



مدل سازی سه بعدی تزریق سوخت گاز با استفاده از کد عددی اصلاح شده کیوا

علی نصیری طوسی^{1*}، حسین کشتکار²

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

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، 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 آلاینده‌گی حاصل از این دسته از سوخت‌ها، پژوهشگران تشویق شده‌اند تا به دنبال سوخت جایگزین باشند. سوخت گاز طبیعی به دلیل وجود منابع بزرگی از آن و نیز ارزانتر بودن آن از طرف دیگر و نیز میزان آلاینده‌گی 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-Dimensional 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

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 به دلیل 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

دست‌یابی به سوختی که بتواند توان بالا ایجاد کند و ضمن داشتن راندمان بالا همزمان میزان آلاینده‌گی کم داشته باشد، همواره هدف پژوهشگران و پژوهشگران بوده است. همچنین قوانین سخت‌گیرانه‌ای تصویب شده است تا میزان مجاز آلاینده‌گی تولید شده در موتورهای 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

Please cite this article using:

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

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پاشش، با سرسیلندر برخورد کند و به آن بچسبد و یا مسیر آن تغییر کند [8].

چپودی تاثیر روش های 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 به دست آورده استفاده کرد. چپودی 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 سوخت های مایع است. آن ها تلاش کردند با ایجاد ترکیب های مختلف اختلاط از این مانع عبور کنند [1]. تلاش هایی توسط پژوهشگران صورت گرفته است تا با نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی¹ روش های موثر برای مدل سازی جریان های جت تزریق شده بیانند. تحقیقات گذشته در زمینه فیزیک پدیده تزریق مستقیم گاز طبیعی فعالیت داشته اند، و شرایط را برای ایجاد شبیه سازی هایی با دقت بالا فراهم کرده اند [10,9].

هدف در تحقیق حاضر، دستیابی به کد اصلاح شده از کد عددی کیوا می باشد که بتواند با دقت بالا پدیده تزریق یک سوخت گاز (متان) را شبیه سازی کند. کد عددی کیوا نرم افزار بسیار قدرتمند در زمینه شبیه سازی برای پروژه های صنعتی و یا تحقیقاتی است [11]. اما کد اصلی کیوا نمی تواند تزریق سوخت گاز را شبیه سازی کند، چرا که مدل عددی تزریق سوخت آن صرفا برای سوخت های مایع بوده و در شبیه سازی سوخت های گازی نتایج درستی را پیش بینی نمی نماید.

در ابتدا تئوری تزریق گاز و تمام معادلات حاکم مورد مطالعه قرار گرفت. سپس زیر برنامه ای به کد اصلی کیوا اضافه شد و معادلات حاکم بر تزریق گاز، ضمن گسسته سازی، مورد استفاده قرار گرفت. نهایتا به نسخه اصلاح شده ای از کد کیوا دست یافته شد که بتواند ضمن داشتن تمام قابلیت ها و توانایی های قبلی کد کیوا، تزریق سوخت های گازی را نیز شبیه سازی کند. برای صحت سنجی کد تهیه شده، دو مورد کاملا متفاوت که نتایج آزمایشگاهی آن ها در اختیار بود مدل سازی و شبیه سازی شد. با مقایسه نتایج شبیه سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده، نشان داده شد که کد اصلاح شده کیوا می تواند نتایجی بسیار نزدیک به واقعیت تولید نماید.

2- معادلات حاکم

تزریق سوخت گاز، مانند متان، با تزریق سوخت ها مایع نظیر بنزین و یا دیزل تفاوت های اساسی دارد. سوخت های مایع پس از تزریق شدن دچار پدیده های اتمیزه شدن، تبخیر و برخورد می شوند. به این معنی که سوخت مایع پس از تزریق، به قطرات بسیار ریز تبدیل می شود (اتمیزه شدن) و قطره سوخت مایع به بخار تبدیل می شود (تبخیر شدن) و یا در اثر برخورد با هم قطره بزرگتری را تشکیل می دهند. اما برای تزریق سوختی مانند متان، لازم است به پدیده تزریق گاز توجه شود.

