مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران ۲۴ و ۲۵ بهمن ۱۳۹۶، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف FCCI-2018-1076

> بررسی عددی اثر زاویه پرههای جهت دهنده هوا و نازلهای پاشش سوخت بر میزان تولید آلایندهها در یک مشعل Low-NOx صنعتی

> > **سیدہ فاطمہ حسینی** *فارغ التحصیل کارشناسی مہندسی مکانیک دانشگاہ شہید بہشتی* faezeh_h100@yahoo.com

سید محمدرضا شبیری ^فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی مکانیک دانشگاه شهید بهشتی pashashobeir@gmail.com

جواد امینیان استادیار، مهندسی مکانیک و انرژی دانشگاه شهید بهشتی j_aminian@sbu.ac.ir مسئول مکاتبات

چکیدہ:

در این تحقیق به بررسی تأثیر زاویه پرههای جهت دهنده هوا و نازلهای پاشش سوخت، بر رفتار جریان، نرخ انجام واکنش شیمیایی احتراق، توزیع دمای و نرخ تولید آلایندههای NOX و CO در یک مشعل منعتی Low-NOX پرداخته شده است. اکساینده مورد استفاده در فرآیند احتراق، هوایی با درجهٔ حرارت هوای احتراق در نیروگاهها ($^{\circ}$ ۰۰ ($^{\circ}$ ۲۰۰ وسوخت مصرفی نیز گاز متان در نظر گرفته شده است. یک محفظه احتراق مربوط به بویلر کمکی نوع D به همراه مشعل آن، به صورت سه FLUENT ارمافزار Design Modeler تولید و با نسخه ۲۶ نرمافزار FLUENT بعدی در نرمافزار Toter مده است. نتایچ نشان می دهد که با تغییر زاویه پرههای جهت دهنده هوا و نازلهای پاشش سوخت نقطه بهینه ای را می توان یافت که در آن شعله وضعیت مناسبتری به لحاظ نرخ فلاکس حرارتی و میزان تولید آلایندهها نسبت به دیگر حالتها دارد. تغییر زاویه پرههای جهتدهنده هوا از ۴۵ به ۳۰ درجه، و همچنین تغییر زاویه نازلهای پاشش سوخت از ۳۰ به ۱۰ درجه هر دو موجب کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن می شوند.

کلمات کلیدی: مشعل Low-Nox صنعتی، احتراق آشفته، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل احتراقی، تحلیل عددی

مقدمه

على رغم جستجوى فراوان براى دستيابى به منابع انرژى جديد، احتراق همچنان روش رایج تولید انرژی در صنایعی مثل فراوردههای متالوژی و تولید توان می باشد. از این رو عمده تلاشها بر روی بهینه سازی طراحی تجهیزات احتراقی جدید، شامل نمونههای مختلف مشعلها، متمرکز شده است. طراحی مشعلی با توان حرارتی بالا که میزان تولید آلایندهها را نیز به مقدار مناسب کاهش دهد، در صنعت رو به رشد کشور میتواند کاملاً راهگشا باشد. امروزه استفاده از جریان چرخشی در مشعلها یکی از روشهای بسیار مناسب جهت افزایش راندمان احتراق، بهینه سازی نحوه اختلاط سوخت و هوا میباشد [۱]. وجود میدان جریان چرخشی برای هوای احتراق، میتواند تامین کننده این نیاز از طریق سرعت بخشیدن به اختلاط ترکیبات واکنشزا و همچنین ایجاد نواحی گردشی که در این نواحی دمای ترکیبات برای مدت زمانی نسبتا طولانی بالا میماند باشد [۲ و ۳]. بنظر میرسد که با توجه به اهمیت فرآیند احتراق در سیستمهای توليد توان، دامنه استفاده از نتايج اين تحقيق در صنايع مرتبط از جمله نیروگاههای حرارتی کشور، بسیار گسترده باشد. بدیهی است که بررسی نتایج عددی بدست آمده در خصوص عملکرد مشعل ها، تحت تاثیر جریان هوای چرخشی، باعث عمیقتر شدن شناخت فیزیکی عملکرد مشعلهای

نیروگاهی شده که بهره گیری مناسب از آن می تواند موجب کاهش قابل توجه خسارات اقتصادی و نیروی انسانی گردد. با وجود پیشرفتهای زیاد در سطح شبیه سازی محاسباتی، تست مشعل نقش کلیدی در بهبود مشعلها ایفا می کند که این مربوط به محدودیتهای مدلهای جریان می باشد. پیش بینی های دقیق تر خصوصیات شعله، بسیار پیچیده هستند. به همین دلیل تستها برای طراحی مشعلهای جدید مورد نیاز هستند و اهدافشان شامل تعیین رنج کاری، خصوصیت و طول شعله، اندازه گیری سطوح انتشارات، اندازه گیری سطح اختلال و غیره است.

حسینعلی پور و همکارانش به شبیه سازی عددی یکی از مشعل های نیروگاهی با استفاده از ابزار CFD پرداختند و تاثیر برخی عوامل موثر بر کارکرد آن را بررسی کردند. از مهمترین نتایج استخراج شده در این مطالعه می توان به کاهش درجه حرارت لولههای گاز با زیاد شدن زاویه یرههای هوای اولیه و افزایش دمای این لولهها و میزان NOx تولیدی در حالت بسته شدن مسیر هوای ثالثیه اشاره نمود. با مراجعه به نتایج مشاهده گردید که با افزایش زاویه پرههای مسیر هوای اولیه، افت در مسیر هوای اولیه کمتر شده و دبی بیشتری از هوا از روی لولههای گاز عبور میکند. لذا با افزایش زاویه پرههای مسیر هوای اولیه، کاهش درجه حرارت لولههای گاز مشاهده گردید. از طرفی بسته بودن مسیر هوای ثالثیه باعث افزایش قطر شعله شده که علیرغم ثابت بودن درجه حرارت شعله، تشعشع بیشتری را به لولههای گاز انتقال داده و به میزان قابل توجهی درجه حرارت آنها افزایش مییابد. اما پارامتر دیگری که مورد توجه قرار گرفت آلودگی NOx بود. در زوایای ۴۵، ۳۳ و ۶۳ درجه NOx تولیدی تقریباً مشابه بود. اما با بسته شدن مسیر هوای ثالثیه، امکان خنککاری شعله از بین رفته و افزایش درجه حرارت منجر به افزایش NOx تولیدی گردید [۴]

