مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 145-152

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی سه بعدی تزریق سوخت گاز با استفاده از کد عددی اصلاح‌شده کیوا

علی نصیری طوسی[1]*، حسین کشتکار[2]

1- استادیار، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، anasiri@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 خرداد 1396
پذیرش: 27 مرداد 1396
ارائه در سایت: 21 مهر 1396

کلید واژگان:
تزریق سوخت گازی
موتورهای احتراق داخلی
گاز طبیعی
کد عددی کیوا

چکیده

با توجه به کاهش روز افزون منابع سوخت‌های هیدروکربنی و همچنین افزایش آلایندگی حاصل از این دسته از سوخت‌ها، پژوهشگران تشویق شده‌اند تا به‌دنبال سوخت جایگزین باشند. سوخت گاز طبیعی به‌دلیل وجود منابع بزرگی از آن و نیز ارزانتر بودن آن از طرف دیگر و نیز میزان آلایندگی اشتعال کمتر آن نسبت به دیگر مشتقات نفتی، مورد توجه خودروسازان قرار گرفته است. شبیه‌سازی به پژوهشگران کمک می‌کند با صرف هزینه کمتر و در زمان کوتاه‌تر بتوانند عملکرد یک موتور را با سوخت گاز طبیعی مورد آزمایش قرار دهند. کیوا یکی از قوی‌ترین نرم افزارهای موجود در شبیه سازی موتور احتراق داخلی می‌باشد که هم در صنعت و هم نزد پژوهشگران شناخته شده و پرکاربرد است. اما نقطه ضعفی که کیوا دارد، آن است که کیوا قادر به شبیه سازی تزریق سوخت گاز نمی‌باشد و تنها سوخت مایع همچون بنزین و دیزل را می‌تواند به درستی شبیه‌سازی کند. در این پروژه یک زیر برنامه عددی تهیه و به کد عددی کیوا اضافه شد تا به کیوا قابلیت دهد تا سوخت گاز را همانند سوخت‌های مایع به صورت صحیح مدل‌سازی کند. برای اطمینان از صحت عملکرد کد تهیه شده، نتایج آن با دو نمونه نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و نشان داده شد که کد تهیه شده به خوبی می‌تواند فرآیند تزریق گاز را مدل‌سازی کند. در این تحقیق سوخت گازی متان در نظر گرفته شده است.

3-Dimentional Simulation of a gaseous injection by Using Modified KIVA-3V Code

Ali Nassiri Toosi*, Hossein Keshtkar

Department of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, anasiri@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 June 2017
Accepted 18 August 2017
Available Online 13 October 2017

Keywords:
Gaseous fuel injection
Internal combustion engines
Natural gas
KIVA-3V

ABSTRACT

With growing environmental pollution and concerns about fossil fuel depletion worldwide, there is an urgent need to find a solution for this problem. Using alternative fuels, such as natural gas which can burn much cleaner than petrol or gasoline and, has the added advantage of being much cheaper than other conventional fuels, and is more widely available than oil in our planet, is of major interest of automotive industry. The most effective way to utilize this alternative fuel in the common internal combustion engine is by means of direct injection technology. Before natural gas can be utilized in common automotive engines, it is necessary to conduct simulations and thus optimize these engines to maximize output power prior to being built. Optimizing engines can only be achieved through simulation. KIVA-3V is a well-accepted engine simulation tool, recognized by industrial users and researchers. KIVA-3V lacks the ability to simulate gaseous fuel injections as it is only designed to deal with liquid fuels. In this research, the governing equations on gas injections were searched and they were used to develop a numerical code for KIVA-3V to enable simulation of gaseous injections. The modified version of KIVA-3V was verified using two different sets of experimental data. It was shown that the modified KIVA-3V code can effectively simulate gaseous injections, producing very exact results. The gaseous fuel considered in this research was pure methane.

1- مقدمه

دست‌یابی به سوختی که بتواند توان بالا ایجاد کند و ضمن داشتن راندمان بالا همزمان میزان آلایندگی کم داشته باشد، همواره هدف پژوهشگران و پژوهشگران بوده است. همچنین قوانین سخت‌گیرانه‌ای تصویب شده است تا میزان مجاز آلایندگی تولید شده در موتورها را به حداقل‌هایی محدود کند. از سوی دیگر کاهش روز افزون منابع نفتی توجه پژوهشگران را به سمت سوختی فراوانتر و پایدارتر عطف داده است تا در صنعت خودرو مورد استفاده قرار گیرد. برای سالیان، پژوهشگران به‌عنوان سوخت جایگزین به گاز طبیعی نگاه کرده‌اند، چرا که گاز طبیعی به نسبت سوخت‌های بنزین و دیزل بسیار تمیزتر می‌سوزد و به‌دلیل فراوانی بیشتر نسبت به نفت، در بسیاری از کشورها گاز طبیعی از بنزین و دیزل ارزانتر و در دسترس‌تر است. برای استفاده از گاز طبیعی در موتور خودرو، روش‌های مختلفی وجود دارد، اما موثرترین آن‌ها تزریق مستقیم گاز طبیعی به داخل محفظه احتراق می‌باشد که تحقیقات زیادی در این خصوص در دست اجرا می‌باشد. شبیه‌سازی ابزار قدرتمندی در

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Nassiri Toosi, H. Keshtkar, 3-Dimentional Simulation of a gaseous injection by Using Modified KIVA-3V Code, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 145-152, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.33.1]

این تحقیقات است به نحوی که با شبیه‌سازی تزریق مستقیم سوخت گاز طبیعی، می‌توان نقاط قوت و ضعف این دسته از موتورها را شناسایی کرد و برای بهبود و افزایش راندمان آن‌ها تمهیدات لازم را در نظر گرفت. شبیه‌سازی صحیح تزریق گاز نیازمند درک کامل از پدیده تزریق گاز و همچنین آگاهی کامل از روابط حاکم بر تزریق گاز می‌باشد. برای این منظور باید این پدیده را به درستی درک کرد و تمامی معادلات حاکم را استخراج و سپس گسسته‌سازی نمود تا بتوان آن‌ها را در قالب یک کد عددی مورد استفاده قرار داد.

مدل‌سازی جریان سوخت‌های مایع به داخل سیلندر، به خودی‌خود پدیده‌ای پیچیده محسوب می‌شود. حال آن‌که بخواهیم سوخت گاز را تزریق کنیم، از پیچیدگی های خاص خود برخوردار است چرا که گازها در مقایسه با مایعات چگالی کمتری دارند، لذا وزن کم آن‌ها به هنگام تزریق شدن مومنتم کمتری برای سوخت گاز ایجاد می‌کند. مومنتم کمتر باعث می‌شود سوخت گاز از عمق نفوذ کمتری به نسبت سوخت‌های مایع برخوردار باشد [1].

