

بررسی تأثیر زاویه تزریق گاز بر عملکرد پیش مخلوط کن سوخت و هوا با استفاده از شبیه سازی عددی

رضا زارعی^۱ و محسن دوازده امامی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، rezarei@chmail.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، mohsen@cc.iut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۸/۲/۹، پذیرش: ۹۸/۲/۳۰)

چکیده: در مقاله حاضر، تأثیر زاویه تزریق گاز در جریان هوا برای یک پیش مخلوط کن سوخت و هوا از طریق شبیه سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent و در زوایای تزریقی در محدوده 90° (جریان عمودی) تا 180° (جریان مخالف) انجام گرفته است. برای بیان میزان یکنواختی مخلوط، متغیر شاخص یکنواختی، برای نسبت جرمی متان در مقاطع مختلف خروجی، محاسبه شده است. نتایج نشان داده است که در ابتدا، با افزایش زاویه تزریق تا 165° ، یکنواختی مخلوط خروجی بیشتر می شود. بعد از آن روند تغییرات معکوس شده، ولی دوباره، در حالت جریان مخالف، یکنواختی اندکی افزایش پیدا می کند. همچنین، میزان تأثیرگذاری زاویه تزریق وابسته به عدد رینولدز جریان هواست و با افزایش عدد رینولدز، تأثیر زاویه تزریق بر یکنواختی مخلوط خروجی بیشتر می شود. از طرف دیگر، میزان وابستگی عملکرد پیش مخلوط کن به عدد رینولدز جریان، در ابتدا، با افزایش زاویه تزریق، کاهش می یابد، ولی باز هم با عبور از زاویه 165° دوباره افزایش پیدا می کند.

کلیدواژگان: سوخت، هوا، پیش مخلوط کن، زاویه تزریق، یکنواختی غلظت

مقدمه

احتراق یکی از مهم ترین و کاربردی ترین روش های تأمین انرژی در صنایع و بخش های تجاری و خانگی است و تاکنون تلاش های زیادی، به منظور بهبود، افزایش بازده و در نتیجه کاهش تولید آلاینده های خطرناک، در آن صورت گرفته است. این فرایند ممکن است به دو صورت پیش مخلوط و غیرپیش مخلوط به کار گرفته شود که پژوهش حاضر در حوزه احتراق پیش مخلوط قرار می گیرد. استفاده از احتراق پیش مخلوط، که غالباً به صورت رقیق (هوا بیشتر از مقدار استوکیومتریک) به کار می رود، در فناوری های جدید مثل مشعل های متخلخل و توربین های گاز مدرن [۱] در حال گسترش است. احتراق پیش مخلوط به این معناست که سوخت و هوا باید قبل از ورود به مشعل با یکدیگر مخلوط شوند. فرایند اختلاط سوخت و هوا در یکی از اجزاء سیستم احتراق به نام پیش مخلوط کن^۱ انجام می گیرد و عملکرد آن می تواند نقش بسزایی در بازده احتراق و نرخ تولید آلاینده های خطرناکی مثل CO و NO_x داشته باشد. تاکنون بیشتر تحقیقاتی که در خصوص عملکرد پیش مخلوط کن ها انجام گرفته در حوزه مربوط به توربین های گاز و پیش مخلوط کن های مورد استفاده در آن ها بوده است؛ از جمله مقاله ای که توسط واسیلیف و همکاران [۲]، در سال ۲۰۱۶، منتشر شده و در آن تأثیر کیفیت اختلاط سوخت (گاز طبیعی) و هوا بر میزان تولید اکسیدهای نیتروژن در یک توربین گاز به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، برای اولین بار رابطه بین

1. Premixer

یکنواختی مخلوط و نرخ تولید NO_x به صورت کمی و با تعریف کمیت جدید σ (که معیاری از غیریکنواختی مخلوط است) نشان داده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش σ (افزایش غیریکنواختی مخلوط)، میزان تولید NO_x به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. شکل ۱ رابطه بین غیریکنواختی و میزان تولید NO_x را نشان می‌دهد.

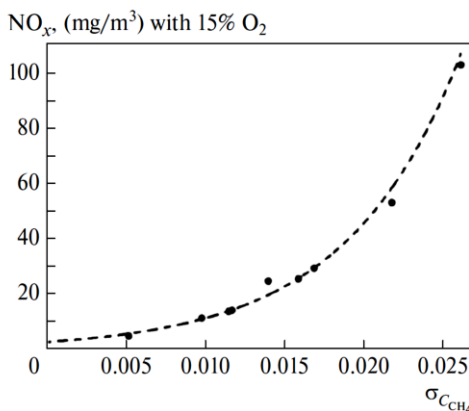


Figure 1- Dependence of the NO_x Emission Values on the Nonuniformity [2]
شکل ۱- وابستگی میزان تولید NO_x به غیریکنواختی مخلوط [۲]

در پژوهش دیگری، ای. آندرینی و همکاران [۳،۴] به بررسی عملکرد مشعل توربین گاز GE 5B1 (ساخت شرکت جنرال الکتریک) پرداخته‌اند. آن‌ها در مقاله اول خود با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود، نتایج چند مدل مختلف عددی که برای شبیه‌سازی جریان به کار برده بودند را با نتایج تجربی مقایسه کردند و در مقاله دوم، با تمرکز روی عملکرد مخلوط‌کننده به شبیه‌سازی جریان در آن با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX و مدل K- ϵ (با ضرایب اصلاح‌شده) پرداخته‌اند. سپس، به منظور اصلاح طرح فعلی مخلوط‌کننده، تغییراتی در سایز و نحوه توزیع سوراخ‌های تزریق سوخت ایجاد شده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که افزایش سرعت جت سوخت و توزیع سوراخ‌های تزریق در چند موقعیت شعاعی مختلف، می‌تواند یکنواختی مخلوط خروجی را افزایش دهد.