سعادتی و روشنی به بررسی تاثیر زاویه و سرعت تزریق سوخت مشعلهای نیروگاهی بر پارامترهای احتراق پرداختند. در این مقاله تلاش گردیده، تاثیر زاویه و سرعت پاشش یک نوع سوخت جامد، بر پارامترهای احتراق از قبیل شکل شعله، توزیع دمایی و نرخ تولید آلاینده CO بررسی شود. بدین منظور یک محفظه احتراق، به صورت سه بعدی با در نظر گرفتن جزئیات اغتشاش جریان و مدل احتراق پس مخلوط ، مدل شده است. نتایج شبیهسازی نشان از تغییرات عمده پارامترهای احتراق، در اثر تغییر زاویه و سرعت پاشش سوخت میدهد. با تغییر این دو پارامتر نقطه بهینهای را میتوان یافت که در آن شعله وضعیت مناسبی نسبت به دیگر حالتها دارد. مشاهده میشود با افزایش زاویه تزریق سوخت، تواند تا حدی موجب بهبود وضعیت شعله و افزایش میابد. این مساله میتواند

FCCI-2018-1076

افزایش حجم تشعشعی گردد. همچنین افزایش زاویه تزریق با هدف بهبود وضعیت شعله، دارای حد بیشینهای است و پس از عبور از این حد، به دلیل وقوع پدیده هایی همچون برگشت شعله، موجب کاهش دمای شعله و نرخ تولید حرارت می گردد و با افزایش سرعت تزریق، تاثیر پذیری میدان جریان از حرکت ذرات نیز بیشتر می شود و به واسطه افزایش نرخ تبخیر سوخت و اختلاط آن با هوا، دمای شعله نیز افزایش می یابد [۵].

وریزیمو و همکارانش به بررسی نمودارهای دمایی NOX و CO و OD در ورودی حرارتی^۱ مختلف (از ۲ تا ۱۳ kW) پرداختند و با افزایش دمای ورودی، هستهی احتراق افزایش میابد و با افزایش میزان مومنتوم، جت مرکزی به سمت انتهای محفظه احتراق حرکت میکند و میزان CO هم با افزایش دمای ورودی، افزایش میابد [۶].

زاد غفاری و همکارانش در تحقیقی به شبیه سازی عددی اثر تغییر زاویه تزریق سوخت بر روی پارامترهای مختلف احتراق پرداختهاند [۷]. این مطالعه بر روی یک مشعل گاز سوز پیش اختلاط نیافته انجام شده است. مشعل شبیه سازی شده دارای با نازلهایی است که امکان تزریق سوخت با زوایای مختلف را دارد. هر برنر تیپ دارای سه سوراخ میباشد که هر کدام میتوانند زوایای مختلفی داشته باشند. در این تحقیق روی زوایای ۲۰ تا ۹۰ درجه مطالعه شکل گرفته است. نتایج این مقاله نشان میدهد میزان انتشار ۸۰ و CO حاصل میشود و همچنین حرارت یکنواخت و مورد قبولی در داخل محفظه احتراق وجود دارد. برای زاویه تزریق ۸۰ درجه برای همه نازلهای تزریق سوخت، با توجه به کانتورهای^۲ دما و شکل شعله به دست آمده، مشاهده میشود که توزیع درست حرارت در به افزایش دبی سوخت میباشد. این امر با بهینهسازی مصرف سوخت به افزایش دبی سوخت میباشد. این امر با بهینهسازی مصرف سوخت مغایرت داشته و توجیه اقتصادی ندارد.

معصومی و آبروشن در پژوهشی، اثر تغییر زاویه مشعلهای دیگ بخار بر روی متغیرهای جریان گازی و فرایند احتراق به صورت عددی بررسی کردند. بدین منظور دیگ بخار نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی بندرعباس با ابعاد واقعی در نرمافزار فلوئنت شبیهسازی شده است. متغیرهای احتراق و جریان سیال برای زوایای مختلف مشعلها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدهاند. نتایج نشان میدهد که تغییر زاویه مشعلها راهکار مناسبی برای کنترل شعلهها و دمای قسمتهای مختلف دیگ بخار و درنتیجه نظر از جهت زوایا، افزایش زاویه مشعل باعث افزایش نرخ احتراق در نزدیکی مشعل شده، اما به دلیل هندسه محفظه احتراق توزیع دمای دیگ به ازای زوایای مثبت یکنواختتر است [۸].

تشريح صورت مسئله و هندسه

در این تحقیق به بررسی اثر تغییر زاویه پرههای جهتدهنده هوا و نازلهای پاشش سوخت بر میزان تولید اکسیدهای نیتروژن و همچنین بر دیگر پارامترها نظیر میدان سرعت، میدان دما و دیگر اجزا پرداخته شده است. برای تولید هندسه و شبکه بندی هندسه، از نرم افزار انسیس ورک

بنچ^۲ و برای حل دامنه محاسباتی، از نرم افزار فلوئنت^۲ استفاده شده است. شکل۱- نمونهای از مشعل تعبیه شده در بویلر کمکی نوع D را نشان میدهد.



شکل-۱ مشعل به کار رفته در بویلر کمکی نوع D

مشعل مورد بررسی دارای سه ورودی هوا با نامهای هوای اولیه چرخشی[°]، هوای اولیه محوری[°] و هوای ثانویه چرخشی^۷ میباشد (شکل-۲).



شکل-۲ لولههای ورودی سوخت و مجراهای تزریق هوای مشعل

این مشعل دارای شش لوله حامل سوخت میباشد. قطر لولههای سوخت ۶۰،۳ میلیمتر است. هر لوله دارای یک یا دو نازل پاشش سوخت است که آرایش آنها به صورت یکی در میان است (شکل-۳). همچنین، طول لولههای حاوی سوخت ۱۷۰۶/۱ میلیمتر میباشد.



