

تحلیل رفتار محفظه‌ی احتراق توربین گاز سوخت مایع به روش عددی و شبکه‌ای

صادق تابع جماعت
استاد-دانشگاه صنعتی امیرکبیر
sadegh@aut.ac.ir

مسعود عیدی عطارزاده
دانشجوی دکتری-دانشگاه صنعتی امیرکبیر
ediattar@aut.ac.ir

سید محمدرضا سادات اخوی
دانشجوی کارشناسی ارشد-دانشگاه صنعتی امیرکبیر
smreza@aut.ac.ir

بنیامین کنکاشور

دانشجوی کارشناسی ارشد-دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Ben.kankashvar@aut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، یک نمونه محفظه‌ی احتراق توربین گاز مدل (CAN)، که به منظور تزریق جریان هوا از تکنولوژی ورودی پیچشی محوری بهره می‌برد، با استفاده از فرضیات ساده کننده، به صورت پایا و با فرض تقارن محوری و روش RANS در حالت احتراقی و غیر احتراقی مورد مطالعه و شبیه سازی عددی قرار گرفته است. بدین منظور، در گام نخست مدل اغتشاشی STANDARD k-ε model در پیش بینی الگوی جریان غیر مورد حل قرار گرفته است. سپس جریان احتراقی با انتخاب مدل احتراقی EDC با استفاده از سینتیک شیمیایی سوخت کروسین مایع، شبیه سازی گردیده است. همچنین در گام دوم، به منظور افزایش دقت در شبیه سازی عددی انجام شده، شبیه سازی دیگری به روش شبکه نیز انجام گرفته است. در روش شبکه‌ای، با بکارگیری المان‌های PSR به عنوان دقیق ترین المان محاسباتی روش شبکه‌ای، در تمامی نقاط حساس محفظه و شبیه سازی تمام شرایط عملکردی محفظه از جمله پاشش سوخت مایع، نواحی بازگشتی هوا، هوای تزریق شده از سوراخ‌ها و تقسیم نواحی محفظه به ریز ناحیه، سعی بر ارزش گذاری نتایج عددی شده است.

کلید واژگان: محفظه‌ی احتراق، توربین گاز، ورودی پیچشی محوری، مدل شبکه، مدل احتراقی

مقدمه

محفظه‌های احتراق توربین گاز قابلیت استفاده از بازه‌ی وسیعی از سوخت-های مایع و گازی را دارند و این قابلیت نیاز به روش تحلیل مختص به خود را دارا می‌باشد. محفظه‌های لوله‌ای^۱ محفظه‌هایی هستند که در آنها چند محفظه‌ی استوانه‌ای شکل با فواصل مساوی در کنار یکدیگر قرار گرفته و جریان هوای عبوری از هر کدام از آنها توسط لوله‌های بزرگتر جداسازی شده است. همچنین این لوله‌های بزرگتر توسط رابطی به یکدیگر وصل شده اند تا در صورت خاموشی یا اختلال در عملکرد هر محفظه، انرژی محفظه‌ی سالم به دیگری انتقال پیدا نماید. اگرچه هزینه و زمان ساخت و توسعه‌ی این مدل محفظه ارزان و کوتاه است، اما بدلیل طول و وزن زیاد این محفظه‌ها، استفاده از آنها در موتوهای هوایی ممنوع شده و این مدل محفظه‌ها کاربرد صنعتی و نیروگاهی پیدا کرده اند [۱و۲]. در سال ۲۰۰۶ و در دانشگاه واشنگتن، تیمی از محققان، محفظه‌ی احتراق دارای سوخت از پیش آمیخته شده‌ی متان و هوا را، پس از تحلیل به روش عددی، با بکارگیری ۳۱ المان PSR و در نظر گیری شرایط عملکردی از جمله تزریق هوای اولیه و ثانویه، نواحی بازگشتی بوجود آمده و غیره شبیه سازی و تحلیل کرده‌اند. در این تحلیل ابتدا محفظه از طریق روش عددی به طور کامل شبیه‌سازی شده و پس از شناخت نواحی جریان داخل محفظه و با استفاده از رژیم عملکردی آن، المان‌های شبکه‌ای چیده شده و تحلیل،