به صورت کلی، گاز تزریق شده را می توان به 3 ناحیه تقسیم بندی کرد. اولین ناحیه که از نقطه خروجی انژکتور شروع می شود، ناحیه مرکزی یا هسته پاشش نام دارد. سیال در این ناحیه از ذرات کروی شکل ریز تشکیل شده است. مرکز این ناحیه غیرلج بوده و سرعت متوسط سیال در این ناحیه یکنواخت می باشد. 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 می کند. بررسی ناحیه گذرا به دلیل طبیعت پدیده های بسیار پیچیده

این تحقیقات است به نحوی که با شبیه سازی تزریق مستقیم سوخت گاز طبیعی، می توان نقاط قوت و ضعف این دسته از موتور ها را شناسایی کرد و برای بهبود و افزایش رانندمان آن ها تمهیدات لازم را در نظر گرفت. شبیه سازی صحیح تزریق گاز نیازمند درک کامل از پدیده تزریق گاز و همچنین آگاهی کامل از روابط حاکم بر تزریق گاز می باشد. برای این منظور باید این پدیده را به درستی درک کرد و تمامی معادلات حاکم را استخراج و سپس گسسته سازی نمود تا بتوان آن ها را در قالب یک کد عددی مورد استفاده قرار داد.

مدل سازی جریان سوخت های مایع به داخل سیلندر، به خودی خود پدیده ای پیچیده محسوب می شود. حال آن که بخواهیم سوخت گاز را تزریق کنیم، از پیچیدگی های خاص خود برخوردار است چرا که گاز ها در مقایسه با مایعات چگالی کمتری دارند، لذا وزن کم آن ها به هنگام تزریق شدن مومنت کمتری برای سوخت گاز ایجاد می کند. مومنت کمتر باعث می شود سوخت گاز از عمق نفوذ کمتری به نسبت سوخت های 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 می تواند میزان آشفته گی جریان ایجاد شده را نیز افزایش دهد که خود موجب می شود 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 می شود جریان پس از تزریق شدن، دچار انبساط ناگهانی شود. یعنی سرعت جریان در مقطع خروجی انژکتور به سرعت صوت می رسد و ناگهان دچار موج های انبساطی می شود که از سرعت جریان می کاهد. طبیعت این شوک ها بر شکل جریان تزریق شده، میزان اختلاط انجام شده و همچنین عمق نفوذ تاثیر می گذارد. لذا برای یافتن عمق نفوذ و میزان اختلاط سوخت و هوا، لازم است این موج های انبساطی و شوک های حاصل به خوبی درک شوند [2].

آزمایش های متعددی توسط هو-آنگ و همکارانش انجام شده است که تاثیر سیستم تزریق مستمر گاز را با مشخصه های جریان تزریق شده و همچنین احتراق ایجاد شده در موتوری با سوخت گاز طبیعی مقایسه شده است [3-5]. فیلیپ هیل و پتریک اولت آشفته گی ناشی از تزریق گاز را بررسی و مطالعه کردند. سپس جت های آشفته تزریق شده را مدل سازی عددی نموده، و نتایج مدل سازی خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. آن ها نشان دادند نتایج مدل سازی آن ها با نتایج حاصل از آزمایش، از هم خوانی مطلوبی برخوردار است [6]. پیتر ویتز پیرامون جت های توربولانس غیرقابل تراکم که به صورت ناگهانی تزریق می شوند 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 دست یافته وی، می تواند 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

¹ CFD

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 کاملاً توسعه یافته، از معادلات زیر استفاده شده است:

$$\dot{u}_{jet} = 0.2 \times u_c \quad (6)$$

$$TKE_{jet} = 1.5 \times \dot{u}_{jet}^2 \quad (7)$$

$$TLS_{jet} = r_{.5} \quad (8)$$

$$r_{.5} = 1.18 \frac{r_j U_j}{U_0} \quad (9)$$

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

$$EPS_{jet} = cmueps \times \frac{TKE_{jet}^{1.5}}{TLS_{jet}} \quad (11)$$

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 اطمینان از عملکرد صحیح کد کیوای اصلاح شده، دو مورد کاملاً 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 کیوای 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 کیوای در تزریق سوخت گاز با استفاده از مدل انژکتور موجود در کد اصلی کیوای است، لذا برای مدل کردن تزریق گاز توسط کد اصلی کیوای 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 کیوای استفاده شد، و برای مدل‌سازی تزریق گاز از مدل عددی انژکتور استفاده شد و طبیعتاً 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 می‌کند. 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.