برای دستیابی به عمق نفوذ بیشتر و ایجاد مخلوط مناسب سوخت و هوا، لازم است گاز طبیعی با فشارهای بسیار بالا تزریق شود. فشاری در حدود چند ده و یا حتی چند صد بار برای دستیابی به تزریق مناسب نیاز است. چنین فشار تزریق بالا می‌تواند میزان آشفتگی جریان ایجاد شده را نیز افزایش دهد که خود موجب می‌شود اختلاط سوخت و هوا بهتر صورت گیرد. اما دست یافتن به چنین فشارهای تزریق بالا، نیازمند مصالح و قطعات با مقاومت بسیار بالایی است، تا در شرایط فشار بالا بدون نقص عمل کند. تزریق با چنین فشارهایی موجب می‌شود جریان پس از تزریق شدن، دچار انبساط ناگهانی شود. یعنی سرعت جریان در مقطع خروجی انژکتور به سرعت صوت می‌رسد و ناگهان دچار موج‌های انبساطی می‌شود که از سرعت جریان می‌کاهد. طبیعت این شوک‌ها بر شکل جریان تزریق شده، میزان اختلاط انجام شده و همچنین عمق نفوذ تاثیر می‌گذارد. لذا برای یافتن عمق نفوذ و میزان اختلاط سوخت و هوا، لازم است این موج‌های انبساطی و شوک‌های حاصل به خوبی درک شوند [2].

آزمایش‌های متعددی توسط هو-آنگ و همکارانش انجام شده است که تاثیر سیستم تزریق مستمر گاز را با مشخصه‌های جریان تزریق شده و همچنین احتراق ایجاد شده در موتوری با سوخت گاز طبیعی مقایسه شده است [3-5]. فیلیپ هیل و پتریک اولت آشفتگی ناشی از تزریق گاز را بررسی و مطالعه کردند. سپس جت‌های آشفته تزریق شده را مدل‌سازی عددی نموده، و نتایج مدل‌سازی خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند نتایج مدل‌سازی آن‌ها با نتایج حاصل از آزمایش، از هم‌خوانی مطلوبی برخوردار است [6]. پیتیر ویتز پیرامون جت‌های توربولانس غیرقابل تراکم که به‌صورت ناگهانی تزریق می‌شوند تحقیقاتی انجام داد. با استفاده از معادلات پایه، او توانست به روابطی دست پیدا کند تا بتواند عمق نفوذ جت تزریق شده و همچنین سرعت جت تزریق شده را به خوبی تخمین بزند. سپس با استفاده از نتایج تجربی نشان داد که روابط دست‌یافته وی، می‌تواند با دقت قابل قبولی عمق نفوذ جت و سرعت جت را با دقت بالا محاسبه نماید [7].

برای درک بهتر از شکل جت، عمق نفوذ آن و میزان نفوذ آن، آندریاسی راهکارهایی پیشنهاد داد تا بتواند پدیده برخورد جت سوخت گازی را با سطح توجیه کند. برخورد جت تزریق شده با سطح اهمیت بالایی دارد، به خصوص در موتورهای تزریق مستقیم کوچک، چرا که ممکن است سوخت پس از پاشش، با سرسیلندر برخورد کند و به آن بچسبد و یا مسیر آن تغییر کند [8].

چیودی تاثیر روش‌های مختلف تزریق و همچنین نوع انژکتور و هندسه تاج پیستون را بر ترکیب مخلوط ایجاد شده در داخل یک موتور تزریق مستقیم پرخوران گاز طبیعی بررسی کرد. برای این بررسی، وی از نتایج آزمایشگاهی و همچنین نتایج محاسباتی به‌دست آورده استفاده کرد. چیودی ضمن گزارش نتایج خویش اعلام کرد که یکی از بارزترین نقاط ضعف تزریق مستقیم سوخت گاز متان، عمق نفوذ اندک این سوخت در مقایسه با سوخت‌های مایع است. آن‌ها تلاش کردند با ایجاد ترکیب‌های مختلف اختلاط از این مانع عبور کنند [1]. تلاش‌هایی توسط پژوهشگران صورت گرفته است تا با نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی[1] روش‌های موثر برای مدل سازی جریان‌های جت تزریق شده بیابند. تحقیقات گذشته در زمینه فیزیک پدیده تزریق مستقیم گاز طبیعی فعالیت داشته‌اند، و شرایط را برای ایجاد شبیه سازی‌هایی با دقت بالا فراهم کرده‌اند [10,9].

هدف در تحقیق حاضر، دستیابی به کد اصلاح شده از کد عددی کیوا می‌باشد که بتواند با دقت بالا پدیده تزریق یک سوخت گاز (متان) را شبیه‌سازی کند. کد عددی کیوا نرم‌افزار بسیار قدرت‌مند در زمینه شبیه‌سازی برای پروژه‌های صنعتی و یا تحقیقاتی است [11]. اما کد اصلی کیوا نمی‌تواند تزریق سوخت گاز را شبیه‌سازی کند، چرا که مدل عددی تزریق سوخت آن صرفا برای سوخت‌های مایع بوده و در شبیه‌سازی سوخت‌های گازی نتایج درستی را پیش‌بینی نمی‌نماید.

در ابتدا تئوری تزریق گاز و تمام معادلات حاکم مورد مطالعه قرار گرفت. سپس زیر برنامه‌ای به کد اصلی کیوا اضافه شد و معادلات حاکم بر تزریق گاز، ضمن گسسته‌سازی، مورد استفاده قرار گرفت. نهایتا به نسخه اصلاح شده‌ای از کد کیوا دست یافته شد که بتواند ضمن داشتن تمام قابلیت‌ها و توانایی‌های قبلی کد کیوا، تزریق سوخت‌های گازی را نیز شبیه‌سازی کند. برای صحت‌سنجی کد تهیه شده، دو مورد کاملا متفاوت که نتایج آزمایشگاهی آن‌ها در اختیار بود مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده، نشان داده شد که کد اصلاح شده کیوا می‌تواند نتایجی بسیار نزدیک به واقعیت تولید نماید.

2- معادلات حاکم

تزریق سوخت گاز، مانند متان، با تزریق سوخت‌ها مایع نظیر بنزین و یا دیزل تفاوت‌های اساسی دارد. سوخت‌های مایع پس از تزریق شدن دچار پدیده‌های اتمیزه شدن، تبخیر و برخورد می‌شوند. به این معنی که سوخت مایع پس از تزریق، به قطرات بسیار ریز تبدیل می‌شود (اتمیزه شدن) و قطره سوخت مایع به بخار تبدیل می‌شود (تبخیر شدن) و یا در اثر برخورد با هم قطره بزرگتری را تشکیل می‌دهند. اما برای تزریق سوختی مانند متان، لازم است به پدیده تزریق گاز توجه شود.