شکل-۳ نمای روبروی مشعل Low-NOx صنعتی

² Contour هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف

¹ Thermal input

³ Ansys Workbench 17.2

⁴ Fluent 16

⁵ Swirling Primary Air

⁶ Axial Primary Air

⁷ Swirling Secondary Air

FCCI-2018-1076

مشعل شبیه سازی شده دارای چهار نوع پره است که در شکل-۳ قابل مشاهده است. این پرهها به پرههای 'Low-NO_x، پرههای جهت دهنده⁷ و پرههای چرخشی^۳ تقسیم میشوند. پرههای جهت دهنده در دو قسمت در مسیر هوای ورودی ثانویه به کار رفتهاند.

شکل-۴، هندسه مشعل شبیه سازی شده را نشان میدهد.



شکل-۴ هندسه مشعل Low-NOx صنعتی

در شکل-۵ نمایی از محفظه احتراق شبیه سازی شده، نشان داده شده است. شکل هندسی این محفظه مستطیلی و طول آن، ۱۰۴۴۳ میلیمتر است. همچنین، عرض این محفظه احتراق ۴۵۲۴٫۹ میلیمتر و ارتفاع آن، ۲۵۱۶،۶ میلیمتر است. خروجی این محفظه احتراق، مستطیلی شکل و به طول ۱۳۱۶ میلیمتر در نظر گرفته شده است.



شكل-۵ محفظه احتراق شبيه سازي شده

شبکه بندی هندسه

پس از مدل سازی هندسه مسئله، در ماژول مشینگ[†] نرم افزار انسیس، شبکه بندی هندسه انجام گرفته است. هندسه مشعل مدل سازی شده با حدود ۵۳۶ هزار سلول عمدتاً شش وجهی^۵ شبکه بندی شده است که جزئیات آن در شکل-۶ قابل مشاهده است.



شکل-۶ شبکه بندی هندسه داخلی مشعل

همان طور که در شکل-۶ مشاهده می شود، لوله های مشعل با اسفاده از سلولهای شش وجهی و مابقی هندسه که مربوط به ورودیهای هوا میباشند، به دلیل پیچیدگی هندسه با استفاده از سلولهای چهار وجهی شبکه بندی شدهاند.

همچنین، شبکه بندی هندسه محفظه احتراق با استفاده از سلولهای شش وجهی ساختار یافته^۲ و روش جاروبی[^] صورت گرفته است. در این روش، سلول های نزدیک به مشعل، بسیار کوچک اند و هر چه از مشعل به سمت انتهای محفظه احتراق پیش میرویم، اندازه سلولها بزرگتر می گردد. علت استفاده از روش جاروبی این است که از آنجایی مقادیر حل در نزدیکی مشعل از اهمیت بالایی برخوردارند، دقت محاسبات در این ناحیه بسیار مهم است. تمهيدات فوق موجب كاهش تعداد سلولها و در نتيجه پايين آمدن هزینه محاسباتی میگردد.

معادلات حاكم

با اینکه مقیاسهای کوچک، جهانی هستند، مقیاسهای بزرگ، به شدت از هندسه تأثير میپذیرند. توسعه مدلی که بتواند اثر کلی ناحیه وسیعی از مقیاسها را به درستی بیان کند، مشکل است. در روش RANS، معادلات ناویر-استوکس که متوسط گیری زمانی شدهاند، حل میشوند. در این روش، تنشهای رینولدز که به صورت مجهول در معادلات هستند، با استفاده از یک مدل آشفتگی، مدل سازی می شوند. رایج ترین مدلی که در روش RANS استفاده می شود، مدل اتلاف گردابه ^۱ است که از اصلاح مدل شكست گردابه ' به دست آمده است. مدل پیشرفته EDC، طرح گسترشیافتهای از مدل Eddy Dissipation برای واکنشهای غیر سریع در میدان های جریان متلاطم است. در این مدل، هر واکنش، با کلیه جزئیات آن در نظر گرفته می شود و فرض بر این است که واکنش، در ساختارهای بسیار کوچک گردابهای رخ میدهد. مدل EDC، یکی از دقیقترین و مناسب ترین روش ها برای مدل سازی واکنش احتراق در جریان های متلاطم بوده که البته، در هنگام استفاده از آن در شبیهسازی عددی میدان، لازم است که به منظور جلوگیری از گسترش خطای گرد کردن در دامنه حل، از محاسبات با دقت مضاعف استفاده گردد [۹].

در روش ناویر ⊣ستوکس میانگین گیری شده رینولدز، تنشهای رینولدز که به صورت مجهول در معادلات هستند، با استفاده از یک مدل آشفتگی مدل

> ¹ Low-NO_x Baffles ² Guide Vanes ³ Swirler ⁴ Meshing

- ⁵ Hexahedron

هفتمين كنفرانس سوخت و احتراق ايران، ٢۴و ٢۵ بهمن ماه ١٣٩۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

⁶ Pyramid

- Structured
- 8 Sweep Method
- ⁹ EDM
- 10 EBU

سازی میشوند. در این روش، متغیرهای جریان در معادلات ناویر⊣ستوکس به دو قسمت متوسط و نوسانی تقسیم میشوند:

$$\varphi = \varphi' + \overline{\varphi} \tag{1}$$

که در آن
$$ar{arphi}$$
 میانگین زمانی پارامتر و $oldsymbol{arphi}$ کمیت نوسانی است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \right) = 0 \tag{(Y)}$$

$$\tau_{ij} = -\rho u_i \dot{u}_j = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \tag{(7)}$$

۲ تانسور تنش مولکولی (که شامل هر دو مولفه تنش عمودی و برشی می شود.) و *pu*_iu تنش های رینولدزی اند.این ترمها، از ترم همرفتی غیر خطی در معادلات اصلی بوجود آمدهاند.