داخل این ناحیه، امری بسیار مشکل و تقریباً 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 تأثیر بسیار ناچیزی می‌گذارد [12,13].

ناحیه سوم که ناحیه کاملاً توسعه یافته نام دارد، معمولاً 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 شعاع نازل انژکتور، x_c طول ناحیه اولیه و $r_{.5}$ مقیاس طولی توربولانس می‌باشد.

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:

$$x_c = 12.5 r_j \quad (1)$$

برای هر نقطه‌ای که $x > x_c$ باشد آن نقطه در ناحیه کاملاً 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:

$$\dot{u}_{initial} = 0.12 \times V_{inj} \quad (2)$$

$$TKE_{initial} = 1.5 \times \dot{u}_{initial}^2 \quad (3)$$

$$TLS_{initial} = r_j \quad (4)$$

$$EPS_{initial} = cmueps \times \frac{TKE_{initial}^{1.5}}{TLS_{initial}} \quad (5)$$

که در آن‌ها،

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

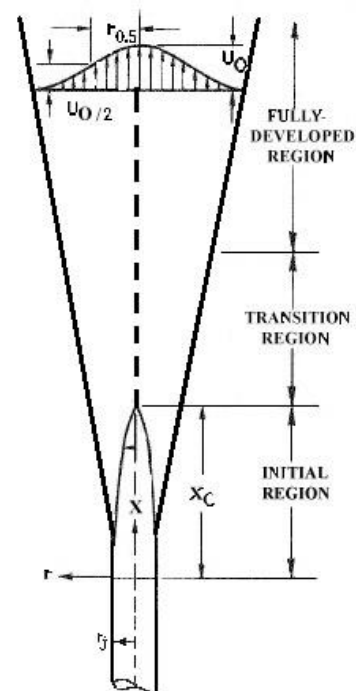


Fig. 1 Graphical representation of jet injection showing the initial, transient and fully developed region [7]

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

است. در این مورد نیز گاز تزریق شده متان خالص است. در ابتدا طبق روش 1، استوانه کوچکی به قطر 0.5 میلی متر و ارتفاع 10 میلی متر ایجاد شد که در نقش نازل انژکتور عمل تزریق را انجام می داد. این استوانه در مرکز سطح فوقانی قرار داشت و تزریق گاز به داخل محفظه از طریق این استوانه صورت می گرفت (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 شبیه سازی می نماید. مجدداً یادآوری می شود 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 می گردد.

در روش دوم این مورد، برای شبیه سازی از کد اصلاح شده کیوا استفاده شد و برای شبیه سازی پاشش سوخت گاز از مدل توسعه داده شده استفاده شد. تمامی شرایط دیگر شبیه سازی، 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 شبکه های کوچک (المان هایی به ابعاد 0.05mm) استفاده شد و برای سایر نواحی، دور از ناحیه پاشش، از شبکه های بزرگتر (المان هایی با ابعاد 0.5mm) استفاده شد (شکل 4). در ایجاد شبکه مورد نیاز، از تعداد 352856 سلول استفاده شد.

4- استقلال از شبکه

برای اطمینان از ابعاد صحیح و مناسب المان ها 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 می باشد، از المان هایی با ابعاد 0.05 میلی متر و برای نواحی دور از