کامل گردیده است [۴]. سپس در سال ۲۰۰۸، مدل شبکه‌ای برای محفظه‌ی احتراق دارای سوخت از پیش آمیخته شده‌ی بخار کروسین و هوا، توسط آزمایشگاه لورانس پیشنهاد شده است که در این محفظه نیز با بکارگیری ۸ المان PSR و در نظرگیری شرایط عملکردی از جمله تزریق هوای اولیه و ثانویه، نواحی بازگشتی بوجود آمده و... جریان احتراقی داخل محفظه شبیه سازی شده است [۹]. همچنین در سال ۲۰۰۹، شلبورن و همکارانش، محفظه‌ی احتراق توربین گاز دارای سوخت از پیش آمیخته شده‌ی متان و هوا را پس از تحلیل عددی، با بکارگیری ۱۰ المان PSR تجزیه و تحلیل و میزان تولید آلاینده در آن را با استفاده از روش شبکه بررسی نموده‌اند. در این شبیه‌سازی نیز همانند دیگر شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، ابتدا از روش عددی میدان داخل محفظه شناخته شده و سپس با استفاده از روش شبکه، فرآیند تحلیل تکمیلی انجام گرفته است [۳]. در نهایت نیز در این گزارش، محفظه‌ی احتراق لوله‌ای توربین گاز سوخت مایع، پس از شبیه‌سازی کامل عددی و با داشتن میدان کامل احتراقی و غیر احتراقی حاصل شده از شبیه‌سازی عددی، با ۲۸ المان PSR تجزیه و تحلیل شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

براساس آنچه بیان شد، هدف اصلی این مطالعه، بررسی بیشتر واکنش احتراقی سوخت مایع کروسین و هوا در محفظه‌ی احتراق لوله‌ای همراه با چرخانده‌ی هوای محوری می‌باشد که در ابتدا این شبیه‌سازی با روش اغتشاشات RANS و مدل احتراقی EDC انجام شده و سپس در ادامه مدل شبکه‌ای محفظه به شکل راکتورهای سری و موازی چیده شده و محفظه تحلیل می‌گردد.

هندسه و شرایط عملکردی محفظه‌ی احتراق

محفظه احتراق مورد بررسی لوله ای بوده و برای طراحی آن از محفظه احتراق مرجع [۸] الگو برداری شده است. محفظه‌ی لوله‌ای مورد بررسی قرار گرفته دارای طول ۲۲۰mm و عرض ۷۵mm در بیشترین عرض خود می‌باشد. انتهای این محفظه از حالت دایره‌ای شکل به حالت مستطیلی تغییر شکل داده که طول این مستطیل ۱۰۰mm و عرض آن ۲۵mm می‌باشد. هوای عبوری از این محفظه از یک چرخانده‌ی هوا عبور میکند که دارای ۲۰ پره با عدد چرخش تقریباً یک که نسبتاً عدد چرخش بالایی می‌باشد، عبور می‌کند. قطر داخلی این چرخانده ۱۰۸۱mm و قطر خارجی آن ۱۶۱۵mm و دارای طول ۱۵mm می‌باشد. قطر پوسته^۲ که محفظه داخل آن قرار گرفته ۱۶۹mm بوده که محفظه درست در وسط آن قرار گرفته است. هوای وارد شده به داخل پوسته دارای دبی ۱۷۰ مترمکعب بر ساعت و سوخت پاشیده شده به داخل محفظه دارای دبی ۳٫۹ لیتر بر ساعت می‌باشد. بر روی این محفظه دو ردیف سوراخ نصب شده است که ردیف اول دارای ۶ سوراخ و ردیف دوم دارای ۱۲ سوراخ می‌باشد. قطر تمام سوراخ‌های ذکر شده ۱۰mm در نظر گرفته شده است. همچنین حدود ۳۷٪

² Casing

¹ Can

محفظه‌ی احتراق با کمترین هزینه و وقت محاسباتی می‌باشد [۲ و ۳ و ۱۰ و ۱۱].

برای شبیه‌سازی عددی از روش RANS و نرم افزار فلونت استفاده شده است. بنابراین معادلات حاکم بر مسئله شامل معادله‌ی پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی و دو معادله‌ی آشفته‌گی در الگوی standard epsilon-K می‌باشند.

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

معادله‌ی اندازه‌ی حرکت:

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (2)$$

که در آن:

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v}] \quad (3)$$

معادله‌ی انرژی:

$$\frac{\partial (\rho \vec{E})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + (\bar{\tau}_{eff} \vec{v})) \quad (4)$$

و دو معادله‌ی آشفته‌گی:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (5)$$