فرآیند میانگین گیری، یک ترم اضافی(تنش رینولدز
$$\tau_{ij}$$
) تولید میکند:
(۴) $au_{ii} = \overline{u'_i u'_i}$

که مجهول بوده و باید با استفاده از مدلسازی آشفتگی، مدل شود. دو مدل مجزا برای مدل سازی تنش های رینولدز وجود دارد: مدل لزجت گردابه و مدل تنش رینولدز¹. در مدل دوم، تنش های واقعی حل می شوند؛ می شوند؛ در حالیکه در مدل اول، فرضیه بوزینس^۲ برای تخمین تنش رینولدز به کار می رود.

با توجه به وجود ترمهای تنش رینولدزی در معادله مومنتوم، انتخاب روشی مناسب برای مدلسازی آنها، از بخشهای مهم و ضروری در شبیه سازی دقیق جریان های متلاطم می باشد. با توجه به چرخشی بودن جریان مورد بررسی و اینکه در این حالت، ویسکوزیته جریان متلاطم غیر ایزوتروپ می باشد، لذا استفاده از روش RSM برای مدل کردن تنشهای رینولدزی توصیه می گردد [۱۰] و [۱۱]. با استفاده از متوسط گیری در معادلات ناویر – استوکس، معادله انتقال تنش رینولدز بصورت ذیل بدست می آید:

$$\overline{u_{k}}\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_{k}} = -\tau_{jk}\frac{\partial\overline{u_{i}}}{\partial x_{k}} - \tau_{jk}\frac{\partial\overline{u_{j}}}{\partial x_{k}} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} - D_{ij} + v\nabla^{2}\tau_{ij}$$
(Δ)

که درآن Π_{ij} و \mathcal{F}_{ij} تانسورهای فشار-کرنش، تلفات و پخش جریان متلاطم می باشند. برای مدل کردن Π_{ij} در جریان چرخشی، اسپزیال و همکارانش مدل SSG را که بر اساس فرم مرتبه ۲ می باشد، توصیه کردهاند \mathcal{F}_{ij} . [۱۲] و \mathcal{F}_{ij} با فزض همگن بودن [۱۳] و D_{ij} بر اساس مدل دالی و هارلو [14] مدل می شوند.

مدل آشفتگی Standard k-e

این مدلها، دو معادله دیفرانسیل را حل میکنند و به معادله k که موجود بود، معادله ٤ هم اضافه میشود. معادله انرژی جنبشی(k)، بیان کننده مقیاس سرعت است؛ به این صورت که اگر قرار باشد سرعتهای نوسانی مورد بررسی قرار گیرند، میتوان جذر انرژی جنبشی حاصل از آشفتگی در واحد جرم را به عنوان مقیاس در نظر گرفت. معادله نرخ میرایی انرژی جنبشی(٤) نیز مقیاس طول است. در حقیقت، مقیاس طول، اندازه گردابههای بزرگ دارای انرژی جنبشی را میدهد که باعث انتقال آشفتگی در توده سیال میشود.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \left(\varepsilon \right)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}$$

$$k^{-2}$$
(Y)

$$\mu_{t} = C\rho v l = \rho C_{\mu} \frac{k^{2}}{\varepsilon} \tag{(A)}$$

در این معادلات G_k بیانگر انرژی جنبشی توربولانت تولید شده ناشی از گرادیانهای سرعت متوسط، G_b انرژی جنبشی توربولانت تولید شده ناشی از شناوری و بیانگر نوسانات تأخیر در توربولانت تراکم پذیر می باشد و اثرات تراکم پذیری را بیان می کند. همچنین، $G_{1,a}$, $C_{2,a}$, $C_{1,a}$ ثابتهای مدل هستند و σ_c , σ_c به ترتیب اعداد پرانتل مربوط به k و می باشند. پارامتر ($\frac{k^2}{\epsilon}$) به ترتیب اعداد پرانتل مربوط به می باشند. پارامتر ($\frac{k^2}{\epsilon}$) به ترتیب اعداد پرانتل مربوط به می باشند. پارامتر ($\frac{k^2}{\epsilon}$) به ترتیب اعداد پرانتل مربوط به می باشند. پارامتر ($\frac{k^2}{\epsilon}$) به ترتیب اعداد پرانتل مربوط به می باشند. پارامتر (تراح به می باز فرایب موثر g که از معادلات بالا استخراج می شوند، قابل برآورد است. در واقع، هدف از حل دو معادله فوق، تعیین g می می باشد که از حل معادلات فوق و با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

$$\mu_e = \mu + C_\mu \rho \frac{k_2}{\varepsilon} \tag{9}$$

که μ_e ویسکوزیته موثر است.

شرایط مرزی ورودی برای k و \mathcal{E} نیز از رابطههای زیر تخمین زده می شود:

$$\tilde{k}_{inlet} = \frac{3}{2} \left(\left| \tilde{\vec{U}}_{inlet} \right| I_{i} \right)^{2}$$
^(1.)

$$\tilde{\varepsilon}_{inlet} = C_{\mu}^{3/4} \frac{\tilde{k}_{inlet}^{3/4}}{0.07 D_h} \tag{(11)}$$

فرضيه بوزينسك

بسیاری از مدلهای آشفتگی بر پایه این فرضیه استوار هستند. با افزایش نرخ میانگین تغییر شکلها، آشفتگی افزایش مییابد. فرضیه بوزینسک بیان میکند که میتوان تنشهای رینولدز را به نرخ میانگین تغییر شکلها ارتباط داد [۱۵]. مشابه جریانهای آرام، بوزینسک با معرفی ایده ویسکوزیته گردابی [۱۶]، رابطهای خطی میان تنشهای رینولدزی و گرادیان سرعتهای متوسط متناظر آن در نظر گرفت. این مدل، از روشهای شبیهسازی تلاطم بر اساس ایده ویسکوزیته گردابهای بنا نهاده شده است.

تنشهای ویسکوزیته:
=
$$\mu e_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$
 (۱۲)

 τ_{ii}

$$\tau_{ij} = -\rho u_i u_j = \mu_i \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

¹, ریسکوزیته آشفته نامیده شده و واحد آن، پاسکال ثانیه است. اگر تجزیه رینولدز به معادلات ناویر-استوکسی اعمال شود، در نتیجه معادلات ناویر-استوکس میانگین گیری شده رینولدز حاصل می شود. تفاوت میان این معادلات با معادلات اصلی این است که معادلات RANS، شامل کمیتهای متوسط گیری شده زمانی نیز است.