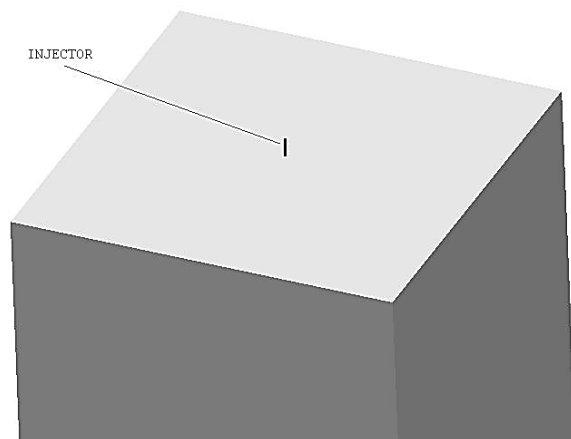


Fig. 3 Geometry of the second case, showing injector location

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

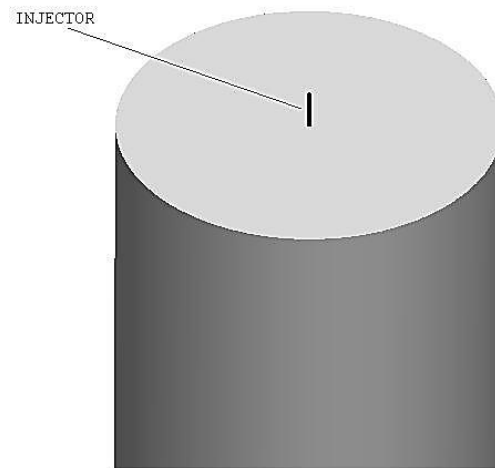


Fig. 2 Geometry and injector location in the first simulation case

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	$P_{inj} = 15\text{MPa}$ $T_{inj} = 350\text{K}$
فشار و دمای اولیه محفظه	$P_{chamber} = 5\text{MPa}$ $T_{chamber} = 850\text{K}$ $T_{wall} = 450\text{K}$
دمای دیواره	
قطر نازل انژکتور	$d_{noz} = 0.5\text{mm}$
کل جرم سوخت تزریق شده	3.5mg

برای ایجاد شبکه مورد نیاز، از دو اندازه متفاوت استفاده شد. در مجاورت و نزدیک به محل تزریق گاز که مستقیم زیر انژکتور می باشد، از المان هایی با ابعاد 0.05 میلی متر مکعب استفاده شد. برای نواحی دور از انژکتور که انتظار می رود تاثیر ناچیزی از فرایند تزریق تجربه کنند، از المان های درشت تری به ابعاد 0.2 میلی متر استفاده شد تا زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات کاهش یابد. در این شرایط، تعداد سلول های ایجاد شده 175635 عدد بود. به منظور تولید شبکه در این پروژه، از نرم افزار انسیس آیسسم¹ استفاده شد و برای تمام المان های ایجاد شده ساختار منظم حجمی² استفاده شد.

در روش اول از این مورد، از استوانه کوچکی به قطر 0.5 میلی متر و ارتفاع 10 میلی متر 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 می باشد، که با شروع تزریق، ناگهان گاز پس از عبور از استوانه کوچک وارد محفظه اصلی می شود. 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 چپودی شبکه ای ایجاد شد که از نظر هندسه و شرایط اولیه مرزی مطابق گزارشات تست های آزمایشگاهی بود [1]. در این آزمایشات یک محفظه مکعب شکل به ابعاد 200 میلی متر وجود دارد که در ابتدا حاوی هوا است (شکل 3). شرایط اولیه در جدول 2 ارائه شده

¹ ANSYS ICEM

² Structured Volumetric Mesh grids

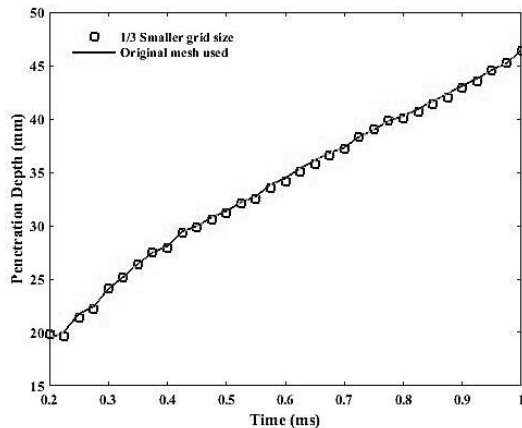


Fig. 6 Mesh independency check for second simulation case

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 مشخصاً 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 پدیده‌ای 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

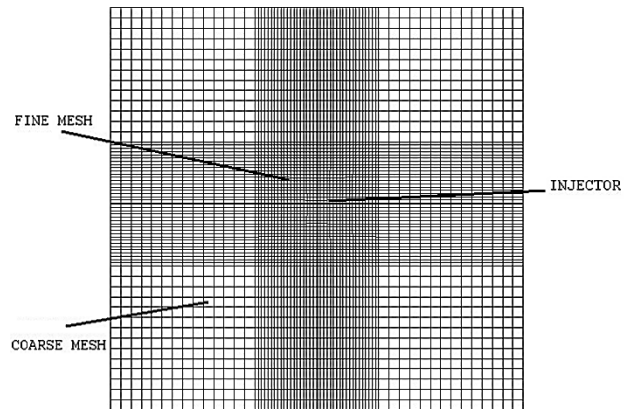


Fig. 4 Screenshot of the mesh grids generated, showing the fine and coarse mesh areas along with injector location

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 کاملاً 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

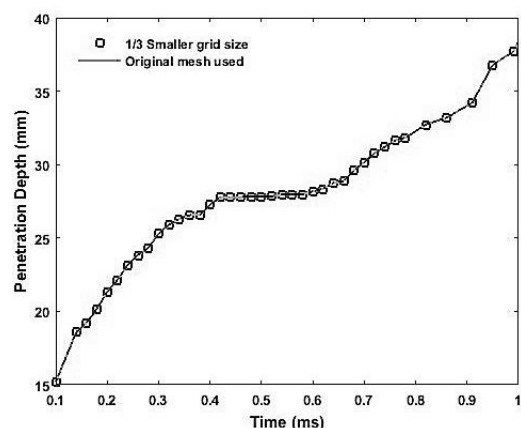


Fig. 5 Mesh independency check for first simulation case

شکل 5 بررسی استقلال از شبکه برای مورد اول

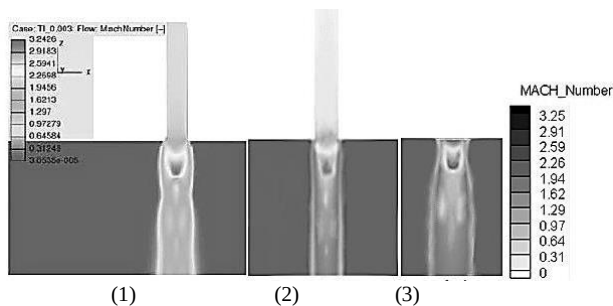


Fig. 8 Velocity contours of injected jet and displaying flow Mach number. '1' simulation results of Broomand & Yaddollahi [9], '2' simulation results of our first method, '3' simulation results of second method

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 به دست آمده به داده‌های آزمایشگاهی بسیار نزدیکتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش دوم، که از کد اصلاح شده کیوا استفاده شده است، به دلیل 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. به طوری 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 به هم 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 چپودی [1] مقایسه گردید. "شکل 10" بیانگر مقایسه صورت گرفته می‌باشد.

همان طوری که 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، می‌تواند به طور موثر با شبیه سازی صحیح انژکتور برای تزریق گاز، نتایج مطلوبی را تولید نمایند. با توجه

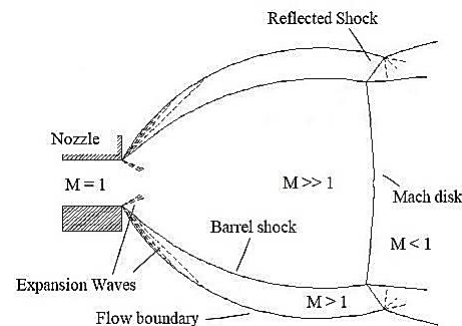


Fig. 7 Graphical demonstration of under expanded flow and supersonic speeds produced [7]

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، سریعاً 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 شماتیک 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 دلیل وجود شوک ماخ، سرعت جریان فوراً 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).