به صورت کلی، گاز تزریق شده را می‌توان به 3 ناحیه تقسیم بندی کرد. اولین ناحیه که از نقطه خروجی انژکتور شروع می‌شود، ناحیه مرکزی یا هسته پاشش نام دارد. سیال در این ناحیه از ذرات کروی شکل ریز تشکیل شده است. مرکز این ناحیه غیرلزج بوده و سرعت متوسط سیال در این ناحیه یکنواخت می‌باشد. ناحیه بعدی، ناحیه گذرا نام دارد. این ناحیه از انتهای ناحیه اول شروع شده و تا شروع ناحیه سوم (ناحیه کاملا توسعه یافته) ادامه پیدا می‌کند. بررسی ناحیه گذرا به‌دلیل طبیعت پدیده‌های بسیار پیچیده

[1] CFD

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.33.1]

داخل این ناحیه، امری بسیار مشکل و تقریبا ناممکن است. بدین جهت در شبیه‌سازی انجام شده، از وجود این ناحیه صرف‌نظر شده است و فرض شده است که ناحیه سوم بلافاصله بعد از ناحیه اول شکل می‌گیرد. صرف‌نظر کردن از ناحیه گذرا امری است که در گذشته نیز توسط پژوهشگران برای اجتناب از پیچیدگی غیرقابل حل بودن مسئله انجام می‌شده است، و همچنین نشان داده شده است که در نظر نگرفتن این ناحیه بر نتایج کلی تاثیر بسیار ناچیزی می‌گذارد [13,12].

ناحیه سوم که ناحیه کاملا توسعه یافته نام دارد، معمولا به عنوان جریان ماحصل از چشمه نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود، که موقعیت چشمه نقطه‌ای مجازی در خروجی نازل قرار دارد [7]. در "شکل 1" نواحی تشکیل شده در خروجی نازل انژکتور نشان داده شده است که در آن r_j شعاع نازل انژکتور، x_c طول ناحیه اولیه و $r_{.5}$ مقیاس طولی توربولانس می باشد.

برای هر دو ناحیه اولیه و ثانویه، معادلات حاکم جداگانه در نظر گرفته شده است. مرز تفاوت بین این دو ناحیه، طول ناحیه اولیه در نظر گرفته شده است که این چنین تعریف می‌شود:

$$x_c = 12.5 r_j \tag{1}$$

برای هر نقطه‌ای که $x > x_c$ باشد آن نقطه در ناحیه کاملا توسعه یافته قرار دارد و هر نقطه‌ای که $x < x_c$ باشد، آن نقطه داخل ناحیه اولیه قرار دارد.

برای ناحیه اولیه، از معادلات زیر استفاده شده است:

$$\acute{u}_{\text{initial}} = 0.12 \times V_{\text{inj}} \tag{2}$$

$$TKE_{\text{initial}} = 1.5 \times \acute{u}^2_{\text{initial}} \tag{3}$$

$$TLS_{\text{initial}} = r_j \tag{4}$$

$$EPS_{\text{initial}} = \text{cmueps} \times \frac{TKE^{1.5}_{\text{initial}}}{TLS_{\text{initial}}} \tag{5}$$

که در آن‌ها،

$\acute{u}_{\text{initial}}$: شدت توربولانس در ناحیه اولیه

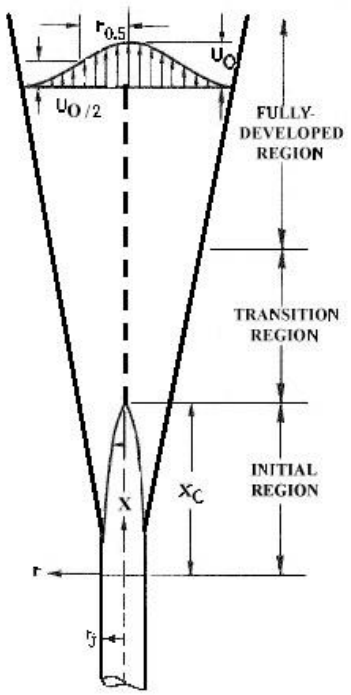

Fig. 1 Graphical representation of jet injection showing the initial, transient and fully developed region [7]

شکل 1 شماتیک جت تزریق شده و مشخص کردن ناحیه‌های اولیه، گذرا و کاملا توسعه یافته [7]

V_{inj}: سرعت تزریق گاز

TKE_{initial}: انرژی جنبشی توربولانس در ناحیه اولیه

TLS_{initial}: مقیاس طولی توربولانس در ناحیه اولیه

EPS_{initial}: نرخ پراکندگی انرژی جنبشی توربولانس در ناحیه اولیه

cmueps = 0.25

و برای ناحیه کاملا توسعه یافته، از معادلات زیر استفاده شده است:

$$\acute{u}_{\text{jet}} = 0.2 \times u_c \tag{6}$$

$$TKE_{\text{jet}} = 1.5 \times \acute{u}^2_{\text{jet}} \tag{7}$$

$$TLS_{\text{jet}} = r_{.5} \tag{8}$$

$$r_{.5} = 1.18 \frac{r_j U_j}{U_0} \tag{9}$$

$$u_0 = u_j \left[1.63\, k \frac{(x - x_c)}{r_j} + 1.0\right]^{-1} \tag{10}$$

$$EPS_{\text{jet}} = \text{cmueps} \times \frac{TKE^{1.5}_{\text{jet}}}{TLS_{\text{jet}}} \tag{11}$$

که u_c سرعت محاسبه شده در هر گره و x_c طول محوری از نوک نازل انژکتور است. همچنان مقدار cmueps مشابه قبل، عدد 0.25 است.

3- اعتباردهی به نتایج

برای اعتباردهی و اصمینان از عملکرد صحیح کد کیوای اصلاح شده، دو مورد کاملا متفاوت که نتایج آزمایشگاهی آن‌ها در دسترس بود مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. هر یک از موارد به دو روش به نام‌های روش اول و روش دوم شبیه‌سازی شدند. در روش اول، از کد اصلی کیوا استفاده شد و بدون آن‌که از مدل عددی انژکتور استفاده شود با تعریف استوانه کوچکی در محل تزریق سوخت و تعریف آن به‌عنوان پورت ورودی اقدام به شبیه‌سازی تزریق گاز شد. در واقع استوانه کوچک نقش نازل را ایفا نموده و با اعمال شرایط مرزی انژکتور (سوخت گاز به‌عنوان سیال ورودی، فشار و دمای گاز در بالا دست) اقدام به شبیه‌سازی شد. دلیل انجام این فرض، عدم توانایی کد اصلی کیوا در تزریق سوخت گاز با استفاده از مدل انژکتور موجود در کد اصلی کیوا است، لذا برای مدل کردن تزریق گاز توسط کد اصلی کیوا نیاز به اعمال تمهیدات در نظر گرفته در بالا بود تا بتوان تزریق گاز را شبیه‌سازی نمود. فشار، دما و گاز داخل استوانه اصلی مطابق شرایط ذکر شده در آزمایشات تجربی در نظر گرفته شد. در روش دوم، از کد اصلاح شده کیوا استفاده شد، و برای مدل‌سازی تزریق گاز از مدل عددی انژکتور استفاده شد و طبیعتا در این روش نیازی به تعریف فیزیکی انژکتور نبود و استوانه کوچک (نازل) از هندسه حذف شد. در این روش، طبق پروفیل فشار تعیین شده، انژکتور سوخت متان را با همان شرایط آزمایشگاهی (فشار، دما، چگالی) به داخل محفظه تزریق می کند. با مقایسه نتایج حاصل از روش دوم با یافته‌های دست یافته از روش اول و نتایج آزمایشگاهی مربوطه، می‌توان چگونگی عملکرد کد عددی انژکتور تهیه شده بررسی نمود.

