

تحلیل انتقال گرما در چندراهه خروج دود موتور احتراق داخلی تراکمی

سید اسماعیل رضوی
استاد، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، razavi@tabrizu.ac.ir

وحید فرهنگ مهر*
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران، vfarhangmehr@gmail.com

رشید یوسفی زنوز
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، rashid.yousefi@gmail.com

چکیده

کارایی چندراهه خروج دود یک موتور احتراق داخلی تراکمی تحت تاثیر متغیرهای هندسی آن و متغیرهای جریان دود درون آن می‌باشد. در این پژوهش، ابتدا هندسه چندراهه خروج دود با خم ۹۰ درجه در مجراهای آن مدل‌سازی می‌شود. سپس تاثیر قطر مخزن آرامش و مجراها بر مشخصه‌های جریان و انتقال گرما در چندراهه خروج دود شبیه‌سازی عددی می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها به روش المان محدود با نرم‌افزار Comsol انجام می‌شود. بدین منظور پس از تولید شبکه مناسب با تعداد المان‌های کافی و با پراکندگی مناسب آنها در مدل، گسسته‌سازی معادلات ناویر-استوکس و انتقال گرما با دقت مرتبه دوم انجام می‌گردد. چون جریان دود درون چندراهه خروج دود آشفته می‌باشد، از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده می‌شود. پس از اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها با مقایسه نتایج با اطلاعات آزمایشگاهی موجود در ادبیات فن، نمودارهای سرعت، فشار و عدد نوسلت ترسیم و تفسیر می‌گردند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش قطر مخزن آرامش و مجراها، سرعت جریان دود در خروجی چندراهه خروج دود کاهش و فشار پشت آن افزایش می‌یابد. عدد نوسلت نیز در خروجی چندراهه خروج دود با افزایش قطر مخزن آرامش و مجراها کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: چندراهه خروج دود، مخزن آرامش، مجرا، شبیه‌سازی عددی، جریان آشفته

Heat Transfer Analysis of Exhaust Manifold in a CI Internal Combustion Engine

S. E. Razavi
V. Farhangmehr
R. Yousefi Zounoz

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran
Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The efficiency of an exhaust manifold in a CI internal combustion engine is affected by its geometrical parameters and hot gases flow parameters. In this study, the geometry of an exhaust manifold with 90° bend in its runners is modeled. The effects of plenum diameter and runner diameter on the flow and heat transfer characteristics are numerically simulated. The numerical simulations are done by the finite element method in the Comsol Multiphysics software package. After generating an appropriate grid having an appropriate number of elements distributed smoothly in the model, the Navier-Stokes and heat transfer equations are discretized by a second-order scheme. Since the flow in the exhaust manifold is turbulent, the standard k-ε turbulence model is applied. After validating the simulations via comparing the results with experimental data available in the literature, the diagrams of velocity, pressure, and Nusselt number are plotted and then interpreted. The results show that as the plenum diameter and runner diameter increase, the exhaust velocity of hot gases decreases and the backpressure increases while the Nusselt number at the outlet of the exhaust manifold decreases.

Keywords: Exhaust manifold, Plenum, Runner, Numerical simulation, Turbulent flow

بنزین و گاز طبیعی، برای احتراق درون استوانه‌های احتراق استفاده می‌گردد [۱-۳]. همچنین در بخش‌های میانی و انتهایی سامانه تخلیه دود، قطعاتی مانند مشد (resonator) و صدا خفه‌کن (muffler) برای کاهش آلودگی صوتی ناشی از خروج دود از خودرو نصب می‌شوند [۱]. یکی از مهم‌ترین بخش‌های سامانه تخلیه دود که تاثیر زیادی بر عملکرد موتور، جلوگیری از ایجاد صداهای مزاحم و آلودگی محیط زیست دارد، چندراهه خروج دود است که دود خروجی از استوانه‌های احتراق را به سمت سامانه تخلیه دود راهنمایی می‌کند. طبیعت جریان عبوری از چندراهه خروج دود به دلیل باز و بسته شدن یک در میان (متناوب) دریچه دود استوانه‌های احتراق، یک طبیعت گذرا و تکانه‌ای است. این طبیعت گذرا و تکانه‌ای زمینه‌ساز تولید موج‌های فشاری در چندراهه خروج دود و در نتیجه تولید صداهای مزاحم می‌شود. با طراحی بهینه این چندراهه، انتشار گسترده صداهای مزاحم بهینه‌سازی

۱- مقدمه

سامانه تخلیه دود خودرو از چندراهه خروج دود (manifold) که بر روی بلوک استوانه‌های احتراق (cylinders) بسته می‌شود، شروع شده و تا عقب خودرو ادامه پیدا می‌کند. وظیفه اولیه این سامانه، هدایت دود یا در واقع همان محصولات احتراق خروجی از استوانه‌های احتراق به عقب خودرو می‌باشد. وظیفه ثانویه این سیستم نیز کاهش آلودگی زیست محیطی دود و آلودگی صوتی ناشی از خروج دود از خودرو است. بدین منظور در بخش اتصال به موتور سامانه تخلیه دود یعنی جایی که دمای دود بالاتر از دیگر بخش‌های آن می‌باشد، از سامانه واکنشگر (catalyst) جهت تبدیل ترکیبات مضر دود خروجی از استوانه‌های احتراق به ترکیبات غیر مضر و سالم و در نتیجه کاهش آلودگی زیست محیطی دود بهره‌گرفته می‌شود و یا از سوخت‌های ترکیبی مثلاً مخلوط

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: vfarhangmehr@gmail.com

می‌شود. طراحی بهینه این چندراهه همچنین بر آلودگی محیط زیست و عملکرد موتور تاثیرگذار است، بدین صورت که باعث تسهیل خروج دود از استوانه‌های احتراق و در نتیجه کمک به مکش بهتر هوای احتراق می‌شود که این خود به احتراق کامل سوخت درون استوانه‌های احتراق و در نتیجه بهبود عملکرد موتور، کاهش میزان گازهای سمی حاصل از احتراق ناقص سوخت و نیز کاهش میزان هیدروکربن‌های نسوخته سوخت می‌انجامد. در طراحی بهینه یک چندراهه خروج دود بایستی فضای فیزیکی اشغال شده توسط آن، دشواری فرآیند طراحی و ساخت آن و هزینه تولید آن در نظر گرفته شوند. موتور با آرایش خطی استوانه‌های احتراق دارای یک چندراهه خروج دود است که از مخزن آرامش (plenum) آن به هر یک از استوانه‌های احتراق، یک مجرا (runner) وصل می‌شود. در موتور با آرایش V شکل استوانه‌های احتراق، مجراهای خروجی از هر دو استوانه احتراق ابتدا به یکدیگر وصل شده و مجرای بزرگتر حاصل از این اتصال به چندراهه خروج دود وصل می‌شود [۱].

یکی از موضوعات مهم در ارتباط با چندراهه خروج دود، جریان دود درون آن و انتقال گرما از آن می‌باشد زیرا سامانه‌های کنترل موتور نظیر ECU (Electronic Control Unit) با استفاده از توزیع فشار و دمای لحظه‌ای دود داخل چندراهه خروج دود، نسبت سوخت به هوا را برای احتراق بهینه و در نتیجه عملکرد بهینه موتور همراه با تولید آلاینده‌های محیط زیستی کمتر تنظیم می‌کنند و علاوه بر این، دمای دود خروجی از این چندراهه در عملکرد سامانه واکنشگر که دقیقاً بعد از آن قرار دارد، بسیار موثر می‌باشد [۱]. متأسفانه به دلیل پیچیدگی این موضوع به خاطر ماهیت سه‌بعدی و گذرای آن و نیز نوسانات زیاد و سریع در دما و فشار دود داخل استوانه‌های احتراق به نظر می‌رسد که هنوز بعضی از جنبه‌های آن به قدر کافی مورد مطالعه نظری، تجربی و عددی قرار نگرفته است.