در تحقیق دیگری، در خصوص پیش‌مخلوط‌کن یک توربین گاز، بوراتینی و همکاران [۵] جریان خروجی از یک مخلوط‌کننده را از نظر میدان آیرودینامیکی و خصوصیات اختلاطی به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها پروفیل سرعت را با استفاده از روش LDA به دست آوردند. همچنین، آن‌ها در آزمایش‌های خود از مخلوط هوا و نیتروژن اکسید به جای سوخت استفاده کردند و برای به دست آوردن نسبت معادل در نقاط مختلف مقطع خروجی، یک لوله نمونه برداری متصل به آنالیزور نیتروژن اکسید را در نقاط مورد نظر قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که خصوصیات جریان بسیار وابسته به نسبت تکانه جت سوخت به جریان هواست.

در سال ۱۹۹۹، کیم و منون [۶]، در تحقیقی، عملکرد مخلوط‌کننده یکی از توربین‌های گاز شرکت جنرال الکتریک را با استفاده از روش LES^۲ و دو مدل مختلف برای انتقال گونه‌ها در مقیاس زیرشبکه^۳ شبیه‌سازی کردند. هدف این پژوهش آن بوده که توانایی این دو مدل، یعنی مدل گردابه خطی^۴ و مدل پخش گرادیانی^۵، در پیش‌بینی اختلاط اسکالر^۱ و غیریکنواختی‌های مخلوط، مورد ارزیابی قرار گیرد.

1. Laser Doppler Anemometry
2. Large Eddy Simulation
3. Subgrid Scale
4. Linear-Eddy
5. Gradient-Diffusion

علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، که همگی به پیش مخلوط کن‌های توربین‌های گاز پرداخته‌اند، برخی تحقیقات نیز در خصوص پیش مخلوط کن‌هایی برای کاربرد در مشعل‌های صنعتی انجام گرفته‌اند؛ از جمله دو پژوهش زیر که به معرفی و بررسی دو نوع پیش مخلوط کن جدید پرداخته‌اند.

در سال ۲۰۰۹، کاتسوکوی و همکاران [۷] نوعی از مخلوط کننده را معرفی کرده و آن را مخلوط کننده سریع^۲ نامیده‌اند، چراکه طبق ادعای آنان می‌تواند طی چند میلی ثانیه (زمان عبور هوا از مخلوط کننده) مخلوطی با یکنواختی بسیار خوب تولید کند. مخلوط کننده طراحی شده توسط آن‌ها سوخت را با زاویه ۹۰ درجه نسبت به جریان هوا تزریق می‌کند و برای بهبود عملکرد آن در مسیر جریان موانعی به شکل پله‌ای تعبیه شده است. آن‌ها در این تحقیق ابتدا با استفاده از روش RNG K-ε در نرم افزار Fluent، مخلوط کننده مورد نظر خود را مورد تحلیل و بررسی عددی قرار داده و اصلاحات لازم را بر روی مدل اولیه اعمال کرده‌اند. در مرحله بعد، پس از ساخت یک نمونه، مطالعات تجربی خود را بر روی آن به انجام رسانده‌اند و برای بررسی کیفیت عملکرد مخلوط کننده طراحی شده، شعله حاصل از آن را با شعله حاصل از یک مخلوط کاملاً یکنواخت مقایسه کرده‌اند. جیان ژانگ [۸] نیز در پایان نامه خود یک طرح مفهومی کاملاً جدید را برای مخلوط کننده سوخت گازی و هوا معرفی کرد که ایده آن برگرفته از نوعی مبدل حرارتی بوده است. این مخلوط کننده که مخلوط کننده تزریق میکرونی^۳ نامیده شده است، به صورت دو صفحه موازی با سوراخ‌های متعدد است. تعدادی از سوراخ‌ها برای عبور هوا و تعدادی نیز به منظور تزریق سوخت به جریان هوا تعبیه شده‌اند، به نحوی که سوخت با زاویه ۱۸۰ درجه یعنی در جهت مخالف در جریان هوا تزریق می‌شود.

تحقیقات ذکر شده در بالا تنها بخشی از مقالات و گزارش‌هایی‌اند که در مورد پیش مخلوط کن‌ها چه در توربین‌های گاز و چه در مشعل‌ها منتشر شده‌اند، که نشان دهنده اهمیت عملکرد این جزء از سیستم‌های احتراقی است. در یک احتراق پیش مخلوط، نسبت معادل سوخت و هوا نقش تعیین کننده‌ای در نوع و نرخ تولید آلاینده‌ها دارد. در نسبت‌های معادل کوچک به دلیل احتراق ناقص سوخت، هیدروکربن‌های نسوخته و کربن‌مونواکسید (CO) تولید می‌شود و در نسبت‌های معادل بالا به دلیل بالا رفتن دمای شعله نرخ تولید اکسیدهای نیتروژن (NO_x) افزایش می‌یابد. بنابراین، برای اطمینان از انجام احتراق با بازده مناسب، تنها محدوده کوچکی در حدود ۰/۶ برای نسبت معادل قابل استفاده است [۹]. چگونگی تغییر نرخ تولید آلاینده‌ها با نسبت معادل مخلوط در شکل ۲ به صورت طرحواره نشان داده شده است.

با این وجود حتی اگر نسبت معادل کلی سوخت و هوا در محدوده مناسب قرار گرفته باشد ممکن است به دلیل عدم یکنواختی کامل غلظت مخلوط، در نقاطی از محفظه احتراق نسبت معادل به صورت موضعی از حالت بهینه فاصله داشته باشد و احتراق در این نقاط با تولید آلاینده‌های یاد شده همراه شود. لذا، عدم یکنواختی مخلوط تولیدی در پیش مخلوط کن می‌تواند سبب افزایش نرخ تولید آلاینده‌ها و کاهش بازده احتراق شود. این امر بیانگر اهمیت پیش مخلوط کن در عملکرد بهینه سیستم احتراق است.