برای شبیه سازی فرآیند انتقال اجزاء مختلف و واکنش میان آن ها، از مدل Species Transport استفاده می شود. در مدل ذکر شده، معادلات

² Joseph Boussinesq هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف

¹ RSM

FCCI-2018-1076

بقاء، روابط بین جابجایی و پخش ذرات و همچنین، منابع انجام واکنش برای هریک از انواع اجزاء موجود در دامنه، حل می گردد.

با توجه به استفاده از روش حجم محدود در هنگام تحلیل عددی، معادلات حاکم بر میدان جریان به صورت بقائی در نظر گرفته می شوند. از آنجا که عدد رینولدز میدان جریان بالا می باشد، لذا، رژیم جریان کاملاً متلاطم بوده که در نتیجه، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت ذیل خواهند بود:

معادلات پیوستگی و ممنتوم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = s^m \tag{11}$$

که ho ، دانسیته جریان، u_i ، اجزاء سرعت در جهت x_i و x_i^m ، منبع جرمی تولید شده به وسیله یک بنیان حجمی است.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = B_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \times \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + S_i^u$$

p، فشار محلی، μ ، ویسکوزیته دینامیکی، $S_i^{"}$ ، مومنتوم منابع در جهتهای تولیدی، B_i ، نیروهای بدنه فعال در سیال هستند.

معادله انرژی

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \left(\frac{\partial}{\partial x_j}\right) \left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_i p}{\partial x_i} \Phi + S^h$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18)$$

$$(18$$

$$\Phi = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$
(1V)

شبیهسازی فرآیندهای احتراقی آشفته غیر پیش آمیخته، یک طرح مؤثر برای مدلسازی همزمان مخلوط و واکنشهای مربوط به اجزاء شیمیایی نیاز دارد. معادله پایستگی دیفرانسیلی جزئی، برای هر جزء شیمیایی چنین است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e \partial m_i}{\sigma_m \partial x_i}\right) + R_i + S_i \tag{14}$$

که m_i ، کسر جرمی جزء شیمیایی i-ام، ∂m ، نسبت ثابت دیفیوژن مؤثر برای جز i-ام به دیفیوزیتی مومنتوم آشفته، R_i ، دبی جرمی تولیدی یا تخلیه شده به وسیله واکنش شیمیایی است و S_i ، منابع دیگر تولید جزء است. یک معادله از این فرم باید برای N-1 جزء حل شود که N، تعداد اجزاء شیمیایی حاضر در سیستم است. R_i میتواند به وسیله قانون کنش جرم تعیین شود:

$$R_i = (\upsilon_i'' - \upsilon_i')M_i k \prod_l C_l^{\upsilon_l} \tag{19}$$

ن ثابت استوکیومتری برای جزء i-ام برای محصول و υ_i' ، برای υ_i'' ، ثابت استوکیومتری برای جزء i-ام، N_i ثابت ویژه سرعت M_i ، ثابت ویژه سرعت واکنش، I_i ، غلظت مولی جزء واکنش دهنده i-ام و υ_i ، ثابت استوکیومتری جزء واکنش دهنده I-ام است.

نابت سرعت واکنش k با معادله آرنیوس اصلاح شده بیان می شود:
$$k = AT^{lpha} \exp\!\left(rac{-E}{RT}
ight)$$

T و α پارامترهای سرعت واکنش، R ، ثابت گاز ایدهآل و A ، E دما است. در نتیجه، با ترکیب دو فرمول قبلی داریم:

$$R_{i} = (\nu_{i}'' - \nu_{i}')M_{i}AT^{\alpha} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \left(\prod_{l} C_{l}^{\nu_{i}}\right)$$
(Y)

میانگین زمانی این معادله میتواند با جانشینی مجموع مقدار متوسط و نوسانی برای هر متغیر انجام شود و سپس، متغیرهای آنی، به اجزای متوسط و نوسانی تجزیه شود.

برای به کار بردن فرض سادهسازی در رسیدن به حل معادلات واکنش شیمیایی، کوپل شدن با مکانیک سیالات آشفته، سه فرض مدلسازی استفاده شده است که میتواند بر اساس دو مقیاس زمانی مربوط به واکنشهای شیمیایی در جریان آشفته، دستهبندی شود: مقیاس زمانی واکنش و مقیاس زمانی مخلوط آشفته. مقیاس زمانی واکنش، زمان مورد نیاز برای اجزاء است تا به طور کامل واکنش دهند و به تعادل برسند. مقیاس زمانی مخلوط آشفته، زمان لازم برای ادیهای توربولانسی با مقیاس بزرگ است تا به مقیاسی که فعل و انفعالهای مولکولی میتواند روی دهد، شکسته شود.

در فرض مدلسازی میانگین زمانی واکنش، اجزاء واکنش، پیش آمیخته فرض می شوند و از میانگین زمانی مخلوط توربولانسی صرف نظر می شود. در دومین فرض مدل سازی میانگین زمانی، مخلوط آشفته هم سطح یا بزرگ تر از مقیاس زمانی واکنش می باشد.

برای محاسبه همزمان مقیاس زمانی واکنش و مخلوط آشفته، تغییراتی بر روی اولین روش ارائه شده به وسیله مگنوسن و هرتاگر که مدل شکست ادی پیشنهادی استالدینگ را برای محاسبه اثرات آشفتگی بر روی سرعتهای واکنش شیمیایی به کار میبرد، ایجاد شد. در اینجا، سه سرعت واکنشهای شیمیایی محاسبه میشود و کوچکترین آنها به عنوان سرعت حاکم به کار میرود. اولین سرعت پیشتر گفته شد. دومین سرعت واکنش، سرعت اتلاف ادیهای واکنش دهنده توربولانسی است که با معادله زیر نشان داده میشود:

$$R_i^R = -\upsilon_i' M_i \rho B_R \frac{\varepsilon}{k} \min(m_l) \tag{Y}$$

که B_R ، ثابت تجربی برای واکنشهاست. سومین سرعت واکنش، سرعت اتلاف ادیهای آشفته محصولات است:

$$R_i = -\upsilon_i' M_i \rho B_p \frac{\varepsilon}{k} \mathbf{m}_p$$

که B_p ، ثابت محیطی برای محصولات است.