3-1- مورد اول

برای بررسی مورد اول، از آزمایش صورت گرفته در مرجع [6] و نتایج گزارش شده آن استفاده شد. در این کار آزمایشگاهی از محفظه استوانه‌ای شکل با شعاع 20 میلی‌متر و ارتفاع 90 میلی‌متر استفاده شده است. در ابتدا این استوانه از هوا پر شده است و انژکتور از مرکز سطح فوقانی به داخل محفظه اصلی سوخت گاز را به صورت عمودی تزریق می‌کند (شکل 2). شرایط مرزی این مورد در جدول 1 آمده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.33.1]

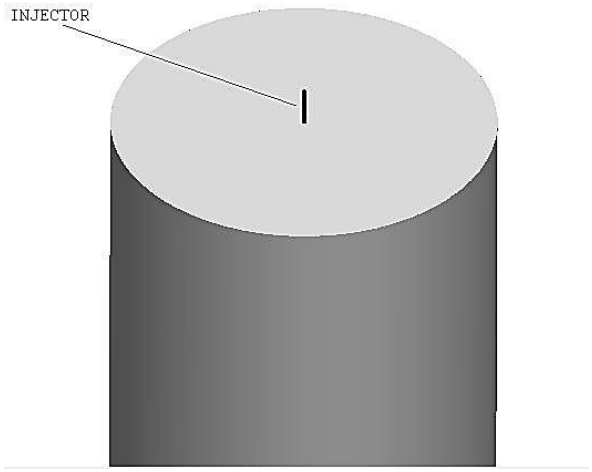

Fig. 2 Geometry and injector location in the first simulation case

شکل 2 هندسه مورد استفاده و محل قرارگیری انژکتور در مورد شبیه سازی اول

Table 1 Boundary condition for the first case

جدول 1 شرایط اولیه شبیه سازی مورد اول

ابعاد محفظه	طول = 90mm
	شعاع = 20mm
فشار و دمای تزریق	P_{inj}= 15MPa T_{inj}= 350K
فشار و دمای اولیه محفظه	$P_{ichamber}$= 5 MPa $T_{ichamber}$= 850K
دمای دیواره	T_{wall}= 450K
قطر نازل انژکتور	d_{noz}= 0.5mm
کل جرم سوخت تزریق شده	3.5mg

برای ایجاد شبکه موردنیاز، از دو اندازه متفاوت استفاده شد. در مجاورت و نزدیک به محل تزریق گاز که مستقیم زیر انژکتور می‌باشد، از المان‌هایی با ابعاد 0.05 میلی‌متر مکعب استفاده شد. برای نواحی دور از انژکتور که انتظار می‌رود تاثیر ناچیزی از فرایند تزریق تجربه کنند، از المان‌های درشت‌تری به ابعاد 0.2 میلی‌متر استفاده شد تا زمان موردنیاز برای انجام محاسبات کاهش یابد. در این شرایط، تعداد سلول‌های ایجاد شده 175635 عدد بود. به‌منظور تولید شبکه در این پروژه، از نرم‌افزار انسیس آیسم[1] استفاده شد و برای تمام المان‌های ایجاد شده ساختار منظم حجمی[2] استفاده شد.

در روش اول از این مورد، از استوانه کوچکی به قطر 0.5 میلی‌متر و ارتفاع 10 میلی‌متر استفاده شد تا نقش نازل انژکتور را انجام دهد. لازم به ذکر است برای این منظور در این روش، از کد اصلی کیوا استفاده شد. شرایط مرزی ورودی استوانه کوچک، گاز متان در دمای 350K و فشار 15MPa می‌باشد، که با شروع تزریق، ناگهان گاز پس از عبور از استوانه کوچک وارد محفظه اصلی می‌شود. با توجه به تست های آزمایشگاهی، کل زمان شبیه سازی تزریق گاز، 1ms در نظر گرفته شد.

3-2- مورد دوم

در مورد دوم، به استناد نتایج آزمایشگاهی چیودی شبکه‌ای ایجاد شد که از نظر هندسه و شرایط اولیه مرزی مطابق گزارشات تست‌های آزمایشگاهی بود [1]. در این آزمایشات یک محفظه مکعب شکل به ابعاد 200 میلی‌متر وجود دارد که در ابتدا حاوی هوا است (شکل 3). شرایط اولیه در جدول 2 ارائه شده است. در این مورد نیز گاز تزریق شده متان خالص است. در ابتدا طبق روش 1، استوانه کوچکی به قطر 0.5 میلی‌متر و ارتفاع 10 میلی‌متر ایجاد شد که در نقش نازل انژکتور عمل تزریق را انجام می‌داد. این استوانه در مرکز سطح فوقانی قرار داشت و تزریق گاز به داخل محفظه از طریق این استوانه صورت می‌گرفت (شکل 3). در زمان تزریق، فشار گاز ورودی (متان) به استوانه کوچک در ابتدا 8MPa بود. با شروع تزریق، گاز متان از طریق این استوانه به محفظه اصلی جاری شده و عملکردی مشابه عملکرد انژکتور را شبیه‌سازی می‌نماید. مجددا یادآوری می‌شود که در روش اول، از کد اصلی کیوا (بدون تغییرات) استفاده شد. مدت زمان تزریق گاز در این مورد، 1ms طبق گزارش شرایط تست آزمایشگاهی است، و در مجموع میزان 0.27mg سوخت در این مدت تزریق می‌گردد.

در روش دوم این مورد، برای شبیه‌سازی از کد اصلاح شده کیوا استفاده شد و برای شبیه‌سازی پاشش سوخت گاز از مدل توسعه داده شده استفاده شد. تمامی شرایط دیگر شبیه‌سازی، اعم از فشار تزریق، دمای گاز، دمای اولیه گاز داخل سیلندر، قطر انژکتور و غیره مشابه روش اول و مطابق گزارشات کار آزمایشگاهی گزارش شده بود. برای این مورد نیز در مجاورت محل پاشش از شبکه‌های کوچک (المان‌هایی به ابعاد 0.05mm) استفاده شد و برای سایر نواحی، دور از ناحیه پاشش، از شبکه‌های بزرگتر (المان‌هایی با ابعاد 0.5mm) استفاده شد (شکل 4). در ایجاد شبکه موردنیاز، از تعداد 352856 سلول استفاده شد.