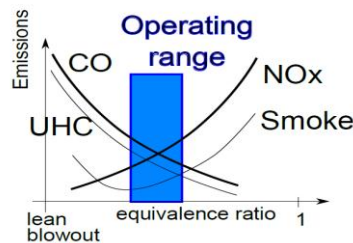


Figure 2- Combustion Emissions Depending on the Fuel/Air Equivalence Ratio [9]

شکل ۲- رابطه بین نرخ تولید آلاینده‌های ناشی از احتراق با نسبت معادل سوخت و هوا [۹]

1. Scalar Mixing
2. Rapid mixer
3. Micro injection fuel/air premixer

پژوهش حاضر بخشی از یک پروژه برای طراحی مخلوط‌کننده سوخت و هوا برای یک مشعل متخلخل ۵ کیلووات بوده و در آن به بررسی تأثیر زاویه تزریق سوخت در هوا بر عملکرد پیش‌مخلوط‌کن طراحی‌شده پرداخته شده است. زاویه تزریق، پارامتر بسیار مهمی در عملکرد پیش‌مخلوط‌کن‌هاست، با این حال، تاکنون تحقیقات بسیار کمی در خصوص آن انجام گرفته است. پیش‌مخلوط‌کن یادشده با هدف ایجاد مخلوط با یکنواختی مناسب طراحی شده است تا نرخ تولید آلاینده‌ها در مشعل متخلخل کاهش پیدا کند. ساختمان آن مطابق شکل ۳ بوده و سوخت از طریق سوراخ‌هایی که روی لوله‌های شماره ۱، ۲ و ۳ تعبیه شده‌اند در مسیر جریان هوا تزریق می‌شود. در شکل ۴، طرحواره‌ای از نحوه چینش سوراخ‌های تزریق گاز نمایش داده شده است. تأثیر زاویه تزریق گاز نسبت به جریان هوا (θ) از طریق شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ANSYS Fluent 16 مورد ارزیابی قرار گرفته و برای این کار از مدل توربولانسی RNG K- ϵ استفاده شده است. گاز طبیعی به صورت متان خالص و هوا نیز به صورت مخلوطی از ۲۳٪ جرمی اکسیژن و ۷۷٪ جرمی نیتروژن وارد شده است. از آنجا که مخلوط‌کن مورد نظر برای تغذیه یک مشعل آزمایشگاهی با ظرفیت کم مورد استفاده قرار خواهد گرفت، مقدار هوای لازم و در نتیجه عدد رینولدز متناظر آن وابسته به توان مشعل است. بنابراین، شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف مطابق جدول ۱ انجام گرفته است.

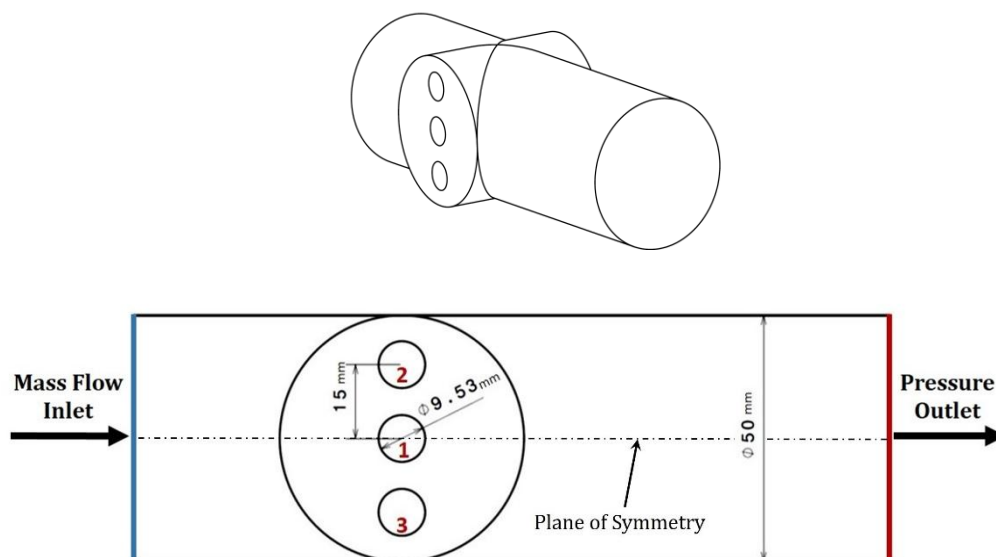


Figure 3- Geometry of the Premixer
شکل ۳- ساختمان پیش‌مخلوط‌کن

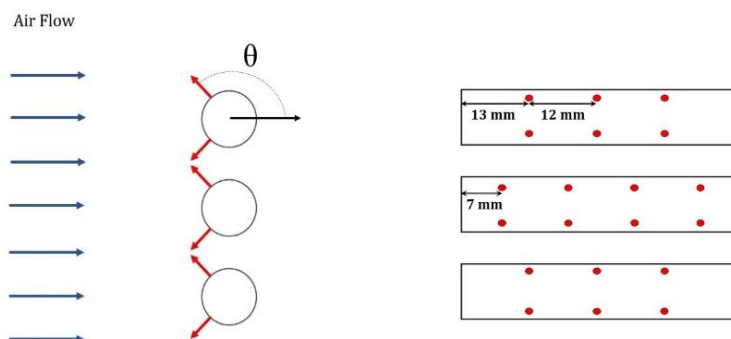


Figure 4- Schematic of Injection Holes Array
شکل ۴- طرحواره آرایش سوراخ‌های تزریق

جدول ۱- پارامترها و مقدار آن‌ها در شبیه‌سازی‌ها
Table 1- Parameters and Their Values in Simulations

Equivalence Ratio	0.5
Burner Power and the Corresponding Air Flow Reynolds Number	2KW & Re _a =2097
	3.5KW & Re _a = 3673
	5KW & Re _a =5245
Injection Angle	90°, 120°, 135°, 150°, 165°, 175°, 180°

معادلات حاکم

با توجه به سه‌بعدی بودن دامنه جریان و همچنین استفاده از مدل RNG K-ε برای مدل‌سازی اغتشاش، شبیه‌سازی جریان در پیش‌مخلوط‌کن با حل معادلات پایای پیوستگی (یک معادله)، تکانه (سه معادله) و انتقال جرم (دو معادله) در کنار دو معادله انتقال k و ε انجام می‌گیرد.

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m \quad (1)$$

در این معادله، ρ چگالی سیال (مخلوط سوخت و هوا)، \vec{V} بردار سرعت و S_m جمله چشمه جرم است.