(٣٣)

معادلات حاكم براى انتقال حرارت تشعشعي

دو فرض تکمیلی میتواند برای مطالعه فعل و انفعال تشعشع الکترومغناطیس با گازها، جامدات و مایعات استفاده شود. در اولین فرض، که عمدتاً با تئوری موج الکترومغناطیس سر و کار دارد، تمرکز بر روی فعل و انفعال تشعشع با یک واسطه مشترک (گاز، جامد یا مایع) در سطح مولکولی یا اتمی است. در انتقال حرارت تشعشعی، تمرکز اصلی بر روی توضیح فعل و انفعالهای تشعشعی به وسیله یک واسط مشترک است. این فرآیند به وسیله جذب، نشر و پراکندگی انرژی تشعشعی توصیف میشود. جهت مطالعه کمی انتقال حرارت تشعشعی در یک واسط خاکستری مشترک، معادله انتقال حرارت تشعشعی برای یک سیستم حالت یکنواخت چنین بیان میشود:

> هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف

$$\frac{dI(s,\omega)}{ds} = -(\kappa + \sigma)I(s,\omega) + \kappa I_b + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{4\pi} I(s,\omega) \Phi d\omega \qquad (YF)$$

که I شدت تشعشع، \emptyset و s بردارهای واحد در جهت پخش، K و σ ثابتهای جذب و پخش محلی و Φ تابع فازی استفاده شده برای توصیف طبیعت جسم پخش کننده است. ترم سمت چپ، معادله گرادیان شدت در جهت خاص را نشان میدهد. سه ترم سمت راست معادله شدت تغییرات جذب، پخش بیرونی، انتشار و پخش به درون را به ترتیب نشان میدهد.

روشهای محاسبه خصوصیات جذب و نشر گازهای احتراقی با استفاده از تکنیکهای ریاضی که به دما و فشار جزئی ابتدایی، اجزاء گازی شرکت کننده که در اکثر نمونههای احتراقی، آب، مونوکسیدکربن و دی اکسید کربن است. در حالیکه NO_x و اکسیدهای گوگرد نیز جذب کننده و نشر دهندههای قوی هستند، اما چون غلظت آنها کم است، میتوان از اثراتشان صرف نظر کرد.

از روش عرض گسسته^۱، برای حل معادله انتقال تشعشع(RTE)^۲ و با توجه به وجود گازهای دی اکسید کربن و بخار آب در محصولات احتراق، از مدل مجموع وزنی چند گاز خاکستری^۲، برای بررسی اثر تشعشعی گازهای غیر خاکستری استفاده میشود.

مدل تشعشعی DO

مدل تشعشعی عرض گسسته، معادله انتقال تشعشعی را برای تعداد محدودی از زاویههای جامد گسسته، حل میکند که هر کدام، با یک جهت برداری \vec{S} که در سیستم مختصات کارتزین ثابت شده است، وابسته شدهاند. دقت گسسته سازی زاویهای توسط کاربر کنترل می شود. این مدل، ردیایی اشعه را انجام نمی دهد؛ در عوض معادله کلی تشعشع را به یک معادله انتقال برای شدت تشعشع مختصات فضایی تبدیل میکند. روش حل، همان روشی است که برای معادلات انرژی و جریان سیال استفاده می شود.

مهمترین مدلهای مورد استفاده برای مدلسازی تشعشع در کورهها که در نرم افزارهای متداول مورد استفاده قرار می گیرند، عبارتند از مدل DO, P1, Rosseland. انتخاب مدل مناسب در کورهها به پارامترهای متعددی از جمله ضخامت نوری، نوع گازهای موجود در محیط و ... وابسته است. پس از بررسی و شبیه سازی مدلهای مختلف در تحقیق انجام گرفته، به دلیل دقت بالاتر نسبت به مدل P1 و هزینه محاسباتی کمتر نسبت به مدل مونت کارلو³، مدل DO برای انجام محاسبات تشعشع انتخاب گردید.

معادلات مدل تابش DO

این مدل، انتقال تشعشعی را در جهت s به عنوان معادله میدان در نظر میگیرد. بنابراین معادله تشعشع به صورت زیر نوشته میشود:

 $\nabla .(I(\vec{r},\vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r},\vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r},\vec{s'}) \Phi(\vec{s},\vec{s'}) d\Omega'$ (7)
iv (7)
i

$$\nabla (I_{\lambda}(\vec{r,s})\vec{s}) + (a_{\lambda} + \sigma_{s})I_{\lambda}(\vec{r,s}) = a_{\lambda}n^{2}I_{b\lambda} + \frac{\sigma_{s}}{4\pi} \int_{0}^{4\pi} I_{\lambda}(\vec{r,s'})\Phi(\vec{s},\vec{s}')d\Omega'$$
(19)

$$\nabla (I_{\lambda}(\vec{r,s})\vec{s}) + (a_{\lambda} + \sigma_{s})I_{\lambda}(\vec{r,s}) = a_{\lambda}n^{2}I_{b\lambda} + \frac{\sigma_{s}}{4\pi} \int_{0}^{4\pi} I_{\lambda}(\vec{r,s'})\Phi(\vec{s},\vec{s}')d\Omega'$$
(19)

که در اینجا ۲۰ طول موج، u_{λ} صریب جدب طیفی، $I_{b\lambda}$ سدت جسم سیاه در معادله پلانک و n ضریب شکست است.