رزلو [۴] برای تحلیل جریان داخل چندراهه خروج دود، یک حل تقریبی چندجمله‌ای بر اساس طرح کوشی-کوالوسکایا (Cauchy-Kovalevskaya) را برای معادلات اولیر یک بعدی حاکم ارائه نمود. وی نتایج حل تحلیلی خود را با نتایج به دست آمده از روش عددی مک کورمک (MacCormack) مقایسه کرد و مطابقت خوبی را مشاهده نمود. سومان [۵] از روش عملکرد موج (wave action) برای مطالعه عددی جریان داخل چندراهه خروج دود استفاده نمود. وی برای حل معادلات دیفرانسیل هذلولوی غیرخطی حاکم از روش مشخصه‌ها (characteristics method) بهره گرفت و بدین منظور یک برنامه کامپیوتری را برای به دست آوردن میدان‌های فشار و سرعت جریان در شرایط مرزی مختلف توسعه داد. کسگین [۶] با تحلیل جریان داخل موتور احتراق داخلی گازسوز با استفاده از یک مدل صفر بعدی برای جریان داخل استوانه‌های احتراق و یک مدل یک بعدی برای جریان داخل چندراهه خروج دود، اثر متغیرهای مختلف مانند زمان باز و بسته شدن دریچه‌ها، قطر دریچه‌ها و نیز قطر و طول چندراهه خروج دود بر عملکرد موتور را مورد بررسی قرار داد. لیانگ [۷] جریان داخل چندراهه خروج دود را با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک و انتقال گرما از دود به دیواره آن، شبیه‌سازی عددی نمود. در پژوهشی دیگر، گوپال و کومار [۸] با استفاده از نرم‌افزار Fluent و اعمال شرایط مرزی فشار، سرعت و دما، جریان داخل چندراهه خروج دود را با هدف بررسی اثر کاهش

فشار پشت چندراهه خروج دود بر افزایش بازده موتور مورد مطالعه عددی قرار دادند. نتایج به دست آمده در این پژوهش، مطابقت خوبی با اطلاعات آزمایشگاهی موجود در ادبیات فن داشت. پراوین و همکاران [۹] با بهره‌گیری از نرم‌افزار CFX تاثیر کاهش فشار پشت چندراهه خروج دود بر افزایش بازده احتراق را مورد مطالعه عددی قرار دادند. بوو [۱۰] با علم بر اینکه تلفات گرمایی، فاکتور اصلی محدود کننده بازده موتور می‌باشد و انتقال گرما باعث القای گرمایی تنش‌های مکانیکی در اجزای موتور می‌شود، رهیافت‌های مختلفی به منظور شبیه‌سازی عددی دقیق، سه‌بعدی و گذرای جریان دود در موتور و انتقال گرما از آن انجام داد. گواردیولا و همکاران [۱۱] با علم بر اینکه دمای دود خروجی از موتور یک متغیر ارزشمند برای کنترل عملکرد موتور می‌باشد ولی تعیین لحظه‌ای آن به دلیل شرایط اندازه‌گیری در خروجی موتور و پاسخ دینامیکی آهسته حسگرهای دما دشوار است، روشی برای برآورد دمای خروجی موتور بر اساس سیگنال فشار درون استوانه‌های احتراق و سرعت موتور معرفی کردند. در کار آنها، انبساط دود در عبور از دریچه تخلیه استوانه‌های احتراق آیزنتروپیک فرض شد و افت دمای دود در حین عبور از مجراها و مخزن آرامش چندراهه خروج دود با یک روش گرمایی نقطه‌ای مدل‌سازی گردید و نتایج حاصل با نتایج دیگر روش‌های موجود در ادبیات فن تحت شرایط گذرا و پایا در یک موتور احتراق تراکمی (CI) چهار زمانه مقایسه شد. نور و همکاران [۱۲] تزریق اتانول به درون چندراهه خروج دود برای کنترل فرآیند احتراق در موتورهای گازوئیلی را مورد مطالعه قرار دادند و اثرات زمان‌بندی تزریق اتانول، مقدار اتانول و نسبت‌های بازگردد دود عبوری از چندراهه خروج دود را گزارش کردند. مهابادی‌پور و همکاران [۱۳] نوسانات چرخه‌ای جریان خروجی از یک موتور گازوئیلی با یک استوانه احتراق، با تغییرات اندازه-گیری شده فشار لحظه‌ای چندراهه خروج دود را مطالعه کرده و تاثیر آن بر اگزورژی جریان خروجی از موتور گازوئیلی را در گستره وسیعی از شرایط عملیاتی گزارش نمودند. نتایج آنها نشان داد که اندازه بیشینه فشار در خروجی موتور در بارهای بزرگتر موتور افزایش می‌یابد و نیز مؤلفه مکانیکی اگزورژی در فرآیند تخلیه دود در مقایسه با مؤلفه گرمایی اگزورژی، تغییرات کمتری دارد. اتوگرو و همکاران [۱۴] چالش‌های محاسباتی مواجه شده طی استفاده از روش‌های عددی مختلف برای تحلیل جریان دود در توربین پرخوراندنده (turbocharger) و چندراهه خروج دود را همراه با ذکر مزایا و معایب هر کدام از روش‌ها گزارش کردند.

در پژوهش حاضر، جریان دود و انتقال گرما در چندراهه خروج دود که مجراهای آن دارای خم ۹۰ درجه می‌باشند، به صورت عددی با بهره‌گیری از نرم‌افزار Comsol Multiphysics نسخه ۵.۳ با جزئیات بیشتر در مقایسه با کارهای مشابه موجود در ادبیات فن مطالعه می‌شود. با هدف بهبود عملکرد چندراهه خروج دود، شبیه‌سازی‌ها با تغییر قطر مجراها و مخزن آرامش آن انجام می‌گیرد.

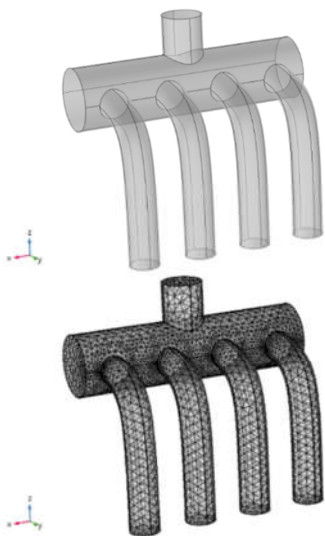
۲- معادلات حاکم

گرمای حاصل از احتراق درون استوانه‌های احتراق ابتدا از طریق تابش و همرفت از محصولات احتراق به سقف استوانه‌های احتراق، دریچه‌ها، دیواره استوانه‌های احتراق و دیواره پیستون درون آنها و در

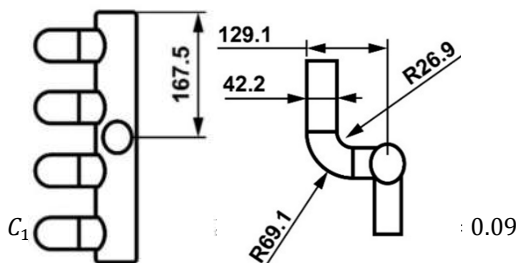
المان محدود (Finite Element Method) Comsol با روش گالرکین (Galerkin method) با دقت مرتبه دوم گسسته‌سازی می‌شوند. شرایط مرزی در ورودی چندراهه خروج دود عبارتند از: شدت آشفستگی ثابت ۴/۲٪، طول آشفستگی ثابت ۷٪، دمای ثابت ۸۰۰°C و دبی جرمی محصولات احتراق که متغیر با دور موتور می‌باشد. با در نظر گرفتن این شرایط مرزی، معادلات حاکم گسسته‌سازی شده حل می‌شوند. معیار همگرایی در شبیه‌سازی‌ها ۱۰^{-۶} می‌باشد.