معادله تکانه:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \vec{F} \\ \bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} I \right] \end{cases} \quad (2)$$

که در آن p فشار، $\bar{\tau}$ تانسور تنش، \vec{F} جمله چشمه تکانه، μ گراند مولکولی و I تانسور واحد است. معادله انتقال جرم برای دو گونه اکسیژن و متان:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i \\ \vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \end{cases} \quad (3)$$

در این دو رابطه، Y_i نسبت جرمی، \vec{J}_i شار جرمی ناشی از دیفیوژن و S_i جمله چشمه گونه i هستند. همچنین، $D_{i,m}$ ضریب دیفیوژن جرمی گونه i در مخلوط و μ_t و Sc_t به ترتیب گراندوی و عدد اشمیت جریان آشفته را نشان می‌دهند.

معادله انتقال k (انرژی جنبشی آشفتگی):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

که در آن k انرژی جنبشی اغتشاشی، a_k معکوس عدد پرانتل انرژی جنبشی اغتشاشی، μ_{eff} گراندوی موثر، G_k تولید انرژی جنبشی اغتشاشی ناشی از گرادیان سرعت میانگین و ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی است.

معادله انتقال ε (نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (5)$$

در این معادله، a_ε معکوس عدد پرانتل اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی و $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ثوابت مدل اغتشاشی RNG k-ε هستند.

حل معادلات، همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شد، با شرط مرزی دبی جرمی ورودی در ورودی هوا، فشار نسبی صفر در خروجی و شرط عدم لغزش در دیواره‌ها انجام گرفت. تزریق گاز در جریان هوا نیز با قراردادن جملات چشمه در معادلات پیوستگی، تکانه و انتقال گونه متان در سلول‌های معینی از شبکه و با استفاده از توابع UDF^۱ انجام گرفت. با شرایط مذکور شبیه‌سازی‌ها در ۵ مورد برای سه شبکه درشت، معمولی و ریز تکرار شد تا استقلال نتایج از شبکه مورد تأیید قرار گیرد. نمودارهای مربوط به نتایج این پنج مورد در پیوست ارائه شده‌اند. ذکر این نکته لازم است که با توجه به تقارن جریان در مخلوط‌کننده (شکل ۳) حول صفحه عبوری از مرکز لوله شماره ۱، شبیه‌سازی‌ها برای نیمی از دامنه کلی انجام شده است، مگر در حالت زاویه تزریق ۱۸۰° که به دلیل قرار گرفتن سوراخ‌های تزریق در صفحه تقارن، کل دامنه جریان شبیه‌سازی شده است.

نتایج

برای بیان کمی میزان یکنواختی مخلوط و مقایسه نتایج حالت‌های مختلف از متغیر شاخص یکنواختی استفاده شده است. این متغیر، یکنواختی یک کمیت (در اینجا نسبت جرمی متان) را در یک مقطع از جریان نشان می‌دهد و به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود [۱۰]. در این رابطه، U نشانگر شاخص یکنواختی، Y نسبت جرمی، ρ چگالی مخلوط، V سرعت و A مساحت مقطع جریان است.

$$U = 1 - \frac{\int_A (|Y_{CH_4} - \overline{Y_{CH_4m}}|) \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}}{2 \overline{Y_{CH_4m}} \int_A \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}} \quad (6)$$

$$\overline{Y_{CH_4m}} = \frac{\int_A Y_{CH_4} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}}{\int_A \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}} \quad (7)$$

با محاسبه متغیر شاخص یکنواختی در فواصل ۳ تا ۱۰ سانتی‌متری از لوله‌های تزریق گاز، نتایج هر حالت از شبیه‌سازی‌ها به دست آمد. این نتایج برای سه عدد رینولدز ۲۰۹۷، ۳۶۷۳ و ۵۲۴۵، که متناظر سه حالت توان مشعل یعنی ۲ kW، ۳/۵ kW و ۵ kW هستند، در نمودارهای شکل ۵ نشان داده شده‌اند. در اینجا عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho_{air} V D}{\mu_{air}} \quad (8)$$

که در آن چگالی هوا، V سرعت هوا در ورودی، D قطر لوله اصلی (۵ cm) و μ_{air} گرانیوی هوا را نشان می‌دهد، البته در اینجا گرانیوی هوا و مخلوط مساوی یکدیگر و برابر $1/72 \times 10^{-5}$ Pa.s در نظر گرفته شده است.

بدیهی است که هرچه فاصله مقطع از محل تزریق بیشتر شود، یکنواختی مخلوط افزایش می‌یابد و البته، همان‌طور که انتظار می‌رود و در نمودارهای شکل ۵ نیز مشخص است، سرعت این افزایش، یعنی شیب نمودار، در ابتدا، نسبتاً زیاد است و به تدریج کاهش پیدا می‌کند. علت این امر زیادبودن شدت آشفته‌گی جریان در نزدیکی محل تزریق و کاهش تدریجی آن در فواصل دورتر است، چراکه آشفته‌گی عامل مهمی در اختلاط دو جریان گاز و هواست.

نمودارهای شکل ۵ همچنین نشان می‌دهند که میزان تأثیر زاویه تزریق بر یکنواختی مخلوط با افزایش عدد رینولدز جریان، افزایش می‌یابد، به طوری که در عدد رینولدز ۲۰۹۷ حداکثر دامنه تغییرات یکنواختی ناشی از زاویه تزریق ۲/۶٪ بوده و این عدد برای رینولدز ۳۶۷۳ به ۵/۳٪ و برای رینولدز ۵۲۴۵ به ۷/۱٪ می‌رسد. علت این تغییرات را می‌توان بدین‌گونه بیان کرد که در اعداد رینولدز پایین، سرعت جریان کم بوده و لذا مدت‌زمان تماس بین ذرات گاز و هوا، که می‌توان از آن به زمان ماند^۲ مخلوط در محفظه پیش‌مخلوط‌کن یاد کرد، بیشتر است یا به عبارت دیگر، ذرات گاز فرصت بیشتری برای نفوذ در بین ذرات هوا دارند. لذا، در این شرایط، تأثیر آشفته‌گی جریان و در نتیجه زاویه تزریق کمتر خواهد بود. این در حالی است که در اعداد رینولدز بالا زمان ماند یا فرصت اختلاط گاز و هوا کمتر است و اهمیت آشفته‌گی جریان در اختلاط افزایش می‌یابد.