4- استقلال از شبکه

برای اطمینان از ابعاد صحیح و مناسب المان‌ها استفاده شده در ایجاد شبکه، موضوع استقلال نتایج از ابعاد شبکه در ابتدا بررسی گردید. برای این امر، برای هر دو مورد، ابتدا در مجاورت و نزدیک به محل تزریق گاز که مستقیم زیر انژکتور می‌باشد، از المان‌هایی با ابعاد 0.05 میلی‌متر و برای نواحی دور از

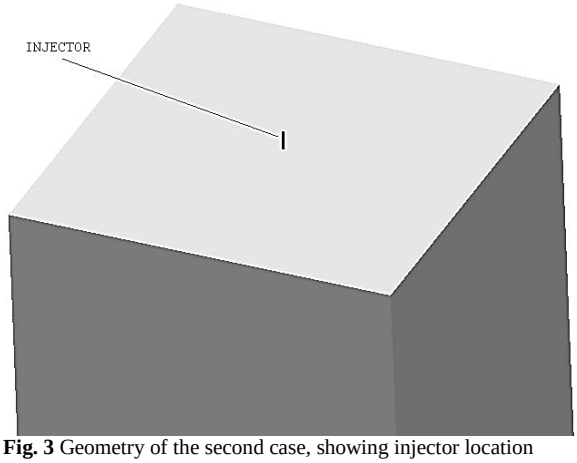

Fig. 3 Geometry of the second case, showing injector location

شکل 3 هندسه مورد دوم و محل قرار گیری انژکتور در مدل دوم

Table 2 Boundary condition for the second case

جدول 2 شرایط اولیه شبیه‌سازی مورد دوم

فشار تزریق	8bar
فشار اولیه محفظه	1bar
دمای اولیه محفظه	300K
مدت زمان تزریق	1ms
دبی جرمی تزریق شده	270mg/s

[1] ANSYS ICEM
[2] Structured Volumetric Mesh grids

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.33.1]

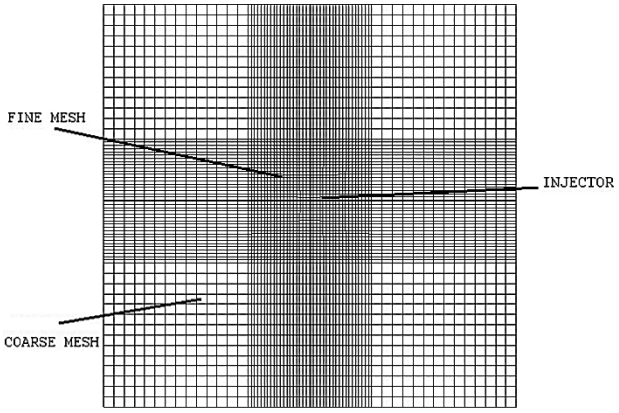

Fig. 4 Screenshot of the mesh grids generated, showing the fine and coarse mesh areas along with injector location

شکل 4 هندسه شبکه‌بندی شده، شبکه ریز و درشت و محل قرارگیری انژکتور

انژکتور که تاثیر ناچیزی از فرایند تزریق را تجربه می‌کنند، از المان‌های درشت‌تری به ابعاد 0.2 میلی‌متر استفاده شد. سپس المان‌های در مجاورت ناحیه پاشش به 0.03 میلی‌متر کاهش داده شد و شبیه‌سازی تکرار شد. با کاهش اندازه المان‌ها، تعداد سلول‌ها در مورد اول از 175635 به 341505 سلول و در مورد دوم از 352856 به 857281 سلول افزایش یافت. با مقایسه نتایج حاصل شده، مشاهده گردید که تفاوت بسیار ناچیز و قابل اغماضی بین نتایج حاصل شده وجود دارد. از این بررسی نتیجه گرفته شد که با کوچکتر کردن سلول‌ها، تنها حجم محاسبات و زمان موردنیاز برای شبیه‌سازی بیشتر خواهد شد در حالی که بر دقت یافته‌ها نمی‌افزاید (شکل‌های 5 و 6).

در "شکل 5 و 6" مشاهده می‌شود که با کوچکتر کردن ابعاد المان‌ها، میزان عمق نفوذ محاسبه شده در شبیه‌سازی صورت گرفته تغییر محسوس ندارد. می‌توان ادعا کرد کوچک کردن المان‌ها هیچ تاثیری روی نتایج نخواهد گذاشت و ابعاد المان‌های انتخاب شده کاملا برای انجام این شبیه‌سازی مناسب هستند.

4- نتایج

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، برای هر مورد، به دو روش مدل‌سازی انجام گرفت. عمق نفوذ گاز برای هر دو روش محاسبه گردید و با داده‌های آزمایشگاهی مربوطه مقایسه گردید. منظور از عمق نفوذ گاز، فاصله نوک

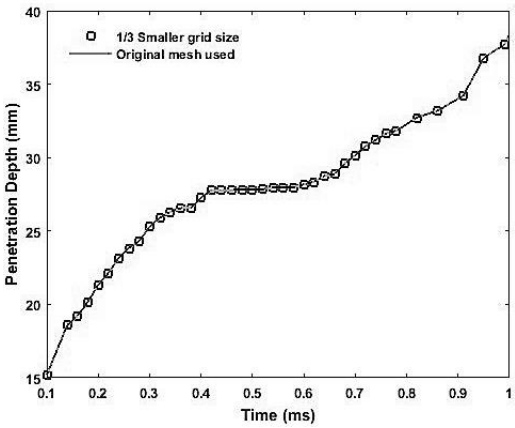

Fig. 5 Mesh independency check for first simulation case

شکل 5 بررسی استقلال از شبکه برای مورد اول

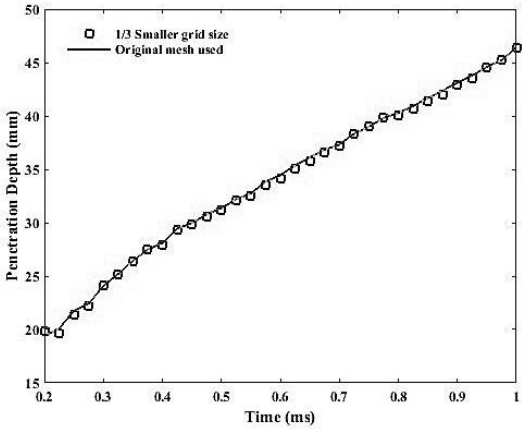

Fig. 6 Mesh independency check for second simulation case

شکل 6 بررسی استقلال از شبکه برای مورد دوم

انژکتور با نقطه‌ای از جبهه جلوی جت تزریق شده است که نسبت جرمی سوخت در آن نقطه 5٪ باشد. به عبارت دیگر، عمق نفوذ عمقی از گاز است که داخل آن نسبت جرم سوخت به هوا بیش از 5٪ باشد (جت سوخت تزریق شده تا 95٪ رقیق شده باشد) و در فواصله بیشتر از عمق نفوذ میزان نسبت سوخت به هوا کمتر از 5٪ می‌شود.

برای مورد اول، همان‌طور که در "شکل 9" مشخص است، هرچند روش اول با دقت قابل قبولی عمق نفوذ را محاسبه می‌کند، اما مشخصا روش دوم می‌تواند با دقت بیشتری عمق نفوذ را محاسبه کند. با مقایسه نتایج محاسباتی عمق نفوذ گاز متان با نتایج آزمایشگاهی، نشان دادیم که مدل ایجاد شده از دقت خوبی برخوردار است.

طبق قوانین مربوط به دینامیک گازها، به هنگام عبور سیال با سرعت بالا از داخل یک استوانه یا لوله، جریان ممکن است دچار خفگی شود. خفگی به این معنی است که سرعت جریان داخل استوانه به سرعت صوت (ماخ 1) می‌رسد و دیگر با افزایش فشار تزریق، سرعت افزایش بیشتری تجربه نمی‌کند. هنگامی که داخل استوانه پدیده خفگی اتفاق می‌افتد، سرعت سیال بلافاصله بعد از تزریق شدن به سرعت‌های مافوق صوت می‌رسد. همچنین انتظار می‌رود انبساط ناگهانی جریان پس از تزریق شدن را شاهد بود [6]. بدین معنی که جریان بلافاصله پس از تزریق شدن موج‌های انبساطی را تجربه خواهد کرد و در این مقطع سرعت جریان به بیش از سرعت صوت (ماخ‌های بیشتر از 1) می‌رسد. این موج‌های انبساطی شوک‌های به اصطلاح بشکه‌ای بوجود می‌آورند و پیرو آن شوک ماخ شکل می‌گیرد (دیسک ماخ). این امر باعث می‌شود سرعت جریان به ناگهانی به سرعت‌های مادون صوت (ماخ کمتر از 1) برسد، شماتیک این پدیده در "شکل 7" نشان داده شده است.

همچنین با توجه به تئوری توضیح داده شده، که توسط برومند و یداللهی تایید شده است (قسمت '1' شکل 8)، در شبیه‌سازی صورت گرفته در این تحقیق نیز شاهد بروز چنین پدیده ای می‌باشیم.

"شکل 8" کانتور ماخ جریان در خروجی انژکتور را نشان می‌دهد. در این شکل نتایج سه کار تحقیقاتی نشان داده شده است که قسمت '1' نتایج به‌دست آمده در تحقیق برومند و یداللهی است [9]. در قسمت‌های '2' و '3' این شکل، نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته در این تحقیق به دو روش توضیح داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در قسمت '2' که متعلق به روش اول است، استوانه کوچکی به عنوان نازل انژکتور وجود دارد که از طریق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.33.1]

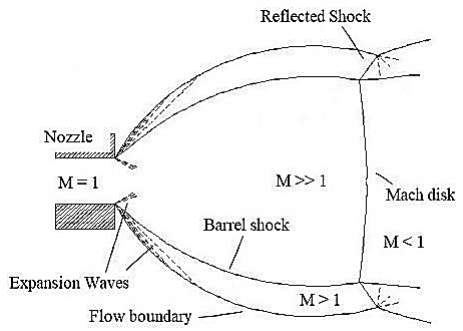

Fig. 7 Graphical demonstration of under expanded flow and supersonic speeds produced [7]

شکل 7 شماتیک انبساط ناگهانی جریان پس از تزریق و ایجاد شدن سرعت‌های مافوق صوت [7]

آن تزریق گاز صورت می‌گیرد. در قسمت '3' که متعلق به روش دوم است، از مدل عددی انژکتور برای شبیه سازی تزریق سوخت گاز استفاده شده است و نازل به شکل فیزیکی آن وجود ندارد.

با دقت در "شکل 8"، در می‌یابیم که در هر 3 قسمت نشان داده شده جت پس از تزریق شدن در فاصله کوتاهی از انژکتور منبسط می‌شود. همچنین سرعت جت پس از تزریق به شدت افزایش می‌یابد (قسمت‌های پررنگ در شکل 8) و در تمامی شکل‌ها به حدود ماخ 3.25 می‌رسد. محدوده‌ای که سرعت سیال به این حد می‌رسد برای هر 3 قسمت "شکل 8" تقریبا در یک فاصله از محل انژکتور قرار دارد، و با توجه به تغییر رنگ کانتورهای سرعت متوجه می‌شویم تغییرات سرعت از لحظه تزریق به بعد نیز رفتاری بسیار مشابه در هر 3 قسمت "شکل 8" نشان می‌دهد. قابل رویت است بعد از رسیدن سرعت جریان به مافوق صوت، طی شوک ماخ که پیشتر توضیح داده شد، سرعت جریان ناگهانی افت پیدا می‌کند و به سرعت‌های مادون صوت می‌رسد. این پدیده نیز در هر 3 قسمت "شکل 8" قابل مشاهده است، که پس از ناحیه پررنگ که نشاندهنده سرعت‌های مافوق صوت است، شاهد ناحیه‌ای به رنگ روشن‌تر هستیم که سرعت‌های مادون صوت را نشان می‌دهد. محل بروز این تغییرات سرعت در هر 3 شکل تقریبا یکسان است. همچنین برای قسمت‌های 1 و 2 که سیال از داخل استوانه وارد محیط می‌شود، با توجه به رنگ کانتورهای ماخ مشاهده می‌شود سرعت جریان داخل استوانه به ماخ 1 رسیده است. این بیانگر بروز پدیده خفگی داخل استوانه است، که جریان را مجاب می‌کند بدون افزایش سرعت، با همان ماخ 1 ادامه پیدا کند و پس از خروج جریان از استوانه، سریعا سیال شتاب می‌گیرد و به سرعت مافوق صوت می‌رسد. با توجه به "شکل 7" نیز می‌توان دریافت که اگر سرعت جریان داخل استوانه به ماخ 1 رسیده باشد، جریان دچار خفگی شده است و پس از خروج از استوانه، همانطور که شماتیکی نشان داده شده است، جریان دچار موج‌های انبساطی می‌شود و در فاصله کوتاهی شتاب می‌گیرد تا سرعت جت تزریق شده به بیش از سرعت صوت برسد. سپس بدلیل وجود شوک ماخ، سرعت جریان فورا کاهش پیدا کرده و به سرعت‌های مادون صوت می‌رسد. در هر 3 قسمت "شکل 8" شاهد پدیده‌ای هستیم که قبل‌تر در "شکل 7" درباره تئوری آن توضیح داده شده بود.