و

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K} + S_\epsilon \quad (6)$$

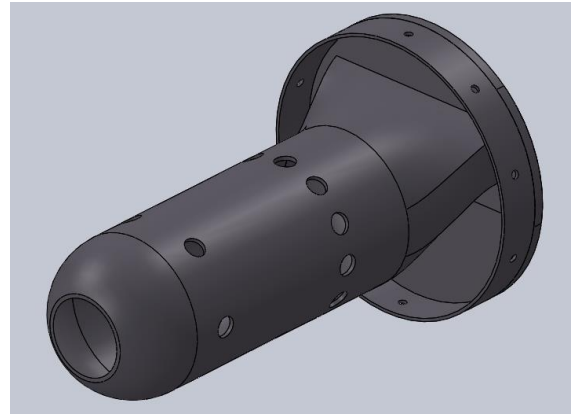
که در این معادلات:

جدول ۱. ضرایب معادلات آشفته‌گی

$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	C_μ	∂_k	∂_ϵ
1.44	1.92	0.09	1	1.3

در روش مدل سازی عددی، با اعمال برخی فرضیات ساده کننده، میدان جریان سه بعدی داخل محفظه، به صورت متقارن محوری و با دقت قابل قبول شبیه سازی شده است. در شکل ۲ میدان محاسباتی، شبکه و شرایط مربوط به شبیه سازی به نمایش درآمده است.

از جریان هوای وارد شده به casing از چرخاننده، ۲۰٪ از ردیف اول و ۴۳٪ از ردیف دوم می‌گذرد [۸]. شکل ۱ نمای کلی محفظه احتراق را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمای کلی محفظه‌ی شبیه‌سازی شده

روش عددی

در شبیه‌سازی عددی، یکی از مهمترین معضلات استفاده از مدل اغتشاشی RANS بیشتر پیش بینی کردن مقادیر اتلاف است که منجر به از دست رفتن برخی ساختارهای مهم در جریان می‌شود. اما سادگی این مدل‌ها و امکان استفاده از آنها در میدان‌های دوبعدی و متقارن شبیه سازی‌های عددی را بیشتر به این سمت سو می‌دهد. در روش RANS معادلات مربوط به بقای گونه‌های شیمیایی و انرژی همانند سایر معادلات میانگین‌گیری می‌شوند. این امر منجر به تولید جمله‌های ناشناخته‌ی جدیدتری در معادلات مذکور می‌شوند. جمله‌ی اول مربوط به بقای گونه‌های شیمیایی و آنتالپی است که معمولاً با استفاده از فرض گرادیان پخش^۱ مدل سازی می‌شود و جمله‌ی دوم مربوط به نرخ متوسط واکنش است که توسط مدل‌های نرخ محدود همانند EDC جایگزین می‌گردد. در مدل EDC واکنش‌های شیمیایی در ساختارهای کوچک اغتشاشی به صورت راکتور فشار ثابت مدل می‌شوند. این مدل که توسط مگنوسن توسعه یافته است به صورت گسترده در سیستم‌های احتراقی رایج مورد مطالعه و صحت سنجی قرار گرفته است [۱۲ و ۲].

پس از استفاده از مدل اغتشاشی RANS و مدل احتراقی EDC، مدل شبکه‌ای محفظه نیز این امکان را به ما می‌دهد تا بدون در نظرگیری هیچ‌گونه نوسانات و اغتشاشات، میدان دما، نسبت‌های مولی و جرمی و غلظت آلاینده‌ها را با کمترین هزینه و وقت محاسباتی پیش‌بینی کنیم. در مدل شبکه‌ای، حجم کلی محفظه‌ی احتراق به حجم‌های کوچکتر شکسته شده و هر حجم یک PSR^۲ در نظر گرفته می‌شود. در این مدل برای هر حجم یک زمان اقامت گونه^۳ تعریف شده و این مقدار با زمان شیمیایی گونه^۴ مقایسه می‌شود و واکنش پذیری گونه در آن حجم تعیین می‌گردد. اصلی ترین معادله‌ی بکار رونده در روش تحلیل شبکه، معادله‌ی بقای گونه^۵ است که نرخ تولید و مصرف هر گونه در حجم‌های محفظه، متناسب با سینتیک تعیین شده برای واکنش سوخت و اکسنده محاسبه می‌گردد. همانطور که پیش‌تر نیز بیان شد، اصلی‌ترین مزیت استفاده از روش شبکه، تحلیل