1. User Defined Functions
2. Residence Time

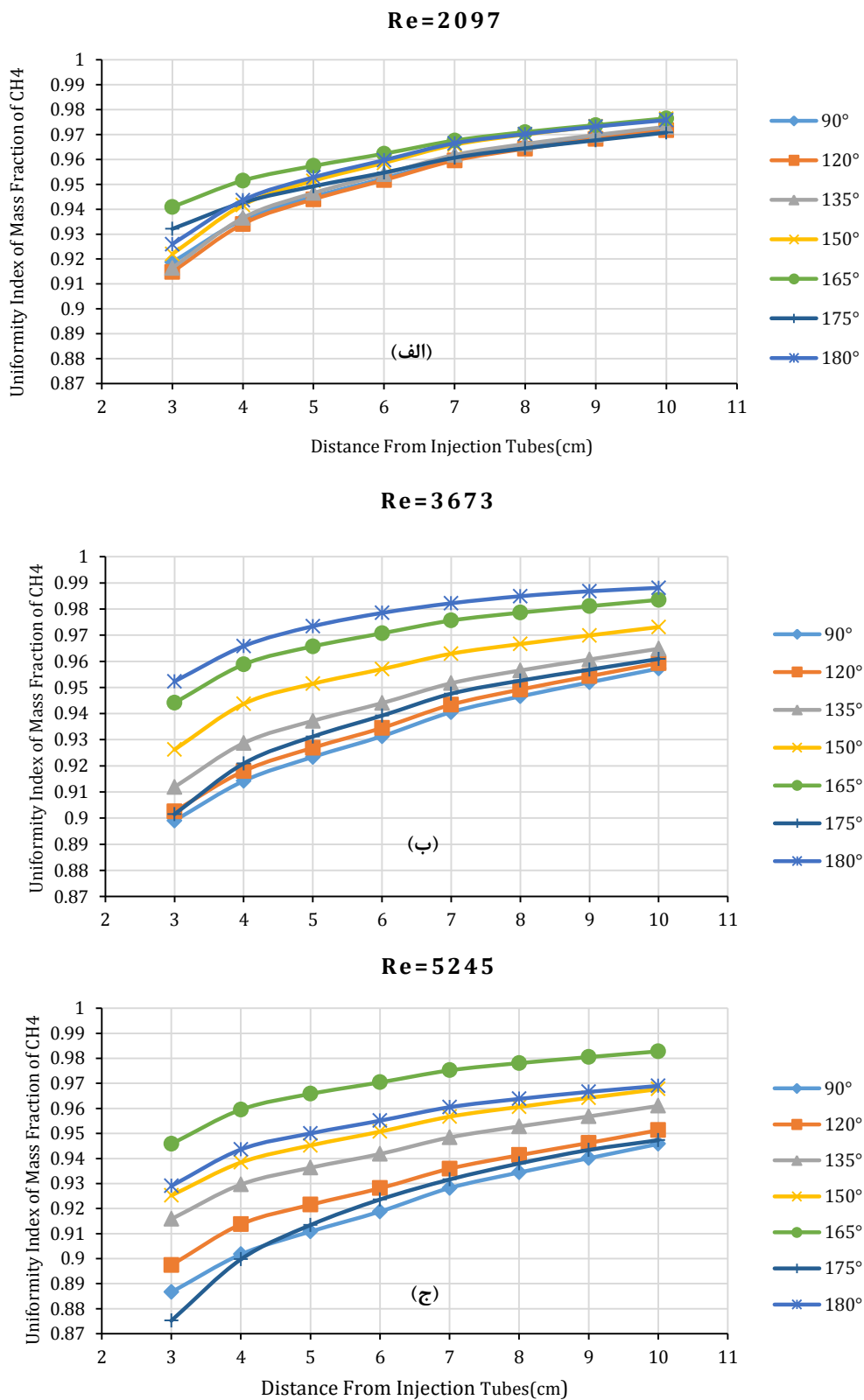


Figure 5- Uniformity Index at Cross Sections 3 to 10 cm Distant From Injection Tubes
 شکل ۵- شاخص یکنواختی در مقاطعی به فاصله ۳ تا ۱۰ سانتی متر از لوله های تزریق برای

نکته دیگری که می‌توان از نمودارهای شکل ۵ دریافت آن است که به‌طور کلی، با افزایش زاویه تزریق، اختلاط به‌نحو بهتری شکل گرفته و یکنواختی مخلوط افزایش می‌یابد، ولی این افزایش تا زاویه 180° ادامه نمی‌یابد و با عبور از زاویه تزریق 165° دوباره یکنواختی مخلوط خروجی دچار کاهش می‌شود. این پدیده در نمودار شکل ۶ به‌صورت واضح‌تر نشان داده شده است. در این نمودار، تغییرات شاخص یکنواختی با زاویه تزریق گاز در مقطعی به‌فاصله 5cm از لوله‌های تزریق برای سه عدد رینولدز مختلف نشان داده است.