DO غیر خاکستری، طیف تشعشعی را به N نوار طول موج تقسیم می کند که به اندازههای مساوی و نزدیک نیاز ندارد. فواصل طول موج، به وسیله کاربر تعیین می شود و به اندازه خلاء مرتبط است. معادله انتقال حرارت تشعشعی، از تمام فاصله طول موج انتگرال می گیرد که منتج به معادلات انتقال برای کمیت $I_A \Delta \lambda$ انرژی تشعشعی موجود در نوار طول موج می شود. رفتار هر نوارریال خاکستری فرض می شود. نشر جسم سیاه در هر واحد زاویه جامد نوار طول موج، به صورت زیر نوشته می شود:

$$\left[F(0 \to n\lambda_2 T) - F(O \to n\lambda_1 T)\right] n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \tag{1}$$

که $F(0 \to n\lambda T)$ کسری از انرژی تشعشعی منتشر شده بوسیله جسم سیاه در فاصله طول موج 0 تا λ در دمای T در یک واسطه با ضریب شکست n است. شدت کل $\overline{(r,s')}$ در هر جهت \overline{s} در مکان \overline{r} با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$I(\vec{r},\vec{s}) = \sum_{k} I_{\lambda k}(\vec{r},\vec{s}) \Delta \lambda_{k}$$
(YA)

مدلسازی NOx

از دو مکانیزم تشکیل NO_x حرارتی⁶ و NO_x فوری⁶ برای پیشبینی اکسیدهای نیتروژن استفاده شده است و به این منظور، یک معادله انتقال برای غلظت اکسیدهای نیتروژن حل می شود. معادله انتقال جرم که در نرم افزار فلوئنت به صورت جابجایی، دیفیوژن، تولید و مصرف NO و گونههای مربوطه در نظر گرفته می شود، برای NO به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla .(\rho \overline{\nu} Y_{NO}) = \nabla .(\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO}$$
(Y9)

S_{NO} ترم چشمه است که به وسیله مدلهای مربوط به مکانیزمهای مختلف NO مشخص میشود [۱۲].

Pressure Based	حل کنندہ
Implicit	روش فرمول بندی
Simple	الگوريتم كوپلينگ سرعت وفشار
Standard k-ɛ	مدل توربولانسى
Species Transport	مدل سازی احتراق
Finite Rate/Eddy Dissipation Concept	تقابل شیمی و آشفتگی
Discrete Ordinate (DO)	مدل تشعشع
WSGGM Domain Based	روش محاسبه ضريب جذب محيط
	واسط در مدل تشعشعی
Thermal & Prompt	مدل سازی NO _x

جدول-۱ مدلهای به کار رفته در حل عددی

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

⁵ Thermal NO_x

⁶ Prompt No_x

¹ DO ² RTE

³WSGGM

⁴ Monte Carlo Radiation Model

تحليل نتايج

مقایسه کمی و کیفی حالتهای مختلف و تأثیر آن بر سرعت، دما و کسر جرمی^۱ هر یک از اجزاء کربن دی اکسید^۲، آب^۲، نیتروژن^۴، اکسیژن^۵ کربن کربن مونوکسید⁵و انتشار اکسیدهای نیتروژن^۷ انجام شد. تغییر زاویه پرههای جهت دهنده هوا از ۴۵درجه به ۳۰ درجه و ۶۰ درجه و همچنین نازلهای پاشش سوخت از ۱۰ درجه به ۳۰ درجه، تأثیر محسوسی بر توزیع سرعت، دما و کسر جرمی هر یک از اجزاء کربن دی اکسید، آب، نیتروژن، اکسیژن نخواهد داشت و کانتورها با یکدیگر مشابه میباشند. تحلیل نتایچ مربوط به تولید کربن مونوکسید

شکل-۹و ۱۰ مقایسه کیفی تغییر زاویه پرههای جهت دهنده هوا و نازلهای پاشش سوخت بر کسر جرمی کربن منوکسید در صفحه X-Z را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود، تغییر زاویه پرهها از ۴۵ درجه به ۳۰ و۶۰ درجه و نازلها از ۱۰ به ۳۰ درجه، موجب افزایش مقادیر کربن مونوکسید می گردد.



شکل-۹ مقایسه کیفی کسر جرمی کربن منوکسید در صفحه X-Z در

سه حالت زاویه پره ۳۰ درجه، ۴۵ درجه و ۶۰ درجه



شکل-۱۰ مقایسه کیفی توزیع کسر جرمی کربن مونوکسید در صفحهX-Z در دو حالت پاشش سوخت ۱۰ درجه و ۳۰ درجه

شکلهای ۱۱ و ۱۲ مقایسه کمی تأثیر تغییر زاویه پرههای جهت دهنده هوا و نازلهای پاشش سوخت بر کسر جرمی کربن منوکسید در صفحه X-Z روی خط T -5 m را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود و از

 1 Mass Fraction 2 CO $_2$ 3 H $_2 O$

- ⁶ CO
- ⁷ NO_x

هفتمين كنفرانس سوخت و احتراق ايران، ٢۴و ٢۵ بهمن ماه ١٣٩۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

بررسی کانتور کربن منوکسید در این صفحه نیز پیشبینی میشد، تغییر زاویه پرهها از ۴۵ درجه به ۳۰ و ۶۰ درجه و نازلها از ۱۰ درجه به ۳۰ درجه، افزایش جزئی مقادیر کربن مونوکسید در این مقطع را به همراه داشته است.



شکل-۱۱ مقایسه کمی مقادیر کربن منوکسید در صفحه X-Z روی خط T۰.۴۵ و ۶۰ در سه حالت زاویه پره ۲۰.۴۵ و ۶۰ درجه





تحليل نتايج مربوط به توليد اكسيدهاي نيتروژن

شکل ۱۳ مقایسه کیفی تغییر زاویه پرههای جهت دهنده هوا بر کسر جرمی اکسیدهای نیتروژن در صفحه X-X را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود، تغییر زاویه پرهها از ۴۵ به ۳۰ درجه، مقادیر اکسیدهای نیتروژن را ۲۲ پی پی ام کاهش داده است که بهبود بسیار مناسبی میباشد. همچنین، مقدار انباشتگی اکسیدهای نیتروژن با کسر جرمی بالا در انتهای کوره نیز به شکل قابل ملاحظهای کاهش یافته است.اما افزایش زاویه ۴۵ درجه به ۶۰ درجه، موجب افزایش مقادیر اکسیدهای نیتروژن به شدهاست.