¹ Diffusion term

² Perfect stirred reactor

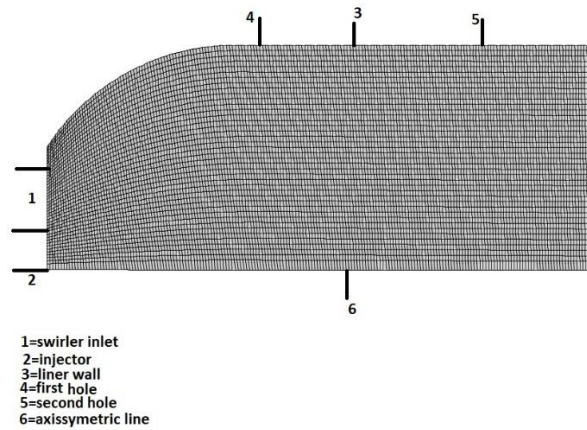
³ Residence time

⁴ Chemical time

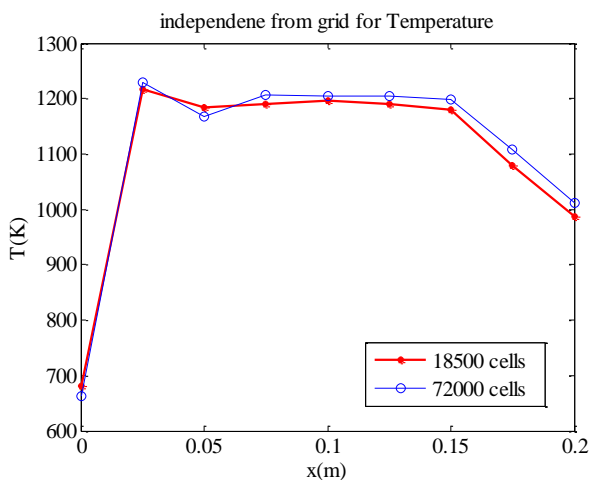
⁵ Species conservation

وارد می‌گردد [7]. در نهایت جریان احتراقی از ناحیه‌ی خروجی محفظه در نظر گرفته شده است خارج می‌گردد و حل میدان عددی کامل می‌گردد. شبیه سازی با استفاده از حلگر فشار پایه³ به صورت ضمنی⁴ در فضای متقارن محوری⁵ و به صورت پایا⁶ شبیه سازی شده است. همچنین به منظور ارتباط فشار با میدان سرعت از الگوریتم سیمپل⁷ استفاده شده است. در نهایت نیز گسسته سازی تمام معادلات از روش مرتبه‌ی اول بالا دست انجام گرفته است.

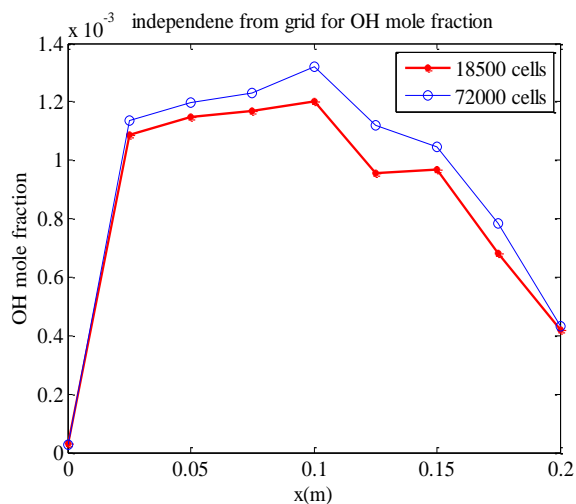
برای اطمینان از حل عددی انجام گرفته، لازم است که ابتدا یک فرآیند استقلال از مش انجام گیرد تا اطمینان حاصل شود که با تغییر مش، نتایج عددی حاصل شده تغییر چندانی نخواهند داشت و صحت نتایج مورد قبول واقع گیرد.



شکل ۲- میدان محاسباتی دو بعدی مربوط به شرایط ورودی



شکل ۴- استقلال از مش برای توزیع دما



شکل ۵- استقلال از مش برای کسر جرمی OH

در شکل ۲، هوای ورودی اصلی دارای مولفه‌های محوری و مماسی^۱ می‌باشد که این شرایط با عنوان mass flow inlet شبیه سازی شده است. مولفه-ی مماسی در واقع اثر وجود پیچش را بر جریان محوری اعمال می‌کند. هوای ورودی در نواحی اولیه و رقیق سازی به ترتیب اثر کامل کردن فرآیند احتراق و خنک کاری را بر عهده دارند. سوخت ورودی نشان داده شده در شکل ۲، سوخت مایع کروسین است که شبیه سازی آن شامل دو مرحله‌ی اصلی می‌باشد.

مرحله‌ی ۱: در اولین مرحله، شبیه سازی سوخت مایع کروسین که دارای فرمول شیمیایی C₁₀H₂₀ است، نیازمند یک سینتیک مناسب و انتخاب واکنش‌های پایه‌ی تایید شده همراه با ضرایب مناسب آرنیوس^۲ جهت محاسبات نرخ تولید و مصرف گونه‌ها است. این ضرایب و گونه‌ها از مراجع [۶ و ۵] اقتباس شده است. جدول ۲ ضرایب این واکنش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول سینتیک در نظر گرفته شده برای سوخت مایع کروسین (C₁₀H₂₀)

جدول ۲. ضرایب آرنیوس واکنش کروسین مایع و هوا

No.	Reaction	A	n	E
1	$C_{10}H_{20} + 5O_2 \Rightarrow 10CO + 10H_2$	2.00E16	0.0	52,000
2 ^b	$CO + O \Leftrightarrow CO_2 + M$	5.30E13	0.0	-4540
3	$CO + OH \Leftrightarrow CO_2 + H$	4.40E06	1.5	-740
4	$H_2 + O_2 \Leftrightarrow OH + OH$	1.70E13	0.0	48,000
5	$H + O_2 \Leftrightarrow OH + O$	2.60E14	0.0	16,800
6	$OH + H_2 \Leftrightarrow H_2O + H$	2.20E13	0.0	5,150
7	$O + H_2 \Leftrightarrow OH + H$	1.80E10	1.0	8,900
8	$OH + OH \Leftrightarrow H_2O + O$	6.30E13	0.0	1,090
9 ^b	$H + H \Leftrightarrow H_2 + M$	6.40E17	-1.0	0
10 ^b	$H + OH \Leftrightarrow H_2O + M$	2.20E22	-2.0	0

^aUnits are in seconds, moles, cubic centimeters, calories, and degrees Kelvin.
^bThird-body efficiencies for all thermomolecular reactions are 2.5 for M = H₂, 16.0 for H₂O, and 1.0 for all other M.

مرحله‌ی ۲: برای شبیه‌سازی عملکرد سوخت مایع در محفظه، روش DPM انتخاب شده است. در این روش مدل pressure-swirle-atomizer به عنوان سوخت پاش انتخاب شده است. با انتخاب زاویه‌ی پاشش سوخت و فشار بالادست سوخت، سوخت وارد محفظه شده و پس از محاسبه‌ی نیروی وارد بر قطرات سوخت، این قطرات شروع به تبخیر شده و اثر آن در میدان حل

³ Pressure based
⁴ implicit
⁵ axisymmetric
⁶ steady
⁷ Simple method

¹ tangential
² arrenius

روش شبکه

برای روش شبکه عمدتاً از راکتور PSR استفاده شده است که معادلات بکار رفته در این راکتورها عبارتند از:
معادله‌ی بقای گونه:

$$\frac{dm_{i,cv}}{dt} = m^{\circ}_i + m^{\circ}_{i,in} - m^{\circ}_{i,out} \quad (7)$$

که:

$$w_i^{\circ} MW_i V + m^{\circ} (Y_{i,in} - Y_{i,out}) = 0 \quad (8)$$

که در این رابطه ها $i=1,2,3,\dots,N$ و N تعداد گونه ها است.

$$w_i^{\circ} = f([X_i]_{cv}, T) = f([X_i]_{out}, T) \quad (9)$$

و

$$Y_i = \frac{[X_i] MW_i}{\sum_{j=1}^N [X_j] MW_j} \quad (10)$$

بقای انرژی:

$$Q^{\circ} = m^{\circ} (h_{out} - h_{in}) \quad (11)$$

$$Q^{\circ} = m^{\circ} \left(\sum_{i=1}^N Y_{i,out} h_i(T_{out}) - \sum_{i=1}^N Y_{i,in} h_i(T_{in}) \right) \quad (12)$$

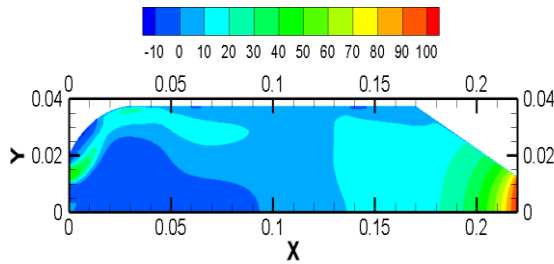


شکل ۶- نمای کلی راکتورهای بکارگرفته شده در حل شبکه‌ای

مطابق شکل بالا، پس از ورود سوخت و هوا از طریق المان اول به المان میانی که یک المان PSR می‌باشد، مجموع معادلات ذکر شده در روش شبکه برای این المان حل شده و خروجی آن به آخرین المان منتقل می‌گردد.