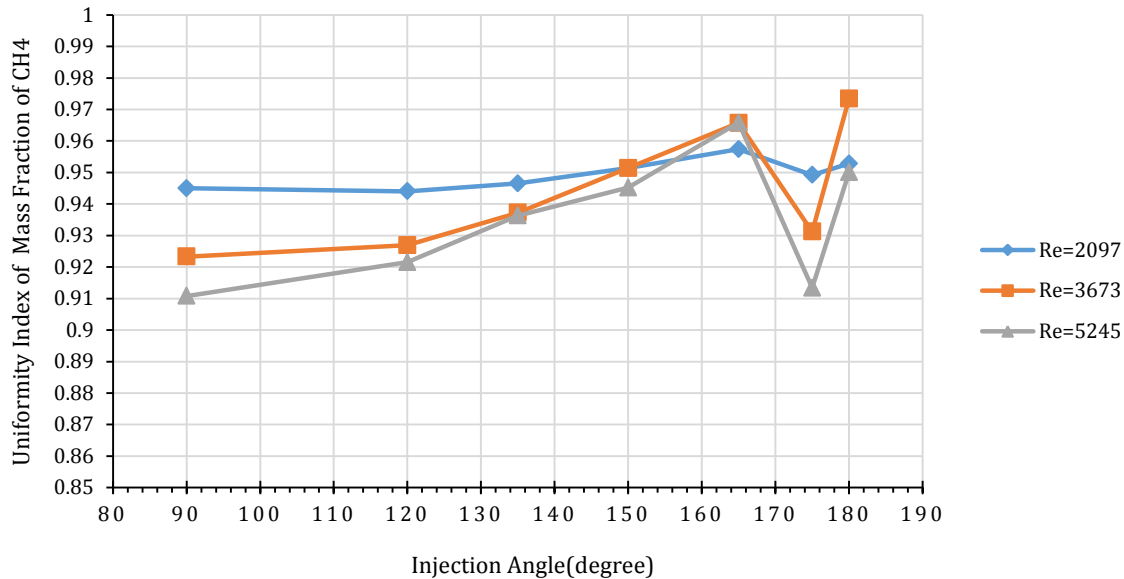


Figure 6- Mixture Uniformity in a Cross Section 5cm Distant From Injection Tubes for Injection Angles from 90° to 180°
 شکل ۶- شاخص یکنواختی در مقطعی به‌فاصله 5cm از لوله‌های تزریق گاز برای زوایای تزریق 90° تا 180°

اما، همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، در زاویه تزریق 180° یکنواختی مخلوط دوباره افزایش پیدا کرده است. مطابق شکل ۴، در زوایای غیر از 180° ، دو ردیف سوراخ تزریق در بالا و پایین هر لوله تعبیه شده‌اند، ولی در زاویه 180° این دو سوراخ با هم ادغام شده و در نتیجه تعداد سوراخ‌های تزریق به نصف دیگر حالت‌ها کاهش می‌یابد، در حالی که قطر سوراخ‌ها تغییر داده نشده است. لذا، در این حالت، سرعت گاز تزریقی و در نتیجه عدد رینولدز جت گاز نسبت به زوایای تزریق دیگر دو برابر می‌شود. این امر، افزایش اغتشاش جریان و در نتیجه بهتر شدن اختلاط سوخت و هوا را در پی دارد. با وجود این، در دو حالت $Re=2097$ و $Re=5245$ یکنواختی همچنان کمتر از حالات نظیر در زاویه تزریق 165° بوده است. ذکر این نکته لازم است که در زاویه تزریق 180° ، به‌علت دو برابر شدن سرعت گاز در سوراخ‌های تزریق، میزان افت فشار گاز در عبور از این سوراخ‌ها نیز چندین برابر می‌شود و این مورد هم نکته‌ای منفی برای زاویه تزریق 180° محسوب می‌شود.

از طرف دیگر، عملکرد پیش‌مخلوط‌کن در توان‌های (اعداد رینولدز) مختلف متفاوت بوده و میزان این تفاوت نیز وابسته به زاویه تزریق گاز است، به‌طوری که مطابق نمودار شکل ۶، در ابتدا، با افزایش زاویه تزریق، اختلاف بین عملکرد پیش‌مخلوط‌کن در توان‌های مختلف کاهش می‌یابد و این کاهش تا زاویه 165° هم ادامه دارد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌توان گفت در زوایای 135° تا 165° تقریباً عملکرد پیش‌مخلوط‌کن یکنواخت بوده، به این معنی که عملکرد آن در توان‌های مختلف مشعل تفاوت چندانی نداشته است. با وجود این، در دو زاویه 180° و 175° این روند معکوس شده و اختلاف بین حالت‌های سه‌گانه عدد رینولدز افزایش یافته است.

با توجه به اینکه پیش‌مخلوط‌کن حاضر در توان‌های بین ۲ تا ۵ کیلووات مورد استفاده قرار می‌گیرد و باید در تمام این بازه دارای عملکرد مناسب باشد، هرچه میزان اختلاف عملکرد در توان‌های متفاوت کمتر باشد، طراحی مطلوب‌تر خواهد بود. همچنین، هدف اصلی این طراحی این بوده که مخلوطی با حداکثر یکنواختی ایجاد کند. با در نظر گرفتن نتایج شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد که هر دو مورد یادشده در زاویه تزریق 165° در حالت بهینه قرار می‌گیرند و لذا بهترین گزینه برای زاویه تزریق گاز در پیش‌مخلوط‌کن مورد بررسی (شکل ۳)، زاویه $\theta = 165^\circ$ است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ANSYS Fluent، به بررسی تأثیر زاویه تزریق گاز در مسیر جریان هوا بر عملکرد یک پیش‌مخلوط‌کن سوخت و هوا پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه تزریق تا 165° می‌توان یکنواختی مخلوط خروجی را بهبود بخشید. با افزایش بیشتر زاویه تزریق، یکنواختی دچار کاهش شده و باز در زاویه 180° به دلیل افزایش عدد رینولدز جت‌های گاز و در نتیجه افزایش اغتشاش، یکنواختی کمی بهبود پیدا می‌کند. همچنین، نشان داده شد که تأثیر زاویه تزریق گاز در اعداد رینولدز بالا از اهمیت بیشتری برخوردار است و با کاهش عدد رینولدز، تفاوت بین عملکرد پیش‌مخلوط‌کن در زوایای تزریق مختلف کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه محدوده کاری مشعل بین ۲ تا ۵ کیلووات است و با تغییر توان مشعل، عدد رینولدز جریان در پیش‌مخلوط‌کن تغییر می‌کند، یکنواختی عملکرد پیش‌مخلوط‌کن در این بازه نیز مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد که در زوایای تزریق کم، تأثیر عدد رینولدز نسبتاً زیاد است و با افزایش زاویه تزریق، ابتدا از تأثیر آن کاسته شده ولی باز هم با عبور از زاویه 165° شرایط تغییر کرده و تأثیر عدد رینولدز جریان بر عملکرد پیش‌مخلوط‌کن مجدداً افزایش می‌یابد. بنابراین، از این نظر نیز زاویه تزریق بهینه در نزدیکی زاویه 165° قرار دارد. با در نظر گرفتن تمامی موارد یادشده از بین زوایای تزریق مورد بررسی، بهترین عملکرد مربوط به زاویه 165° بوده است.