۳- نتایج

در شکل ۱ مدلی از چندراهه خروج دود که دارای چهار مجرا با خم ۹۰ درجه می‌باشد و نیز شبکه بی‌سازمان (unstructured grid) تولید شده برای آن نشان داده شده است. ابعاد هندسی مدل شامل ابعاد خروجی چندراهه خروج دود، ابعاد مخزن آرامش و ابعاد مجراها در شکل ۲ ارائه شده‌اند. همان گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود قطر مجراها ۴۲/۲mm و قطر خروجی چندراهه خروج دود ۵۶mm می‌باشد. در جدول‌های ۱ تا ۴ به ترتیب مشخصات آلومینیوم که جنس چندراهه خروج دود می‌باشد، مشخصات موتور در نظر گرفته شده در این تحقیق، دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود در دورهای مختلف موتور و نیز مشخصات فیزیکی آنها در دمای ۸۰۰°C ارائه شده‌اند.



شکل ۱- مدلی از چندراهه خروج دود با چهار مجرا با خم ۹۰ درجه و شبکه تولید شده برای آن



حین عبور محصولات احتراق از چندراهه خروج دود، از طریق همرفت به دیواره آن انتقال می‌یابد و سپس به طریق رسانش از آنها عبور کرده و به طریق همرفت به دیگر قسمت‌های موتور و در نهایت به محیط بیرون انتقال می‌یابد. این انتقال گرما که طی هر چهار فرآیند مکش سوخت به درون استوانه‌های احتراق و سپس تراکم آن، انبساط محصولات احتراق و سپس تخلیه آنها از استوانه‌های احتراق صورت می‌گیرد، از شرایط فشاری و دمایی سوخت و محصولات احتراق، دبی جرمی مکش سوخت و تخلیه محصولات احتراق، نسبت تراکم موتور، سامانه تولید جرقه یا پاشش سوخت، شرایط دمایی و فشاری محیط بیرون و نیز جنس اجزاء مختلف موتور تأثیر می‌پذیرد و با توجه به تغییر سطح انتقال گرمای محفظه احتراق طی چرخه مکانیکی موتور، متغیر می‌باشد [۱۵-۱۶]. با این وجود، در بسیاری از محاسبات می‌توان انتقال گرما را با دقت قابل قبولی شبه‌یکنواخت و رژیم جریان انتقال گرمای همرفت را آشفته در نظر گرفت. این انتقال گرمای همرفت در سامانه تخلیه محصولات احتراق به دلیل سرعت و دمای بالای آنها بیشترین مقدار را دارد [۱۰].

معادلات متوسط‌گیری شده زمانی حاکم بر جریان آشفته، تراکم ناپذیر و پایای محصولات احتراق در چندراهه خروج دود و انتقال گرمای همرفت از آن عبارتند از [۱۰]:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\bar{U}_j \frac{\partial (\bar{U}_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (2)$$

$$\bar{U}_i \frac{\partial (\bar{T})}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho C_p \bar{u}_i \bar{T} \right) + \mu [\Phi] \quad (3)$$

$\bar{u}_i \bar{u}_j$ تانسور تنش رینولدز و ρ, μ, ν, k, C_p به ترتیب گرمای ویژه، ضریب رسانایی گرمایی، لزجت سینماتیکی، لزجت دینامیکی و چگالی می‌باشد.

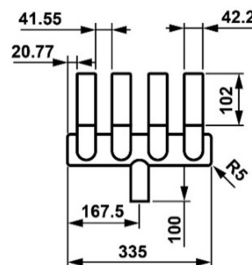
معادلات مدل آشفستگی $k-\epsilon$ استاندارد عبارتند از [۱۰]:

$$\rho \frac{\partial (k \bar{U}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon; \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial (\epsilon \bar{U}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\mu_t} \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

μ_t لزجت آشفستگی و $\sigma_\epsilon, \sigma_k, C_{1\mu_t}, C_2, C_\mu$ ضرایب و ثوابت مدل آشفستگی $k-\epsilon$ استاندارد می‌باشد که به ترتیب عبارتند از [۱۰]:

در این پژوهش، پس از مدل‌سازی هندسه چندراهه خروج دود و تولید شبکه با تعداد المان‌های کافی و با فشرده‌سازی المان‌ها در نواحی با گرادین‌های شدید متغیرهای جریان، معادلات حاکم در نرم‌افزار



شکل ۲- ابعاد هندسی مدل ساخته شده برای چندراهه خروج دود (ابعاد به میلی‌متر) [۱۷]

جدول ۱- مشخصات جنس آلومینیومی بدنه چندراهه خروج دود [۱۸]

$7 \times 10^{-11} \text{ N/m}^2$	مدول یانگ
۰/۳۴۶	ضریب پواسون
2710 kg/m^3	چگالی
$2/36 \times 10^{-5} \frac{1}{K}$	ضریب انبساط حجمی
$9/5 \times 10^{-7} \text{ N/m}^2$	تنش تسلیم

جدول ۲- مشخصات موتور احتراق تراکمی با چهار استوانه احتراق با سوخت گازوئیل [۱۹]

4520.8 kJ/kg.K	ارزش حرارتی سوخت (گازوئیل)
۰/۷	وزن مخصوص سوخت
$69/0.5 \text{ mm} \times 73/4 \text{ mm}$	قطر پیستون و طول جابجایی آن
۱۱۰۰ CC	حجم موتور
۷/۲:۱	نسبت تراکم

جدول ۳- دبی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود [۱۶]

دبی جرمی ($\frac{g}{s}$)	سرعت موتور (RPM)
۴۲	۱۲۰۰
۴۴	۱۵۰۰
۴۵	۱۸۰۰

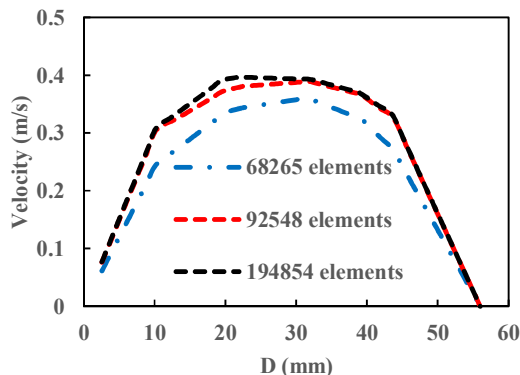
جدول ۴- مشخصات محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود در دمای 800°C [۱۶]

$1/0.685$	چگالی (kg/m^3)
$3/0.95 \times 10^{-5}$	لزجت دینامیکی (N.s/m^2)
$10.56/6434$	گرمای ویژه (kJ/kgK)
۰/۰۲۵	رسانایی گرمایی ($\frac{W}{m.K}$)

۳-۱- استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی

اولین گام در شبیه‌سازی‌های عددی بررسی استقلال نتایج از شبکه می‌باشد، شبکه‌ای که علاوه بر داشتن تعداد المان‌های کافی و یکنواختی در توزیع آنها، در نواحی با گرادیان‌های شدید متغیرهای جریانی و گرمایی مانند نزدیکی خم ۹۰ درجه مجراها و خروجی چندراهه خروج دود دارای فشردگی المانی بیشتری است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه، پنج شبکه همان گونه که در جدول ۵ معرفی شده‌اند، با تعداد المان‌های متفاوت تولید شد و حساسیت پروفیل سرعت جریان محصولات احتراق در خروجی چندراهه خروج دود به