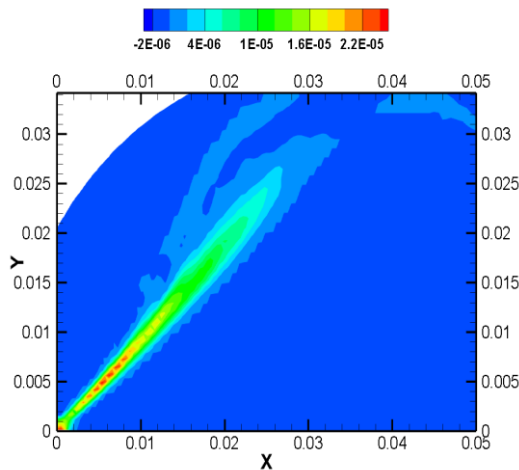
نتایج

در بخش ارائه‌ی نتایج، ابتدا توزیع سرعت محوری در حالت گرم و سرد جهت مقایسه‌ی ناحیه‌ی بازگشتی و همچنین نحوه‌ی پاشش سوخت مایع بررسی شده‌است، سپس توزیع دما و گونه‌های احتراقی در حالت گرم مورد تحلیل قرار گرفته‌است، در نهایت نیز نحوه‌ی توزیع المان‌های روش شبکه بیان شده و نتایج حاصل از حل آن با روش عددی مقایسه گشته‌است. در حالت غیر احتراقی، به دلیل وجود چرخاننده‌ی هوا و همچنین مولفه‌ی مماسی سرعت هوای ورودی، دو ناحیه‌ی بازگشتی ایجاد می‌شود که ناحیه‌ی بازگشتی‌ای که در ناحیه‌ی مرکزی محفظه و کمی جلوتر از سوخت‌پاش تشکیل می‌شود، اصلی‌ترین عامل پایداری شعله به حساب می‌آید. در شکل زیر میدان سرعت محوری به نمایش درآمده است که نواحی که سرعت محوری مقادیر منفی دارد، نواحی بازگشتی جریان به حساب می‌آیند.



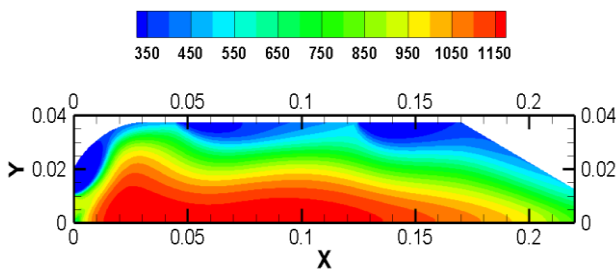
شکل ۷- کانتر توزیع سرعت محوری با استفاده از مدل اغتشاشی standard k-ε

همانگونه که در شکل ۷ نیز مشخص است، مدل اغتشاشی STANDARD k-ε model به خوبی توانایی مدل کردن این جریان بازگشتی را دارد. مطابق آنچه که پیشتر نیز بیان شد، شبیه‌سازی سوخت مایع نیازمند مدل کردن قطرات مایع و دخیل کردن موارد تاثیر گذاری همچون فشار بالادست سوخت، قطر دهانه‌ی ورودی سوخت پاش، زاویه‌ی پاشش و... می‌باشد. در ادامه اشکال مربوط به شبیه سازی ورود قطرات سوخت در داخل جریان غیر احتراقی به نمایش درآمده است.

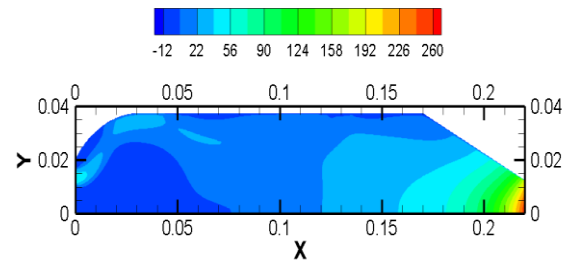


شکل ۸- مومنتوم قطرات سوخت در راستای محور X

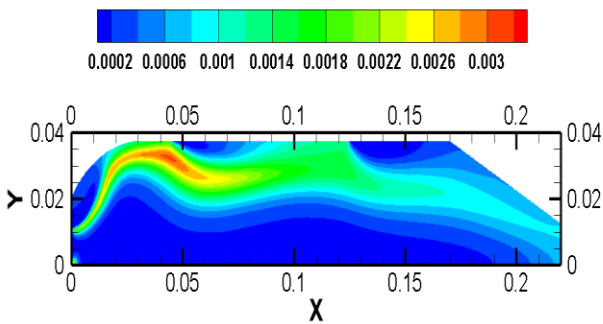
همانطور که در شکل ۸ مشخص است، در نواحی پاشش سوخت داخل میدان جریان هوا، کنش و اندرکنشی میان قطرات سوخت و جریان هوا وجود دارد. در نواحی اصلی پاشش، مومنتوم سوخت بر مومنتوم جریان هوا غالب بوده و مقادیر مومنتوم سوخت، مقداری مثبت است. با فاصله گرفتن از دهانه‌ی سوخت‌پاش، مومنتوم جریان هوا بر مومنتوم سوخت غلبه کرده و مقادیر مومنتوم سوخت، مقداری منفی می‌گردد. عبارت مذکور در ارتباط با هر دو جهت X و Y صادق می‌باشد. از آنجایی که سوخت پاشش شده، در راستای محوری مولفه‌ای ندارد و جریان هوای وارد شده به داخل محفظه دارای مولفه‌ی قوی محوری می‌باشد، مومنتوم سوخت پاشش شده در راستای محوری حتی در نواحی اصلی پاشش نیز دارای مقادیر منفی می‌باشد و مومنتوم هوا در راستای محوری از ابتدای جریان بر مومنتوم سوخت در راستای محوری غالب می‌باشد.



شکل ۱۰- کانتور توزیع دما در حالت احتراقی بر حسب کلورین

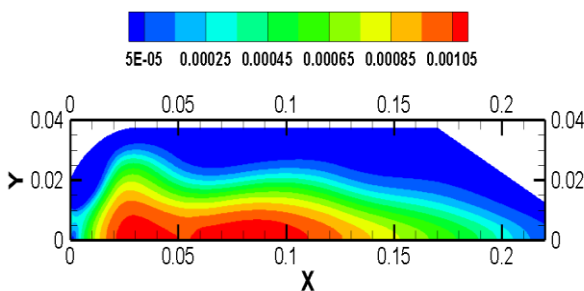


شکل ۹- کانتور توزیع سرعت محوری در حالت احتراقی



شکل ۱۱- کانتور کسر جرمی گونه‌ی H2

در شبیه‌سازی سوخت مایع، یکی از عوامل اثرگذار بر شبیه‌سازی، زاویه‌ی پاشش سوخت می‌باشد. این زاویه‌ی پاشش به‌گونه‌ای است که ورود سوخت را به شکل یک مخروط توخالی مدل می‌کند. بنابراین جریان اصلی سوخت به سمت سوراخ‌های بدنه‌ی محفظه و دیواره‌ها حرکت می‌کند (با افزایش زاویه‌ی پاشش این پدیده تشدید می‌شود)، و همانطور که از نتایج شبیه‌سازی آشکار است، بیشترین کسر جرمی H₂ و CO در نزدیکی نواحی سوراخ‌ها و دیواره‌ها دیده می‌شود. دلیل این امر احتراق ناقص و وجود بیش از حد قطرات سوخت در این نواحی می‌باشد که منجر به احتراق ناقص و آلاینده‌های H₂ و CO می‌گردد. اما در نواحی میانی و نزدیک به خط تقارن، که جریان هوا از سوراخ‌های بدنه‌ی محفظه بیشترین نفوذ را انجام داده و قطرات سوخت مطابق قانون فیک و از طریق ترم دفیوژن به داخل جریان هوا نفوذ می‌کنند، شعله‌ی اصلی تشکیل شده و آلاینده‌های H₂ و CO به کمترین مقدار خود می‌رسند.



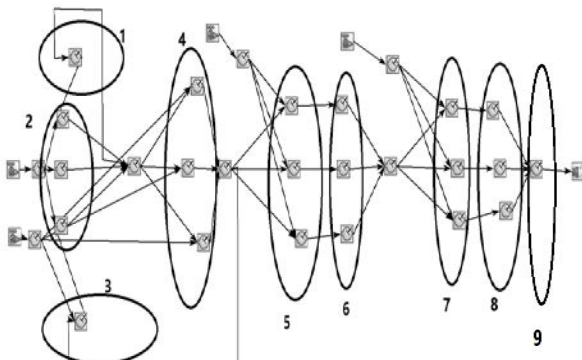
شکل ۱۲- کانتور کسر جرمی گونه‌ی OH

مطابق شکل ۷ و مقایسه‌ی آن با شکل ۹، سرعت محوری جریان در حالت احتراقی مقادیر بیشتری را نسبت به حالت غیر احتراقی دارا می‌باشد. حتی در ناحیه‌ی اصلی بازگشتی، با وجود آنکه سایز ناحیه‌ی بازگشتی در حالت احتراقی نسبت به حالت غیر احتراقی کاهش یافته است، اما مقادیر منفی سرعت محوری در حالت احتراق از مقادیر منفی در حالت غیر احتراقی و سرد بیشتر می‌باشد.