علائم اختصاری

a_e : معکوس عدد پرانتل ε

a_k : معکوس عدد پرانتل انرژی جنبشی اغتشاشی

A : مساحت (m^2)

D : قطر لوله اصلی (m)

$D_{i,m}$: ضریب پخش جرم گونه نام در مخلوط در شرایط جریان آرام (m^2/s)

F : نیروهای حجمی خارجی یا چشمه تکانه (N)

G_k : تولید انرژی جنبشی اغتشاشی ناشی از گرادیان سرعت میانگین (J/m^3-s)

I : شار جرمی ناشی از پخش (kg/m^2-s)

k : انرژی جنبشی اغتشاشی (J/kg)

p : فشار استاتیک (Pa)

Re یا Re_a : عدد رینولدز جریان هوا

S_i : نرخ تولید (چشمه) گونه نام (kg/m^3-s)

S_m : چشمه^۱ جرم (kg/m^3-s)

1. Source

- Sc_t : عدد اشمیت جریان مغشوش
 U : شاخص یکنواختی
 u_i : مولفه نام سرعت (m/s)
 V : سرعت (m/s)
 Y : نسبت جرمی
 ρ : چگالی (kg/m^3)
 μ : گرانیوی مولکولی (Pa·s)
 μ_t : گرانیوی جریان مغشوش (Pa·s)
 μ_{eff} : گرانیوی مؤثر (Pa·s)
 ε : نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی (m^2/s^3)
 θ : زاویه تزریق (degree)

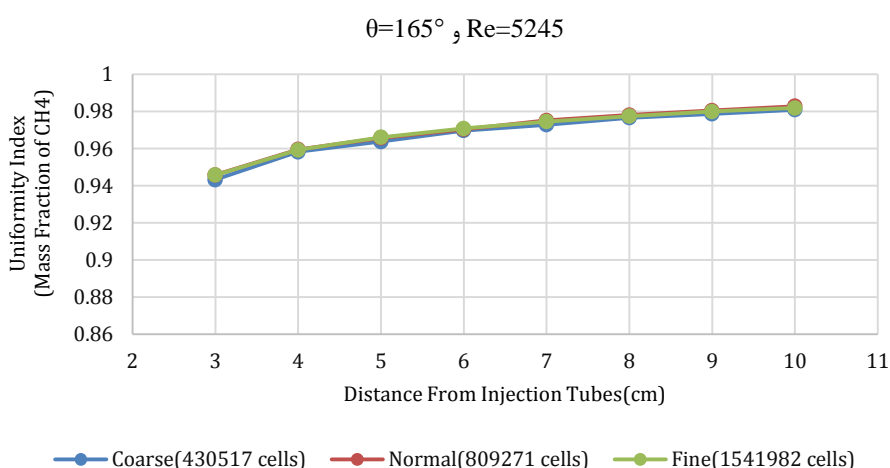
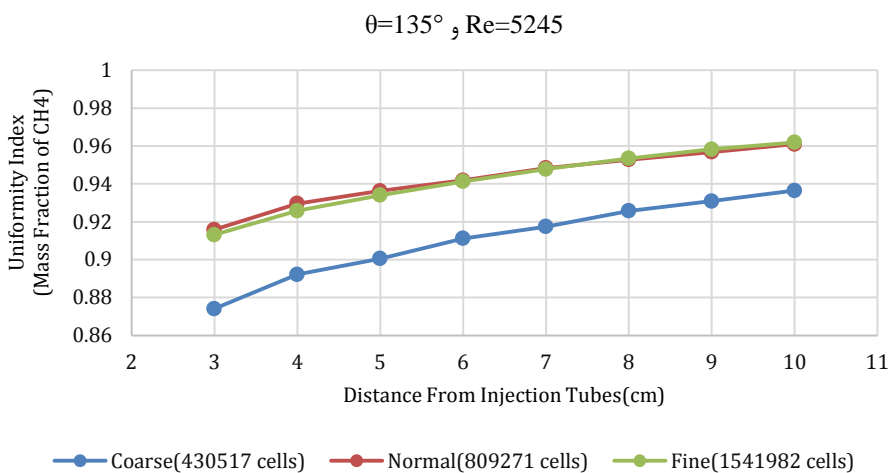
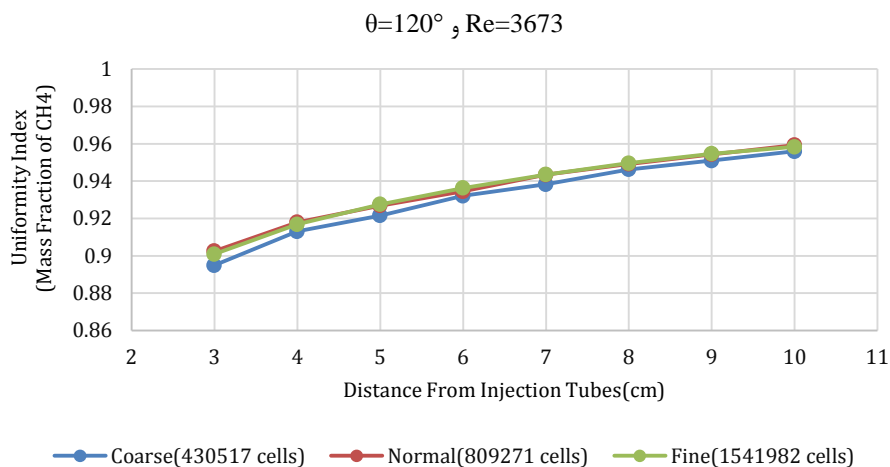
منابع