 $^{{}^{4}}N_{2}$ ${}^{5}O_{2}$



شکل-۱۳ مقایسه کیفی کسر جرمی اکسید نیتروژن در صفحه X-Z در سه حالت زاویه پره ۳۰، ۴۵و ۶۰ درجه

شکل ۱۴ مقایسه کمی تغییر زاویه پرههای جهت دهنده هوا بر کسر جرمی اکسیدهای نیتروژن در صفحه X-Z روی خط T = - S را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، کاهش میزان اکسید نیتروژن پس از کاهش زاویه پرهها به ۳۰ درجه و افزایش میزان اکسید نیتروژن پس از افزایش زاویه پرهها به ۶۰ درجه کاملاً مشهود است. این مسئله، تأییدی بر مقایسه کیفی شکل ۴-۲۳ است. (برای مشاهده نمودارهای اکسید نیتروژن روی خطوط دیگر، به "ضمیمه ۵۰ نمودار اکسید نیتروژن" مراجعه گردد.)



Z شکل-۱۴ مقایسه کمی مقادیر اکسید نیتروژن در صفحه X-Z روی خط در سه حالت زاویه یره ۲۰،۴۵ و ۶۰ درجه z = -5 m

اكسيدهاي نيتروژن

شکل-۱۵ مقایسه کیفی تأثیر تغییر زاویه پاشش سوخت بر کسر جرمی اکسیدهای نیروژن در صفحه X-X را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود، افزایش زاویه تزریق سوخت از ۱۰ درجه به ۳۰ درجه، مقادیر اکسیدهای نیتروژن را ۱۶ پی پی ام^۱ کاهش داده است که بهبود بسیار مناسبی میباشد. همچنین، مقدار انباشتگی اکسیدهای نیتروژن با کسر جرمی بالا در انتهای کوره نیز به شکل قابل ملاحظهای کاهش یافته است.



شکل - ۵۱ مقایسه کیفی توزیع کسر جرمی اکسید نیتروژن در صفحه -X
 ۲۵ در دو حالت پاشش سوخت (سمت راست) ۱۰ درجه و (سمت چپ) ۳۰
 ۲۵ درجه

شکل-۱۶مقایسه کمی تـأثیر تغییر زاویه پاشش سوخت بر کسر جرمی اکسید نیتروژن در صفحه X-Z روی خط T -11.5 m را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود، کاهش میزان اکسید نیتروژن پس از افزایش زاویه پاشش سوخت به ۳۰ درجه کاملاً مشهود است.



منابع

1- A. Okajima, "Strouhal number of rectangular cylinder", *J.Fluid Mechanics*, vol. 132, pp. 379-398, 1982.

2- Davis, R. w., Moore.E.F., "A numerical study of vortex shedding from rectangles", *J.Fluid Mechanics*, vol. 116, pp. 479-506.

3- M. Rahnama, "Analysis of convection heat transfer around thick plates with recirculating flow", Shiraz University, Shiraz, 1997.

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

¹ ppm

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

۵- احسان اله سعادتی، محمدرضا روشنی, "بررسی تاثیر زاویه و سرعت تزریق سوخت مشعل های نیروگاهی بر پارامترهای احتراق", در بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق, ۱۳۸۸.

6- Veríssimo, A. S., A. M. A. Rocha, and M. Costa, "Operational, combustion, and emission characteristics of a small-scale combustor", *Energy* & *Fuels*, vol. 25.6, pp. 2469-2480, 2011.

۷- رامین زادغفاری و همکارانش، "شبیه سازی عددی اثر تغییر زاویه تزریق سوخت در مشعل گاز سوز از پیش اختلاط نیافته روی پارامتر های احتراق در نقاط مختلف محفظه احتراق"، تألیف سومین کنفرانس ملی کاربرد CFD در صنایع شیمیایی و نفت، تهران، ۱۳۹۰.

۸- حمید معصومی، حمید آب روشن, "بررسی اثر تغییر زاویه مشعلهای دیگ بخار بر روی متغیرهای جریان گازی و فرایند احتراق به صورت عددی", نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق, جلد اول, ۱۳۹۱.

9- Fluent User's Guide, 2004.

10- Spall, R.E. and Ashby, B.M., "A Numerical Study of Vortex Breakdown in Turbulant Swirling Flows", *ASME J.Fluids, Eng.*, vol. 122, pp. 179-183, 2000.

11- Najafi, A. F.,Saidi, M. H., Sadeghipour, M. S. and Souhar, M.,, "Numerical Analysis of Turbulent Swirling Decay Pipe Flow", *Int. Comm. In Heat and Mass Transfer*, vol. 32, no. 5, pp. 627-638, 2005.

12- Speziale, C. G., Younis, B. A. and Berger, S. A.,, "Analysis and Modeling of Turbulent Flow in an Axially Rotating Pipe", *Journal of Fluid Mech.*, vol. 407, pp. 1-26, 2000.

13- J. O. Hinze, Turbulent, 2nd, Ed., McGraw-Hill, 195.

14- Daly, B. J. and Harlow, F. H.,, "Transport Equations in Turbulence", *Phys. of Fluids*, vol. 13, pp. 2634-2649, 1970.

15- W. D.C., Turbulence Modeling for CFD, 1993.

16- Artit Ridluan , Smith Eiamsa-ard , Pongjet Promvonge, "Numerical simulation of 3D turbulent isothermal flow in a vortex combustor", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 34, p. 860–869, 2007.

17- .FLUENT 6.3 User's Guide .FLUENT .september 2006 .Lebanon: NH03766

۱۸ م. ر. ر. احساناله سعادتی، "بررسی تاثیر زاویه و سرعت تزریق سوخت مشع لهای نیروگاهی بر پارامترهای احتراق"، تألیف بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق.

19- J. C. N. M. a. M. S. R. A. K. GUPTA ."Burner

geometry effects on combustion and NOx emission characteristics using a variable geometry swirl combustor "*Journal of Propulsion and Power*. No.4 .pp. 473-480 .1991.

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف