمی نفت سفید، ضخامت لایه فیلمی، زاویه پاشش و سرعت کل نفت سفید در اوریفیس انژکتور به دست آمده از شبیه سازی ها با مقدار تئوری و تجربی مقایسه گردید و خلاصه نتایج زیر به دست آمد:

- توزیع کسر حجمی نفت سفید و شکل هسته هوای تشکیل شده در شبیه سازی ۲ بعدی و ۳ بعدی با تئوری های مطرح شده در مورد انژکتورهای پیچشی مماسی مطابقت دارد.
- ضخامت لایه فیلمی در مدل ۲ بعدی نسبت به مدل ۳ بعدی به حل تئوری نزدیکتر است.

رابطه تجربی، شبیه سازی ۲ بعدی و ۳ بعدی نشان می دهد. رابطه تجربی ارائه شده برای تخمین ضخامت لایه فیلمی (liquid film) به صورت رابطه (۶) است.

$$h_{liquid\ film} = 2.7 \left( \frac{d_n \dot{m} \mu_l}{\rho_l \Delta P} \right)^{0.25} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، (dn) قطر اوریفیس انژکتور، (ṁ) دبی جرمی انژکتور، (μ<sub>l</sub>) ویسکوزیته دینامیکی مایع، (p) دانسیته مایع و (ΔP) اختلاف فشار تزریق می باشد [۳]. همانطور که قابل مشاهده است، خطای شبیه سازی ۲ بعدی کمتر از ۳ بعدی می باشد و در این بخش شبیه سازی ۲ بعدی عملکرد بهتری داشته است.

جدول ۳. مقایسه ضخامت لایه فیلمی نفت سفید در مدل ۲ بعدی و ۳ بعدی.

۲ بعدی	۳ بعدی	تئوری	
۰/۳۴۵	۰/۳۳۵	۰/۳۵۱	ضخامت لایه فیلمی (mm)
۱/۷۰	۴/۵۵	-	درصد خطا (%)

#### ۳-۳. زاویه پاشش

زاویه پاشش خروجی از انژکتور نشان از میزان توزیع سوخت یا اکسید کننده دارد. جدول ۴ زاویه پاشش اندازه گیری شده توسط کیم و همکاران و شبیه سازی دو بعدی و ۳ بعدی را نشان می دهد [۱۱].  
 داده های جدول ۴ نشان می دهد که زاویه پاشش مدل ۳ بعدی به مراتب از خطای کمتری برخوردار است. در توجیه این امر می توان گفت در شبیه سازی ۲ بعدی در اعمال شرایط مرزی ورودی انژکتور، یک سری محاسبات تئوری با فرضیات ساده کننده استفاده شده است. اما در شبیه سازی ۳ بعدی با اعمال فشار تزریق نیازی به اعمال این شرایط نیست و مطمئناً شرایط از نظر عملکردی مشابه کار تجربی می باشد و دیگر اینکه با توجه به وجود ناحیه همگرا در انژکتور نرخ تبدیل سرعت ها به یکدیگر در مدل ۳ بعدی به مراتب پیچیده تر از مدل ۲ بعدی می باشد.

جدول ۴. مقایسه زاویه پاشش نفت سفید در مدل ۲ بعدی و ۳ بعدی.

۲ بعدی	۳ بعدی	تجربی	
۳۱	۳۵/۵	۳۶	زاویه پاشش (deg)
۱۳/۸۸	۱/۳۸	-	درصد خطا (%)

#### ۳-۴. سرعت کل نفت سفید در اوریفیس انژکتور

پدیده اتمیزاسیون و تبدیل فیلم مایع به قطرات ریز، وابسته به میزان نیروی ائرو دینامیکی وارد شده به لایه فیلمی است. با توجه به رابطه



[3] Kang, Z., et al., Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine. Acta Astronautica, 2018. 145: p. 174-198.

[4] Taylor. The mechanics of swirl atomizer. in International congress Applied mechanics. 1948.

[5] Yeh, C.-L., Numerical simulation of a turbulent liquid jet emanating from a plain-orifice atomizer and a pressure-swirl atomizer. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2007. 51(12): p. 1187-1212.

[6] Belhadef, A., A. Vallet, and F. Anselmet. Pressure Swirl Atomization Modelling Using the Eulerian Approach. In 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System. 2010.

[۷] کبریایی آزاده، بررسی جریان درون انژکتورهای فشاری-چرخشی، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف ۱۳۹۰.

[8] ROSTAMI, E., et al., Investigation of The Effect Of Liquid And Air Swirl Velocity And Liquid Viscosity On The Hollow Cone Spray Atomization. Annals of the University of Petrosani Mechanical Engineering, 2014. 16.

[9] Fu, Q.-f., Numerical simulation of the internal flow of swirl atomizer under ambient pressure. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016. 230(15): p. 2650-2659.

[10] Razeghi, A., O.E. Nural, and Ö. Ertunç, Experimental and Numerical Investigation of Circumferential Distribution Of Open-End Swirl Atomizer.

[11] Kim, H., et al., Spray characteristics of aluminized-gel fuels sprayed using pressure-swirl atomizer. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2017. 249: p. 36-47.

[12] Munson, B.R., et al., Fluid mechanics. 2013: Wiley Singapore.

• زاویه پاشش و سرعت کل نفت سفید در مدل ۳ بعدی به حالت تجربی و تئوری نزدیکتر است و از خطای کمتری برخوردار است.

• در حالت کلی بر اساس خطاهای به دست آمده مدل ۳ بعدی نتایج بهتری در مقایسه با مدل ۲ بعدی ارائه می‌دهد.

### فهرست علائم

$C_d$	ضریب درگ
$\rho_{fluid}$	دانشسته محیط تزریق ( $kg/m^3$ )
$\rho_{gas}$	دانشسته محیط تزریق ( $kg/m^3$ )
$A$	سطح مقطع تصویر شده یا عبور جریان ( $m^2$ )
$V_{fluid}$	سرعت سیال مایع (m/s)
$F_{aero}$	نیروی آئرو دینامیکی (N)
$\Delta p$	اختلاف فشار (Pa)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
$u_s$	سرعت چرخشی (m/s)
$u_r$	سرعت شعاعی (m/s)
$D_s$	قطر محفظه چرخش (m)
$D_p$	قطر روزنه ورودی به انژکتور (m)
$A_p$	سطح مقطع روزنه های ورودی به انژکتور ( $m^2$ )
$\mu$	ویسکوزیته سیال (Pa.s)
$h$	ضخامت لایه فیلمی در اوریفیس انژکتور (m)

### مراجع و منابع

[1] Lefebvre, A.H. and V.G. McDonell, Atomization and sprays. 2017: CRC press.  
 [2] Ommi, F., Space Rocket Propulsion & Engine. 2010: Best (in Persian).