1. C. Schrödinger, M. Oevermann, O. Krüger, A. Lacarelle and C. O. Paschereit, "CFD Modeling of the Influence of Fuel Staging on the Mixing Quality and Flame Characteristics in a Lean Premixed Combustor," *ASME Turbo Expo 2010 proceedings: Power for Land, Sea, and Air*, No. 43970, 2010, pp. 777–789.
2. V. D. Vasil'ev, L. A. Bulysova and A. L. Berne, "Effect of the air–fuel mixing on the NOx yield in a low-emission gas-turbine plant combustor," *Therm. Eng.*, 63, No. 4, 2016, pp. 246–252.
3. A. Andreini, B. Facchini, A. Innocenti and M. Cerutti, "Numerical analysis of a low NOx partially premixed burner for industrial gas turbine applications," *Energy Procedia*, 45, 2014, pp. 1382–1391.
4. A. Andreini, M. Cerutti, B. Facchini and A. Innocenti, "CFD analysis of NOx emissions of a natural gas lean premixed burner for heavy duty gas turbine," *Energy Procedia*, 81, 2015, pp. 967–976.
5. P. Burattini, A. Talamelli and G. Tanzini, "Experimental analysis of the flowfield at the exit of a premixer for combustion applications," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 28, No. 7, 2004, pp. 781–789.
6. W. W. Kim and S. Menon, "Numerical Modeling of Fuel/Air Mixing in a Dry Low-Emission Premixer," in *Recent Advances in DNS and LES*, 54, 1999, pp. 257–268.
7. K. Masashi, C. Jin-Do, K. Jang-Woo, H. Seung-Min, K. Seung-Mo and A. Chul-Ju, "Development of rapid mixing fuel nozzle for premixed combustion," *J. Mech. Sci. Technol.*, 23, No. 3, 2009, pp. 614–623.
8. J. Zhang, *Micro Injection Fuel / Air Premixer / Combustion*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University, 2007.
9. Lacarelle A., *Modeling, Control, and Optimization of Fuel/Air Mixing in a Lean Premixed Swirl Combustor using Fuel Staging To Reduce Pressure Pulsations and NOx Emissions*, PhD thesis, Berlin, University at the TU Berlin, 2011.
10. Ansys, Ansys Fluent. "14.0 Theory Guide." ANSYS inc, 2011.

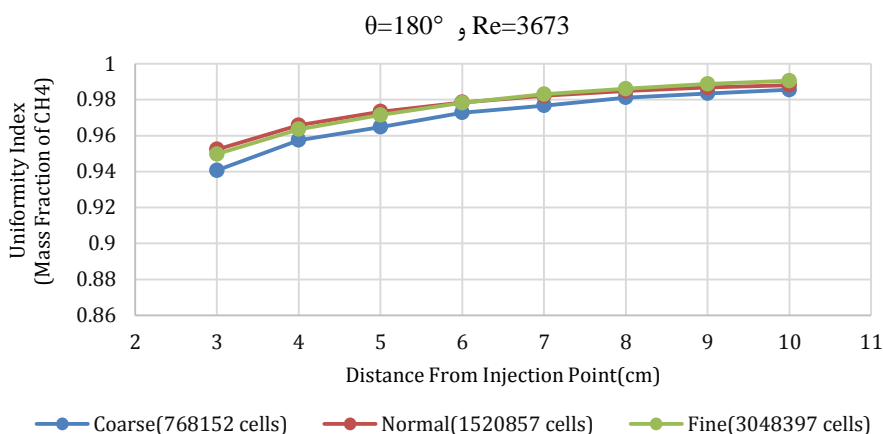
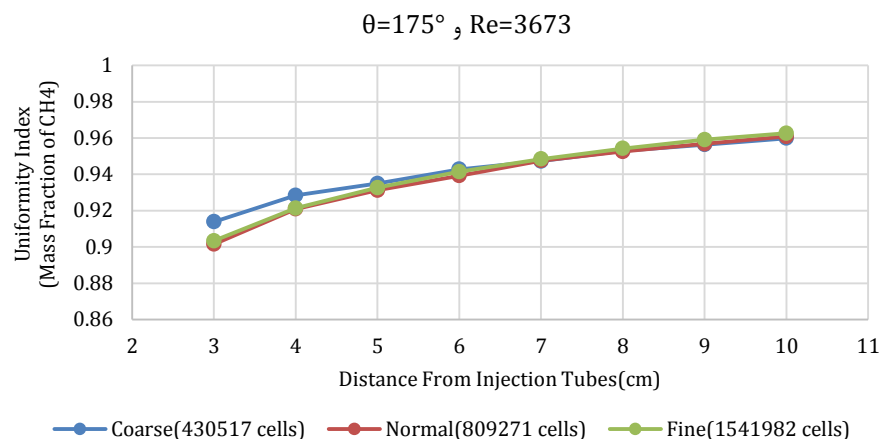
پیوست

مقایسه نتایج برای سه شبکه درشت، معمولی و ریز در ۵ مورد از حالات مختلف شبیه‌سازی‌ها به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه مورد استفاده:

ذکر این نکته لازم است که جریان در مخلوط‌کننده (شکل ۳) حول صفحه عبوری از مرکز لوله شماره ۱ متقارن است و لذا جریان برای نیمی از دامنه کلی شبیه‌سازی شده است. ولی، در حالت زاویه تزریق 180° ، به دلیل قرارگرفتن سوراخ‌های تزریق در صفحه تقارن، کل دامنه جریان شبیه‌سازی شده و از این رو تعداد سلول‌های شبکه مورد استفاده در این حالت تقریباً دوبرابر سایر حالت‌هاست.



Comparison of Results of Coarse, Normal and Fine Grids for Five Cases of Simulations
 مقایسه نتایج برای سه شبکه درشت، معمولی و ریز در پنج مورد از حالت‌های شبیه سازی



Comparison of Results of Coarse, Normal and Fine Grids for Five Cases of Simulations
مقایسه نتایج برای سه شبکه درشت، معمولی و ریز در پنج مورد از حالت‌های شبیه سازی

English Abstract

Investigation of Injection Angle Influence on an Air/Fuel Premixer Performance using Numerical Simulation

Reza Zarei¹ and Mohsen Davazdah Emami^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, rezarei@chmail.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, mohsen@cc.iut.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2019.1.22, Received in revised form: 2019.04.29, Accepted: 2019.05.20)

In the present article, the effect of injection angle of Methane jet into the air stream for an air/fuel premixer has been investigated by numerical simulations. The simulations have been done for injection angles from 90° (cross flow) to 180° (counter flow) by the use of ANSYS Fluent software. Mixture uniformity was determined in terms of uniformity index of CH_4 mass fraction at different outlet cross sections. Results have shown that firstly, mixture uniformity was increased with increase in the injection angle (approaching counter flow situation); after 165° this trend was inverted but in counter flow situation the uniformity increased again. Moreover, it was shown that the injection angle effectiveness depends on airflow Reynolds number and increases with an increase in Reynolds number. In addition, dependence of the premixer performance on Reynolds number at first decreases with increase in injection angle but rises again after the angle of 165° .

Keywords: Fuel, Air, Premixer, Injection angle, Uniformity