شبکه مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳ مشاهده می‌گردد که استقلال نتایج از شبکه در شبکه با تعداد المان ۹۲۵۴۸ حاصل می‌شود، زیرا متغیر مذکور در شبکه با تعداد المان‌های بیشتر از آن تغییر چندانی نمی‌کند. بدین ترتیب ضمن حفظ دقت نتایج و نیز کاهش هزینه محاسباتی، این شبکه برای ادامه شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳- پروفیل سرعت جریان محصولات احتراق در خروجی

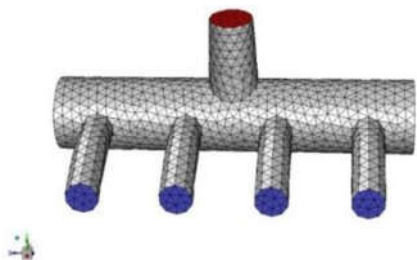
چندراهه خروج دود برای سه شبکه مختلف

(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)

حال در این قسمت برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی، از نتایج آزمایشگاهی کنوده و سیراس [۱۶] بهره گرفته می‌شود. آنها تاثیر زاویه مخروط خروجی یک چندراهه خروج دود که مخزن آرامش آن دارای مقطع بیضوی بود، بر افت فشار جریان محصولات احتراق گذرنده از آن در یک موتور هینز هسلر [۲۰] را تعیین کردند که همین متغیر برای اعتبارسنجی تحقیق حاضر در نظر گرفته می‌شود. در کار آنها دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s و زاوایای مختلف مخروط خروجی $2/5$ ، $5/5$ و $7/5$ درجه بود. سه مدل برای مسأله آنها به همراه شبکه تولید شده برای آنها در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. در شبیه‌سازی صورت گرفته برای مسأله آنها در تحقیق حاضر از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد استفاده شده است.

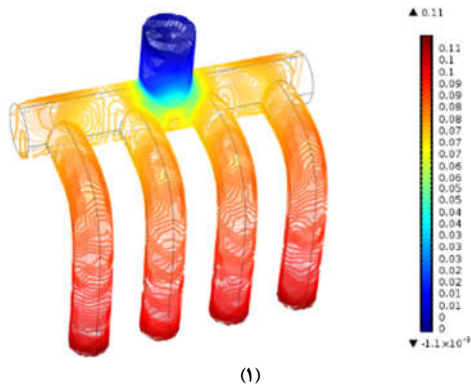
جدول ۵- مشخصات شبکه‌های تولید شده برای چندراهه خروج دود

شبکه	تعداد کل المان	تعداد المان‌های سطحی	تعداد المان‌های مرزی
۱	۱۹۳۵۶	۳۱۶۶	۵۲۱
۲	۳۳۴۵۶	۴۴۹۸	۶۲۹
۳	۶۸۰۶۵	۶۳۸۰	۷۶۵
۴	۹۲۵۴۸	۸۸۲۸	۸۸۲
۵	۱۹۴۸۵۴	۱۲۹۵۲	۱۰۷۸

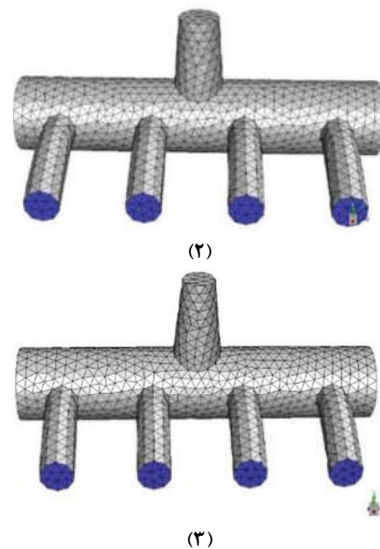


(۱)

چندراهه خروج دود بسیار موثر است. در این بخش، وضعیت مجراها نسبت به یکدیگر ثابت است. شبیه‌سازی‌ها برای چهار قطر مخزن آرامش 60 mm ، 65 mm ، 70 mm و 80 mm انجام شده است و کانتورهای سرعت و فشار در شکل ۶ نمایش داده شده است. با نگاهی به این کانتورها می‌توان دید که ناحیه سکون سیال بعد از خم مجراها با افزایش سطح مقطع مخزن آرامش افزایش پیدا می‌کند که باعث بیشتر شدن اختلاف فشار خروجی و ورودی چندراهه خروج دود می‌گردد. توزیع فشار در مقطع خروجی چندراهه خروج دود برای قطرهای مختلف مخزن آرامش در شکل ۷ نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود افت فشار در مرکز مقطع خروجی نسبت به دیواره آن با افزایش قطر مخزن آرامش افزایش پیدا می‌کند که در اثر افزایش سرعت در مقطع خروجی چندراهه خروج دود در قطرهای کم مخزن آرامش است. تغییرات سرعت روی خط تقارن طولی مخزن آرامش برای قطرهای مختلف مخزن آرامش در شکل ۸ ارائه شده است. دیده می‌شود که سرعت در مقطع خروجی پلنوم برای قطرهای کمتر مخزن آرامش بیشتر است که در اثر تنگ‌تر شدن مقطع و افزایش سرعت جریان است. نمودار تغییرات دما روی خط تقارن طولی مخزن آرامش با تغییر قطر مخزن آرامش در شکل ۹ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که دما داخل مخزن آرامش با افزایش قطر مخزن آرامش کاهش پیدا می‌کند. توزیع فشار روی خط تقارن عمودی مقطع خروجی برای قطرهای مختلف مخزن آرامش در شکل ۱۰ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر مخزن آرامش، فشار در مقطع خروجی چندراهه افزایش می‌یابد. تغییرات عدد نوسلت روی خط تقارن عمودی مقطع خروجی چندراهه در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر مخزن آرامش، عدد نوسلت در راستای خط تقارن عمودی مقطع خروجی چندراهه کاهش پیدا می‌کند این در صورتی است که با حرکت به سمت خروجی چندراهه در راستای عمودی مقطع خروجی چندراهه در یک قطر مخزن آرامش ثابت، عدد نوسلت افزایش می‌یابد. کانتورهای دما و خطوط جریان نیز در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ برای قطرهای مختلف مخزن آرامش نمایش داده شده‌اند. کانتورهای دما ناحیه با دمای زیاد را برای قطرهای مخزن آرامش کم نشان می‌دهد. در جریان محصولات احتراق داخل چندراهه، بیشتر شدن قطر مخزن آرامش تمایل جریان برای پرخش و کاهش جریان در خروجی چندراهه را در پی دارد.

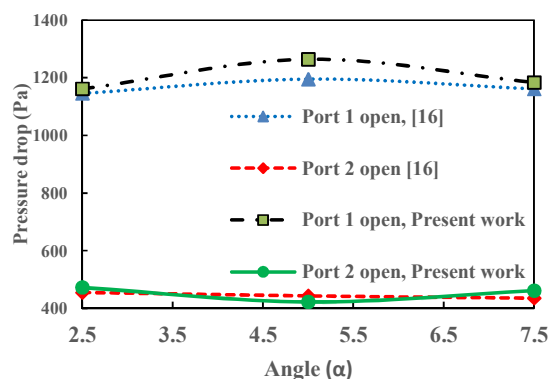


(۱)



شکل ۴- چندراهه خروج دود با زوایای مختلف مخروط خروجی، (۱) زاویه مخروط 5° ، (۲) زاویه مخروط 7.5° و (۳) زاویه مخروط 5°

شکل ۵ مقایسه بین افت فشار حاصل در کار حاضر با نتیجه گزارش شده در [۱۶] برای مخروط خروجی را در دو حالت اولین مجرا باز و مابقی مجراها بسته و دومین مجرا باز و مابقی مجراها بسته نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود توافق نسبتاً قابل قبولی بین آنها وجود دارد.



شکل ۵- افت فشار حاصل در کار حاضر و [۱۶] در خروجی چندراهه خروج دود

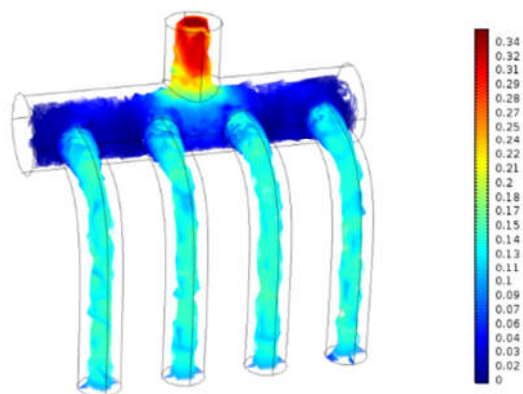
(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)

در ادامه، نتایج به دست آمده در کار حاضر با در نظر گرفتن دبی جرمی 0.42 kg/s بر ثانیه برای محصولات احتراق، قطرهای مخزن آرامش 60 ، 65 ، 70 و 80 میلی‌متر، قطرهای مجرا $42/2$ ، $34/2$ و $50/2$ میلی‌متر و دمای محصولات احتراق خروجی از محفظه احتراق استوانه‌های احتراق 800°C ارائه می‌شوند.

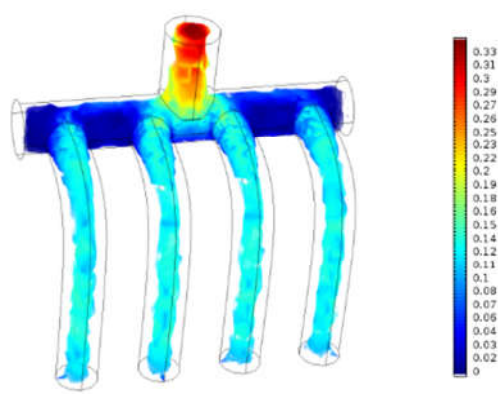
۳-۲- نتایج برای تغییر قطر مخزن آرامش و قطر مجراها

۳-۲-۱- نتایج برای تغییر قطر مخزن آرامش

اندازه قطر مخزن آرامش در جمع‌آوری بهینه محصولات احتراق داغ خروجی از استوانه‌های احتراق و هدایت آن به سمت خروجی

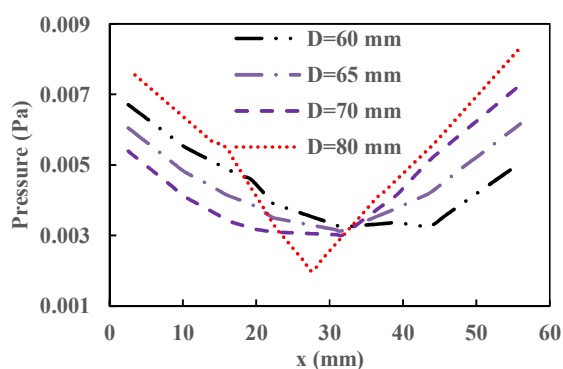


(۶)



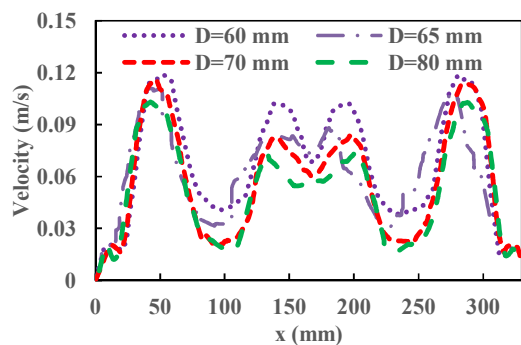
(۲)

شکل ۶- کانتورهای فشار در (۱)، (۳) و (۵) به ترتیب برای مخزن آرامش با قطرهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ میلی‌متر و کانتورهای سرعت در (۲)، (۴) و (۶) به ترتیب برای مخزن آرامش با قطرهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ میلی‌متر (دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)



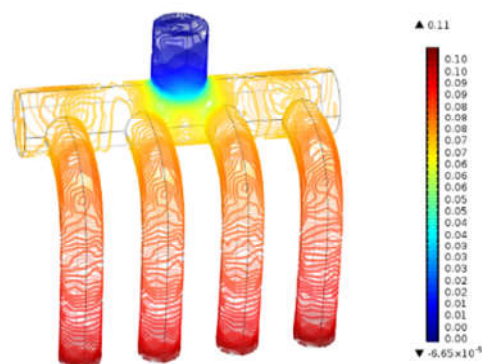
شکل ۷- توزیع فشار در مقطع خروجی چندراهه خروج دود برای مخزن آرامش با قطرهای مختلف

(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)

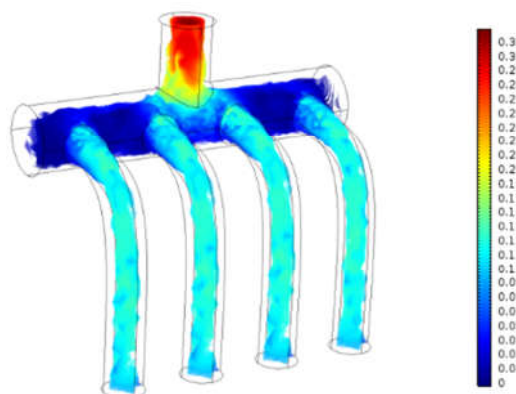


شکل ۸- تغییرات سرعت روی خط تقارن طولی مخزن آرامش برای قطرهای مختلف مخزن آرامش

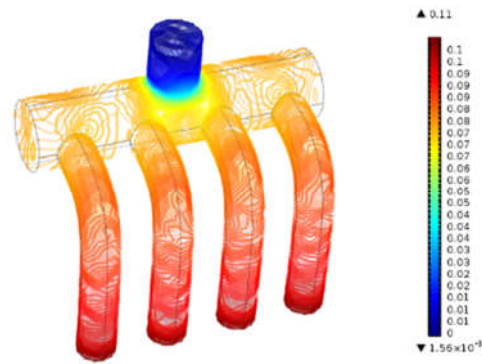
(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)



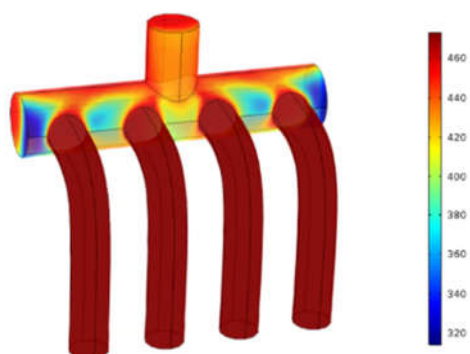
(۳)



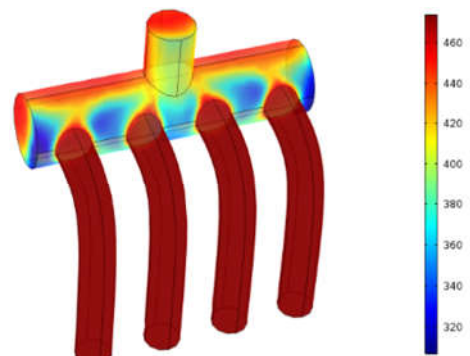
(۴)