با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مورد اول (هر دو روش) و مقایسه آن‌ها با نتایج حاصل از آزمایش انجام شده توسط اولت [6]، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو روش شبیه‌سازی قادر هستند نتایج مطلوب و نزدیک به واقعیت را تولید کنند (شکل 9).

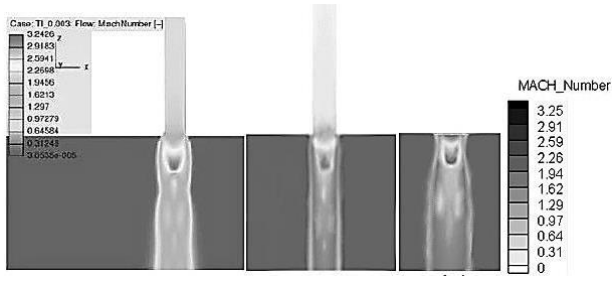

Fig. 8 Velocity contours of injected jet and displaying flow Mach number. '1' simulation results of Broomand & Yaddollahi [9], '2' simulation results of our first method, '3' simulation results of second method

شکل 8 پروفیل سرعت جت تزریق شده و مشخص کردن عدد ماخ جریان. '1' مربوط به یافته‌های برومند و یداللهی [9]، '2' مربوط به روش اول این پژوهش. '3' مربوط به روش دوم این پژوهش

اما در روش دوم، که از مدل عددی انژکتور استفاده شده است، نتایج به‌دست آمده به داده‌های آزمایشگاهی بسیار نزدیکتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش دوم، که از کد اصلاح شده کیوا استفاده شده است، به‌دلیل استفاده از مدل عددی مناسب و دقیق، می‌توان موثرتر و با کیفیت‌تر از روش اول که از کد اصلی کیوا بهره می‌برد، تزریق گاز را شبیه‌سازی نمود. در "شکل 9" مشاهده می‌شود هرچند در لحظه‌های اولیه تزریق سوخت (از لحظه شروع پاشش تا حدود 0.23ms) نتایج روش اول کمی بهتر از روش دوم و به نتایج تجربی نزدیک‌تر هستند. اما از زمان حدودا 0.3ms تا 0.6ms مشاهده می‌شود که هر دو روش با توجه به نتایج آزمایشگاهی، دقت مشابه و بسیار دقیقی دارند. طوری که حتی در بسیاری از نقاط نتایج هر دو روش منطبق بر داده‌های آزمایشگاهی هستند. اما از حدود لحظه 0.6ms به بعد، مشاهده می‌شود که نتایج روش اول از داده‌های آزمایشگاهی فاصله می‌گیرد. به‌طوری که هرچه زمان بیشتر می‌گذرد، اختلاف عمق نفوذ محاسبه شده در روش اول با داده‌های واقعی بیشتر می‌شود و در پایان شبیه‌سازی این اختلاف به 2.4mm نیز می‌رسد. در حالی که روش اول نتایجی نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی تولید کرده است، مشاهده می‌شود که روش دوم و داده‌های آزمایشگاهی تقریبا منطبق بر یکدیگر هستند. در پایان زمان 1ms شبیه‌سازی، مشاهده شد که طبق داده‌های آزمایشگاهی عمق نفوذ 44.3mm بوده و نتایج روش دوم در پایان شبیه سازی عمق نفوذ را 44.4mm محاسبه نموده است. در حالی که نتایج روش اول عمق نفوذی در حدود 46.7mm می‌باشد. هرچند در بازه زمانی شبیه‌سازی انجام شده، شاید نتایج هر دو روش نزدیک به‌هم به نظر برسند، اما با توجه به رفتار نمودار مشخص است در فواصل زمانی بیشتر این اختلاف محسوس‌تر می‌شود و تفاوت روش 1 و 2 مهم‌تر و قابل لمس‌تر می‌شود.

در خصوص مورد دوم، نتایج هر دو روش اول و دوم با داده‌ها آزمایشگاهی چیودی [1] مقایسه گردید. "شکل 10" بیانگر مقایسه صورت گرفته می‌باشد.

همان‌طوری‌که از "شکل 10" می‌توان نتیجه گرفت، هر دو روش می‌توانند نتایج نزدیک به نتایج تجربی تولید کنند، اما روش دوم می‌تواند با دقتی بهتر و نزدیک‌تر تزریق گاز را مدل کند. لذا مدل عددی تزریق گاز تهیه شده در این تحقیق و کد اصلاح شده کیوا، می‌توانند به طور موثر با شبیه سازی صحیح انژکتور برای تزریق گاز، نتایج مطلوبی را تولید نمایند. با توجه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.33.1]

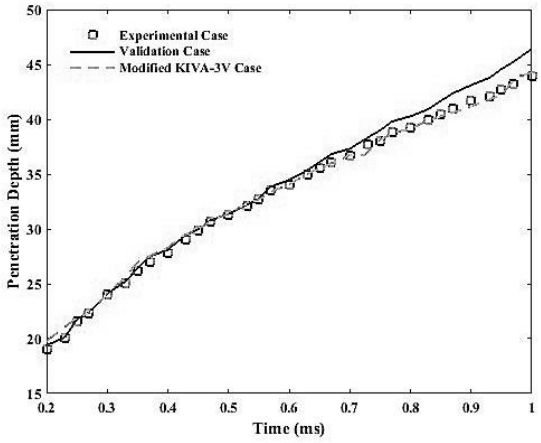

Fig. 9 comparing our first and second method penetration depth results against experimental results of Ouellette [6]

شکل 9 مقایسه عمق نفوذ محاسبه شده در روش 1 و 2، و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی اولت[6]

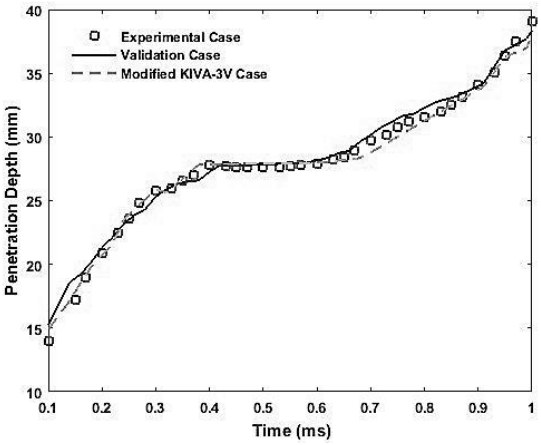

Fig. 10 comparing our first and second method penetration depth results against experimental results of Chiodi [1]

شکل 10 مقایسه عمق نفوذ محاسبه شده در روش 1 و 2، و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی چیودی [1]

به "شکل 10"، از زمان 0.1ms تا 0.2ms مشاهده می‌شود روش دوم به داده-های تجربی نزدیک‌تر است

برای نمونه، در لحظه t=0.16ms نتایج عمق نفوذ آزمایشگاهی و روش دوم به ترتیب 16.4mm و 16.5mm بوده در حالی که روش اول عمق نفوذی بیش از 17.4mm پیش‌بینی می‌نماید، هرچند از زمان 0.2ms پس از شروع تزریق تا لحظه 0.6ms هر دو روش تقریبا با داده‌های آزمایشگاهی منطبق هستند. از لحظه 0.6ms تا 0.9ms شاهد فاصله گرفتن نتایج روش اول از داده‌های آزمایشگاهی هستیم، و در انتها، هر دو روش عمق نفوذ تقریبا مشابهی گزارش کرده‌اند. اما با توجه به روند تغییرات کلی این نمودار، متوجه می‌شویم که نتایج روش دوم به داده‌های تجربی بسیار نزدیک‌تر است در حالی که روش اول در بسیاری از نقاط از داده‌های آزمایشگاهی فاصله گرفته است.

5- جمع‌بندی

در این پژوهش تئوری تزریق گاز مورد مطالعه قرار گرفت و معادلات حاکم بر این پدیده شناسایی شد. سپس با توجه به معادلات حاکم، روابطی استخراج شد تا بتوان پدیده تزریق سوخت گاز توسط یک انژکتور را مدل نمود. سپس روابط بدست آمده گسسته سازی شد تا بتوان به زبان برنامه نویسی و مطابق الزامات کد کیوا، به شکل کد عددی مدل را تدوین کرد و آن را در متن اصلی برنامه کیوا قرار داد.

برای اعتباردهی و اطمینان از عملکرد صحیح کد تهیه شده، دو مورد کاملا متفاوت که نتایج آزمایشگاهی آن موجود بود مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور برای هریک از موارد، هندسه و شبکه مدل و تمامی شرایط مرزی تزریق همانند آن‌چه در کار تجربی بود تنظیم و در نظر گرفته شد. همچنین برای هر مورد، به دو روش شبیه‌سازی انجام گرفت. در روش اول، با استفاده از کد اصلی کیوا، از استوانه کوچکی (در قالب پورت ورودی) که رفتار انژکتور را مدل می‌کرد استفاده شد و عملا از مدل عددی انژکتور استفاده نشد. سپس در روش دوم، از مدل عددی انژکتور استفاده شد و عملا هندسه انژکتور و دیگر نماد فیزیکی انژکتور حذف شد. در این روش با استفاده از کد اصلاح شده کیوا تزریق گاز شبیه‌سازی شد. درنهایت نتیجه‌گیری شد که شبیه‌سازی صورت گرفته در روش دوم، که از کد اصلاح شده کیوا استفاده شده است می‌تواند با دقت بیشتری عمق نفوذ گاز متان را محاسبه کند. در این پروژه مشاهده شد در هر دو روش انجام شده، نتایج به‌دست آمده به نتایج تجربی بسیار نزدیک هستند، اما نتایج روش دوم به نتایج تجربی بسیار نزدیکتر است. هرچند در این پژوهش، تنها به مدل‌سازی تزریق سوخت متان پرداخته شد، اما به‌دلیل کلی بودن معادلات و کد نوشته شده، می‌توان ادعا کرد که کد اصلاح شده می‌تواند تزریق هر نوع سوخت گازی را شبیه‌سازی نماید. این امر توانایی نرم‌افزار محبوب کیوا را گسترش می‌دهد، و علاوه بر تمام توانایی‌های پیشین کیوا، قابلیت مدل‌سازی تزریق گازا نیز به این برنامه اضافه می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که پروفیل سرعت جریان پس از تزریق شدن در شبیه‌سازی صورت گرفته، تطابق مناسبی با یافته‌های برومند و یداللهی [9] و همچنین تئوری‌های موجود [6] دارد. لذا می‌توان ادعا نمود که کد عددی تهیه شده می‌تواند پدیده موج‌های انبساطی و شوک‌های ایجاد شده را نیز در نظر بگیرد و در محاسبات انجام شده لحاظ کند.

6- فهرست علایم

bar	فشار ($kg(cm)^{-2}$)
EPS	نرخ نفوذ انرژی جنبشی توربولانس
Pa	فشار ($kg(m)^{-2}$)
r	شعاع (mm)
T	دما (K)
TKE	انرژی جنبشی توربولانس (اغتشاش)
TLS	مقیاس طولی توربولانس
U & V	سرعت (ms^{-1})
X	فاصله (mm)

7- مراجع

[1] M. Chiodi, H. J. Berner, M. Bargende, Investigation on different injection strategies in a direct-injection turbocharged cng-en*gine*, *SAE Paper* 2006-1-3000, 2006.

[2] Y. Li, A. Kirkpatrick, C. Mitchell, B. Willson, Characteristic and computational fluid dynamics modeling of high-pressure gas jet injection, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *Transactions of the ASME*, Vol. 126, pp. 192-197, 2004.

[3] Z. Huang, S.Shiga, T.Ueda, H. Makamura et al., Basic characteristics of direct injection combustion fuelled with compressed natural gas and gasoline using a rapid compression machine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*; 2003; 217, 11; ProQuest Science Journals pp. 1031-1038.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.33.1]

[4] Z. Huang, S.Shiga, T.Ueda, H. Nakamura et al., Correlation of ignitability with injection timing for direct injection combustion fuelled with compressed natural gas and gasoline, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 217, No.6, pp. 499-506, 2003.

[5] Z. Huang, S.Shiga, T.Ueda, H. Nakamura et al., Visualization study of natural gas direct injection combustion, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*,Vol. 217, No. 8, pp.667-673,2003.

[6] P. H. P. G. Ouellette, *Turbulent transient gas injections, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 4, No. 122, pp. 743-753, 2000.

[7] P. O. Witze, The impulsively started incompressible turbulent jet, *Sandia Laboratories Energy Report SAND80-8617*, pp. 5-16, 1980.

[8] L. Andreassi, A. L. Facci, V. K. Krastev, S. Ubertini, Multidimensional modeling of gaseous injection: analysis of an impinging jet, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 5, No. 31, pp. 909-915, 2010.

[9] M. B. Bijan Yadollahi, Numerical investigation of natural gas direct injection, Thermal Science, Vol. 18, No. 1, pp. 39-52, 2014.

[10] S. P. Mingi Choi, Modeling of cng direct injection using gaseous sphere injection model, *Journal of Ilass-Korea*, Vol. 21, No. 1, pp. 47-52, 2016.

[11] A. A. Amsden, *KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries*, Los Alamos national laboratory Report LA-12503-MS, New Mexico, 1993.

[12] H. Fujimoto, G. Hyun, M. Nogami, K. Hirakawa, T. Asai, J. Senda, Characteristics of free and impinging gas jets by means of image processing, *SAE Technical Paper 970045*, 1997.

[13] P. Ouellette, P. G. Hill, Visualization of natural gas injection for a compression ignition engine, *SAE Technical Paper 921555*, 1992.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.33.1]