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 کاملاً متفاوت که نتایج آزمایشگاهی آن موجود بود مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور برای هر یک از موارد، هندسه و شبکه مدل و تمامی شرایط مرزی تزریق همانند آن چه در کار تجربی بود تنظیم و در نظر گرفته شد. همچنین برای هر مورد، به دو روش شبیه سازی انجام گرفت. در روش اول، با استفاده از کد اصلی کیوا، از استوانه کوچکی (در قالب پورت ورودی) که رفتار انژکتور را مدل می کرد استفاده شد و عملاً از مدل عددی انژکتور استفاده نشد. سپس در روش دوم، از مدل عددی انژکتور استفاده شد و عملاً هندسه انژکتور و دیگر نماد فیزیکی انژکتور حذف شد. در این روش با استفاده از کد اصلاح شده کیوا تزریق گاز شبیه سازی شد. در نهایت نتیجه گیری شد که شبیه سازی صورت گرفته در روش دوم، که از کد اصلاح شده کیوا استفاده شده است می تواند با دقت بیشتری عمق نفوذ گاز متان را محاسبه کند. در این پروژه مشاهده شد در هر دو روش انجام شده، نتایج به دست آمده به نتایج تجربی بسیار نزدیک هستند، اما نتایج روش دوم به نتایج تجربی بسیار نزدیکتر است. هرچند در این پژوهش، تنها به مدل سازی تزریق سوخت متان پرداخته شد، اما به دلیل کلی بودن معادلات و کد نوشته شده، می توان ادعا کرد که کد اصلاح شده می تواند تزریق هر نوع سوخت گازی را شبیه سازی نماید. این امر توانایی نرم افزار محبوب کیوا را گسترش می دهد، و علاوه بر تمام توانایی های پیشین کیوا، قابلیت مدل سازی تزریق گاز را نیز به این برنامه اضافه می کند. نتایج نشان می دهد که پروفیل سرعت جریان پس از تزریق شدن در شبیه سازی صورت گرفته، تطابق مناسبی با یافته های برومند و یداللهی [9] و همچنین تئوری های موجود [6] دارد. لذا می توان ادعا نمود که کد عددی تهیه شده می تواند پدیده موج های انبساطی و شوک های ایجاد شده را نیز در نظر بگیرد و در محاسبات انجام شده لحاظ کند.

6- فهرست علائم

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 (اغتاش)
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-engine, *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.

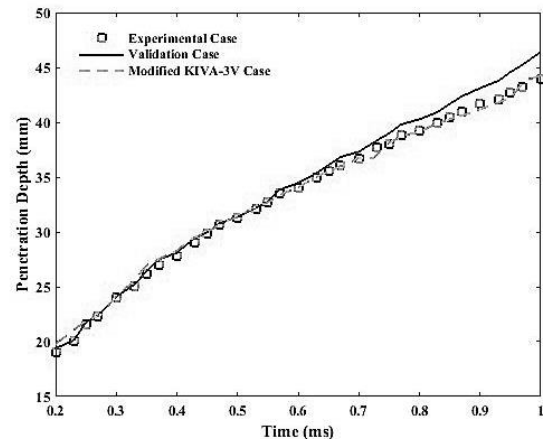


Fig. 9 comparing our first and second method penetration depth results against experimental results of Ouellette [6]

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

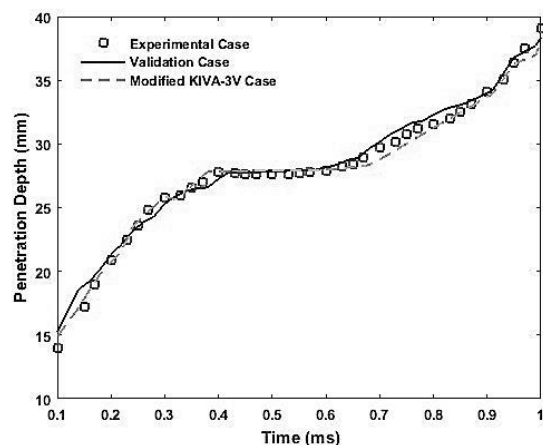


Fig. 10 comparing our first and second method penetration depth results against experimental results of Chiodi [1]

شکل 10 مقایسه عمق نفوذ محاسبه شده در روش 1 و 2، و مقایسه آن با داده های آزمایشگاهی چیدی [1]

به "شکل 10"، از زمان 0.1ms تا 0.2ms مشاهده می شود روش دوم به داده های تجربی نزدیک تر است

برای نمونه، در لحظه $t=0.16\text{ms}$ 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 پیش بینی می نماید، هرچند از زمان 0.2ms پس از شروع تزریق تا لحظه 0.6ms هر دو روش تقریباً با داده های آزمایشگاهی منطبق هستند. از لحظه 0.6ms تا 0.9ms شاهد فاصله گرفتن نتایج روش اول از داده های آزمایشگاهی هستیم، و در انتها، هر دو روش عمق نفوذ تقریباً مشابهی گزارش کرده اند. اما با توجه به روند تغییرات کلی این نمودار، متوجه می شویم که نتایج روش دوم به داده های تجربی بسیار نزدیک تر است در حالی که روش اول در بسیاری از نقاط از داده های آزمایشگاهی فاصله گرفته است.

5- جمع بندی

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

- 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.
- [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*