(۵)

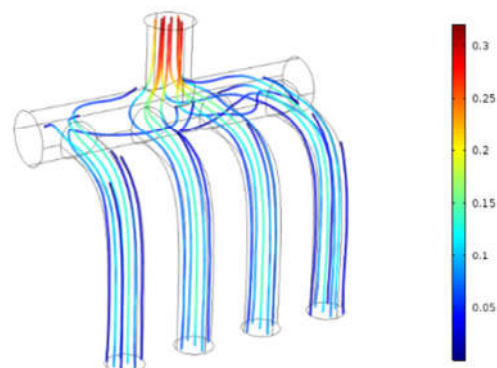


(۲)

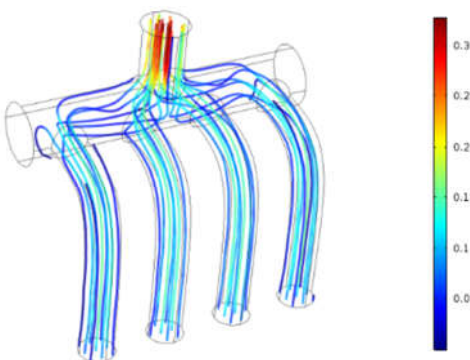


(۳)

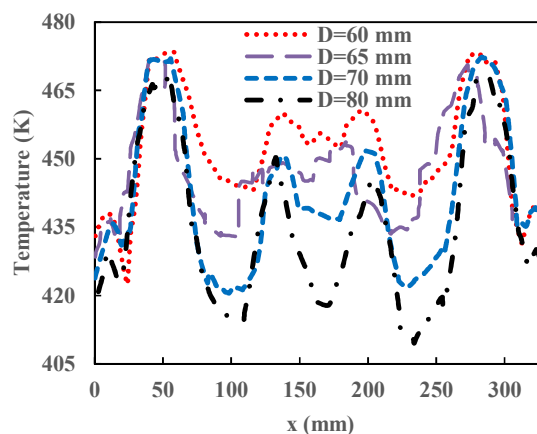
شکل ۱۲- کانتورهای دما برای قطرهای مختلف مخزن آرامش
 $D = 80 \text{ mm}$ (۳) و $D = 70 \text{ mm}$ (۲)، $D = 60 \text{ mm}$ (۱)
 (دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)



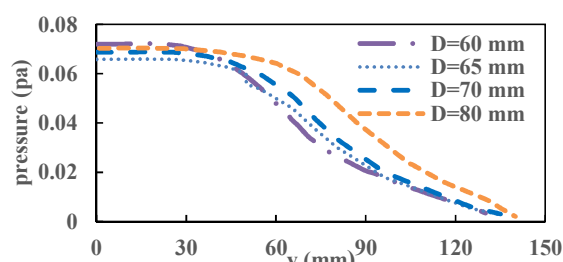
(۱)



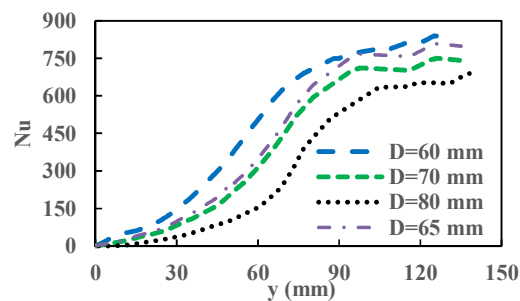
(۲)



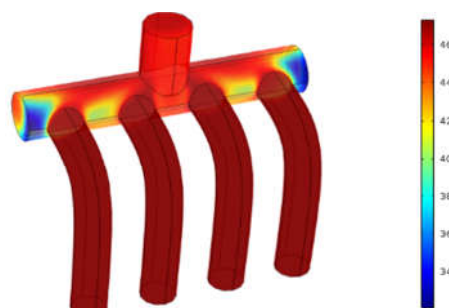
شکل ۹- تغییرات دما روی خط تقارن طولی مخزن آرامش برای
 قطرهای مختلف مخزن آرامش
 (دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)



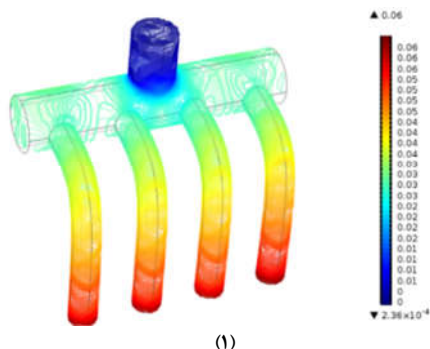
شکل ۱۰- تغییرات فشار روی خط تقارن عمودی مقطع خروجی برای
 قطرهای مختلف مخزن آرامش
 (دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)



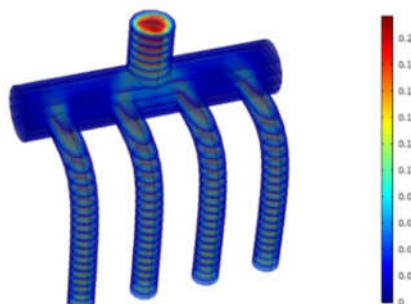
شکل ۱۱- نمودار تغییرات عدد نوسلت روی خط تقارن عمودی مقطع
 خروجی برای قطرهای مختلف مخزن آرامش
 (دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)



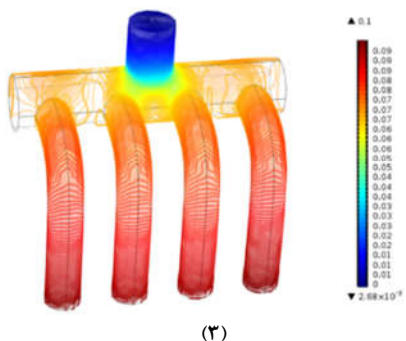
(۱)



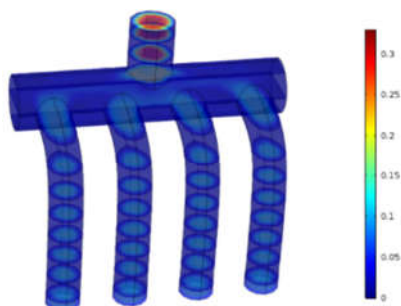
(۱)



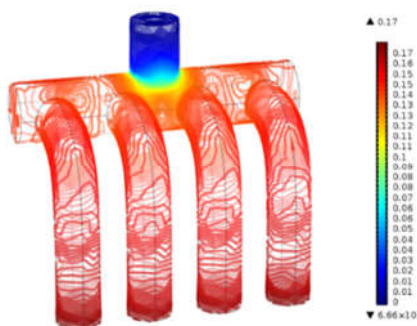
(۲)



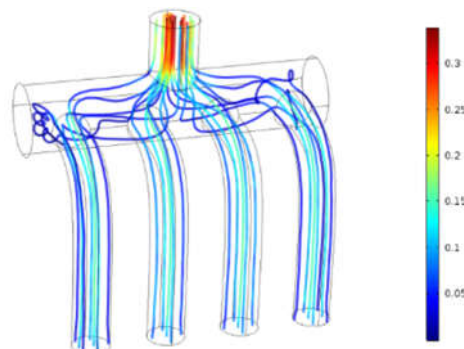
(۳)



(۴)



(۵)



(۶)

شکل ۱۳- خطوط جریان برای قطرهای مختلف مخزن آرامش
(۱) $D = 30 \text{ mm}$ ، (۲) $D = 35 \text{ mm}$ و (۳) $D = 40 \text{ mm}$
(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)

۳-۲-۲- نتایج برای تغییر قطر مجراها

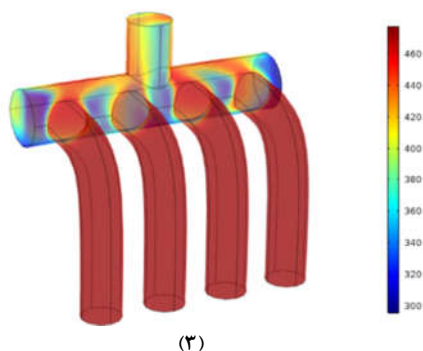
تغییر قطر مجراها عامل مهمی در انتقال بهینه محصولات احتراق خروجی از چندراهه خروج دود و تغییر رفتار جریان درون آن است. در این بخش، در دبی جرمی ثابت برای محصولات احتراق ورودی به چندراهه و در طول ثابت مخزن آرامش، سه قطر مختلف برای مجراها در نظر گرفته شده است. قطرهای عبارتند از $2.34/2$ و $42/2$ و $50/2$ میلی-متر. کانتورهای سرعت و فشار در چندراهه خروج دود برای قطرهای مختلف مجراها در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌گردد که با افزایش قطر مجراها بیشینه فشار داخل چندراهه افزایش یافته و بازه تغییرات سرعت بیشتر می‌گردد.

شکل ۱۵ تغییر سرعت روی خط تقارن عمودی مقطع خروجی چندراهه برای قطرهای مختلف مجراها را نمایش می‌دهد. تغییر قطر مجراها باعث تغییر دمای محصولات احتراق خروجی از چندراهه می‌شود که در شکل ۱۶ به صورت کانتور دما نشان داده شده است. ناحیه با دمای بیشینه با کاهش قطر مجراها در داخل مخزن آرامش به صورت کاملاً واضح ظاهر می‌شود.

نمودار توزیع سرعت روی خط تقارن طولی مخزن آرامش برای قطرهای مختلف مجراها در شکل ۱۷ ارائه شده است. با توجه به این شکل، بیشینه‌های سرعت با افزایش قطر مجراها افزایش پیدا می‌کنند. در شکل ۱۸ تغییرات دما روی خط تقارن طولی مخزن آرامش برای قطرهای مختلف مجراها ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش قطر مجراها، دما افزایش پیدا می‌کند.

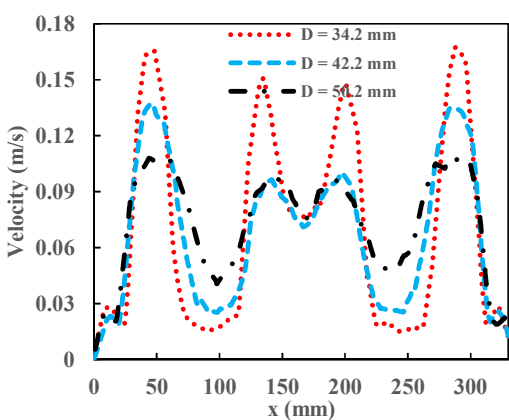
نمودار توزیع فشار در راستای خط تقارن عمودی مقطع خروجی چندراهه در شکل ۱۹ برای قطرهای مختلف مجراها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر مجراها، فشار در مقطع خروجی چندراهه افزایش می‌یابد ولی در حرکت به سمت خروجی این مقطع، این فشار روند کاهشی دارد.

نمودار تغییرات عدد نوسل روی خط تقارن عمودی مقطع خروجی چندراهه برای قطرهای مختلف مجراها در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. عدد نوسل جریان در راستای عمودی خروجی چندراهه، در قطر کمتر مجراها بزرگتر است.

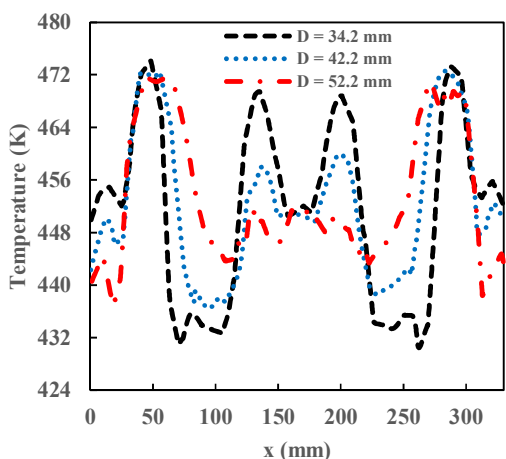


(۳)

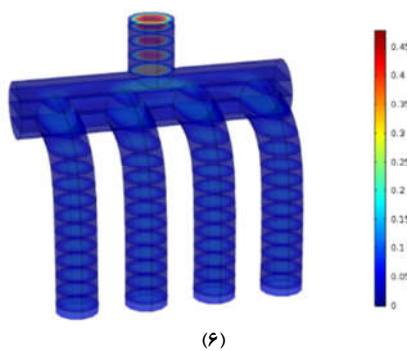
شکل ۱۶- کانتور دمای چندراهه برای قطرهای مختلف مجراها
(۱) $D = 34.2 \text{ mm}$ ، (۲) $D = 42.2 \text{ mm}$ و (۳) $D = 50.2 \text{ mm}$
(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)



شکل ۱۷- تغییرات سرعت روی خط تقارن طولی مخزن آرامش برای
قطرهای مختلف مجراها
(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)

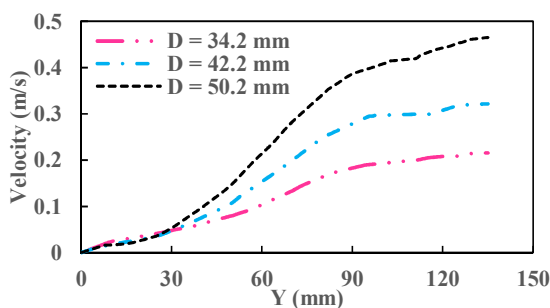


شکل ۱۸- تغییرات دما روی خط تقارن طولی مخزن آرامش برای
قطرهای مختلف مجراها
(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)

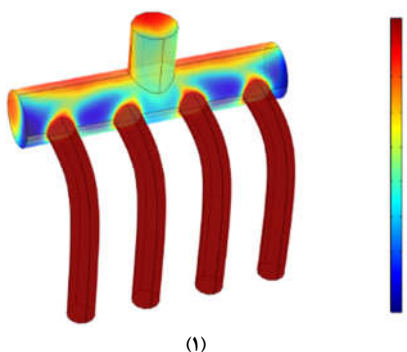


(۶)

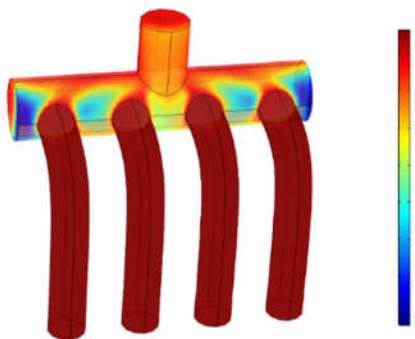
شکل ۱۴- کانتورهای سرعت و فشار برای قطرهای مختلف
مجراها، کانتورهای (۱)، (۳) و (۵) فشار داخل چندراهه به ترتیب
برای قطرهای $42/2$ ، $34/2$ و $50/2$ میلی‌متر و کانتورهای (۲)، (۴)
و (۶) سرعت داخل چندراهه به ترتیب برای قطرهای $42/2$ ، $34/2$
و $50/2$ میلی‌متر (دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به
چندراهه خروج دود 42 g/s)



شکل ۱۵- تغییرات سرعت روی خط تقارن عمودی مقطع خروجی
چندراهه برای قطرهای مختلف مجراها
(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود 42 g/s)

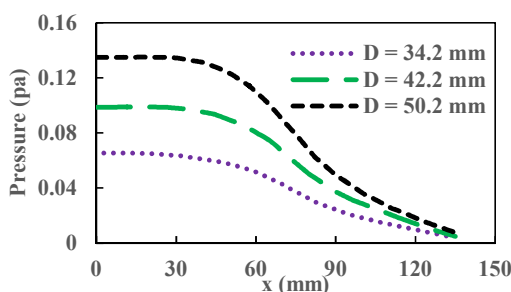


(۱)



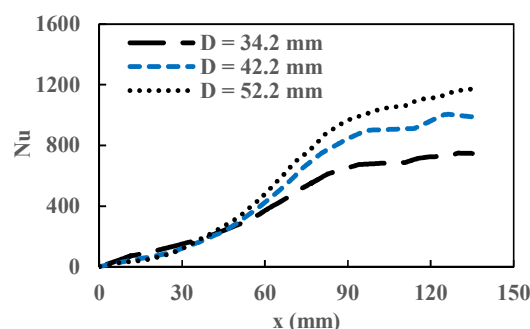
(۲)

- [2] Yekani S. K., Abdi Aghdam E. and Sadeh Moghanlo F., Experimental Study of the Performance Exhaust Gas Emissions Response of a Spark Ignition Engine to Adding Natural Gas to Gasoline in CR=11. *International Journal of Industrial Mathematics*, Vol. 11, No. 4, pp. 307-317, 2019.
- [3] Yekani S. K., Abdi Aghdam E. and Sadeh Moghanlo F., Performance Response of a Spark Ignition Engine to Adding Natural Gas to Gasoline on Lean-Burn Condition in 10 Compression Ratio. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 1691-1699, 2020.
- [4] Rosello M. D., Analytic-Numerical Approach to Flow Calculation in Intake and Exhaust Systems of Internal Combustion Engines. *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 36, pp. 33-45, 2002.
- [5] Suman V., *Simulation of Fluid Flow in Internal Combustion Engines Using Wave Action Simulation*. M.Sc. Thesis, Graduate Faculty of Texas Tech. University, 2004.
- [6] Kesgin U., Study on the Design of Inlet and Exhaust System of a Stationary Internal Combustion Engine. *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, pp. 2258-2287, 2005.
- [7] Liang S. M., An Effective Approach for Calculation of Exhaust Pipe Flows. *Journal of Mechanics*, Vol. 25, No. 2, pp. 177-188, 2009.
- [8] Gopal P. and Kumar T. S., Analysis of Flow through the Exhaust Manifold of a Multi Cylinder Petrol Engine for Improved Volumetric Efficiency. *International Journal of Dynamics of Fluids*, Vol. 5, pp. 5-26, 2009.
- [9] Pravin V., Umesh K., Rajagopal K. and Veena P., Simulative Analysis of Flow through Exhaust Manifold for Improved Volumetric Efficiency of Multi Cylinder Petrol Engine. *World Journal of Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 221-226, 2012.
- [10] Bovo M., *Principles of Heat Transfer in Internal Combustion Engines from a Modeling Standpoint*. PhD thesis, 2014.
- [11] Guardiola C., Olmeda P., Pla B. and Bares P., In-Cylinder Pressure Based Model for Exhaust Temperature Estimation in Internal Combustion Engines. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 115, pp. 212-220, 2016.
- [12] Nour M., Kosaka H., Bady M., Sato S. and Abdel-Rahman A. K., Combustion and Emission Characteristics of DI Diesel Engine Fuelled by Ethanol Injected into the Exhaust Manifold. *Fuel Processing Technology*, Vol. 164, pp. 33-50, 2017.
- [13] Mahabadipour H., Krishnan S. R. and Srinivasan K. K., Investigation of Exhaust Flow and Exergy Fluctuations in a Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 147, pp. 856-865, 2018.
- [14] Otoguro Y., Takizawa K., Tezduyar T. E. and Mei K. N. S., Turbocharger Turbine and Exhaust Manifold Flow Computation with the Space-Time Variational Multi-Scale Method and Isogeometric Analysis. *Computers and Fluids*, Vol. 179, pp. 764-776, 2019.
- [۱۵] قمی س.، طالبی ف. و اسماعیلی اوغاز س.، به کارگیری شبکه دینامیکی و تغییر توپولوژی شبکه در تحلیل جریان سرد در موتورهای احتراق داخلی. نشریه مدل سازی در مهندسی، د. ۹، ش. ۲۵، ص ۵۷-۶۵، ۱۳۹۰.
- [16] Kanawade N. and Siras O., Design, Analysis, and Development of 4-Cylinder IC Engine Exhaust Manifold. *International Engineering Research Journal*, Vol. 3, pp. 472-478, 2015.
- [17] Li X. and Zhang X., Flow Field Analysis and Structure Optimization of Diesel Engine Exhaust Manifold. *Diesel Engine*, Vol. 5, pp. 120-130, 2006.
- [18] Priyadarsini I., Flow Analysis of Intake Manifold Using Computational Fluid Dynamics. *International Journal of Engineering and Advanced Research Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-5, 2016.
- [19] Umesh K. S., Pravin V. K. and Rajagopal K., Experimental Analysis of Dependence of Volumetric Efficiency of Multi-Cylinder SI Engine on Manifold Geometry and Verification of Results Obtained through Analysis at Particular Speed for Different Speed Condition. *International Journal of Engineering and Science Research*, Vol. 4, pp. 312-324, 2013.
- [20] Heisler H., *Advanced Engine Technology*. Butterworth Heinemann Publications, 2002.



شکل ۱۹- توزیع فشار روی خط تقارن عمودی مقطع خروجی چندراهه برای قطرهای مختلف مجراها

(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود $42g/s$)



شکل ۲۰- تغییرات عدد نوسلت بر حسب فاصله عمودی خروجی با تغییرات قطر مجراها

(دبی جرمی محصولات احتراق ورودی به چندراهه خروج دود $42g/s$)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار محصولات احتراق خروجی از چندراهه خروج دود در اثر تغییر متغیرهای مختلف به شکل عددی و با استفاده از نرم افزار Comsol پرداخته شده است. قطر مجراها و قطر مخزن آرامش متغیرهای مساله بوده و تغییر این متغیرها بر توزیع سرعت، فشار و دما به همراه عدد نوسلت جریان محصولات احتراق مطالعه شده است. نتایج عمده عبارتند از: (۱) با افزایش قطر مخزن آرامش در دبی ثابت جریان، عدد نوسلت در مقطع خروجی چندراهه کاهش می یابد، (۲) با افزایش قطر مجراها در دبی ثابت جریان، عدد نوسلت در مقطع خروجی چندراهه کاهش می یابد، (۳) با افزایش قطر مخزن آرامش، جریان سیال داخل مخزن آرامش تمایل به چرخیدن دارد که این امر جریان خروجی از چندراهه را کمتر می کند، (۴) جهت طراحی بهینه می توان از مخزن آرامش با قطر کمتر و مجراها با قطر کمتر در دبی جریان بالا استفاده کرد تا فشار پشت چندراهه به حداقل مقدار ممکن و سرعت جریان به بیشینه مقدار برسد و (۵) در نهایت می توان گفت که معیار عملکرد چندراهه خروج دود کوچکتر بودن قطر مجراها و مخزن آرامش در حالت وجود خم 90° درجه است که باعث افزایش سرعت در خروجی چندراهه و همچنین افزایش انتقال گرما از محصولات احتراق ورودی به آن می شود و از طرفی هزینه ساخت و طراحی را پایین آورده و وزن مجموعه چندراهه کاهش می یابد.

۵- مراجع

- [1] Pulkrabek W. W., *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2004.