میدان دما و توزیع گونه‌ها

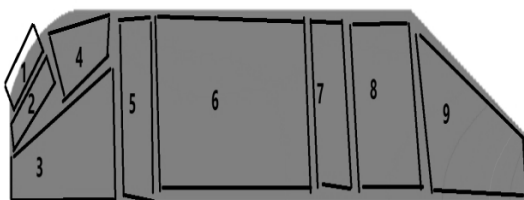
در شرایطی که نسبت هوا به سوخت بیشتر از نسبت هوا به سوخت در حالت استوکیومتریک باشد، جهت نزدیک‌تر کردن فرآیند احتراق به احتراق کامل و همچنین کاهش آلاینده‌ها و پایداری شعله، ابتدا بخش کمی از جریان هوا از ورودی اصلی همراه با پیچش عبور داده می‌شود، سپس بخش‌های دیگر جریان هوا از سوراخ‌های تعبیه شده جهت اضافه شدن به جریان احتراقی و خنک‌کاری عبور داده می‌شوند. علت اصلی این امر آن است که در ابتدا و در ناحیه‌ی اختلاط سوخت و هوا، نسبت تعادلی سوخت و هوا کاهش یافته و اختلاط و امکان تشکیل شعله افزایش یابد. پس از اختلاط و افزایش دمای جریان و در آستانه‌ی احتراق قرار گرفتن جریان، جریان هوا از سری سوراخ‌های اول وارد ناحیه‌ی مرکزی محفظه می‌گردد تا فرآیند احتراق را کامل نماید. آنچه اثر بخشی هوای وارد شده از سوراخ‌های اطراف محفظه را افزایش می‌دهد، عمق نفوذ جریان هوا می‌باشد. افزایش عمق نفوذ و دخول جریان هوا تا بخش‌های مرکزی و میانی باعث بهبود جریان احتراقی شده و مفید واقع می‌گردد. عمق نفوذ به پارامترهایی همچون فشار بالادست و پایین دست سوراخ‌ها، افت فشار سرد داخل محفظه، قطر و ضریب گذردهی هر سوراخ و ... بستگی دارد. بنابراین مکان اصلی شعله و ماکزیمم مقدار گرادیان دما در محفظه، در ناحیه‌ی اضافه شدن هوای اولیه به داخل محفظه و پس از آن انتظار می‌رود. پس از روی دادن واقعه‌ی فوق، هوای ثانویه از سری سوراخ‌های دوم تعبیه شده بر محفظه، به داخل جریان نفوذ کرده و عملیات خنک‌کاری و مناسب‌سازی شرایط جریان برای ورود به پره‌های توربین را انجام می‌دهد. در ادامه شبیه‌سازی‌های انجام شده و نتایج آن در حالت احتراق آورده شده‌اند. شکل ۱۰ توزیع دما را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دما در قسمت میانی محفظه احتراق افزایش پیدا می‌کند. در واقع ناحیه بازگشتی مرکزی باعث پایداری شعله می‌شود. ورود جریان هوا از سوراخ‌های مرحله اول و دوم باعث تشکیل ناحیه خنک‌کاری پیرامون لاینر می‌شود.

تقسیم‌بندی‌ها و نحوه‌ی چینش راکتورها، مطابق خطوط اصلی جریان بوده است، چنانچه نواحی بازگشتی دارای راکتورهای مجزا، نواحی ورودی هوای اولیه و ثانویه دارای راکتورهای مجزا و نواحی اصلی احتراقی و دیگر نواحی نیز دارای راکتورهای جداگانه می‌باشند. در مجموع برای شبیه‌سازی این محفظه، ۲۸ راکتور استفاده شده است که تمام راکتورهای استفاده شده از نوع PSR هستند. در مدل‌های شبکه‌ای، این راکتورها بالاترین دقت حل را داشته و انجام تمامی واکنش‌ها را با توجه به سینتیک شیمیایی در نظر می‌گیرد. اصلی‌ترین مشخصه‌ی PSR ها حجم یا زمان اقامت آن‌ها است. بدین شکل که پس از حل معادلات بقای گونه و با توجه به سینتیک شیمیایی واکنش‌ها، زمان شیمیایی گونه‌ها محاسبه شده و با حجم یا زمان اقامت هر PSR مقایسه می‌شوند. چنانچه امکان تولید یا مصرف هر گونه وجود داشته باشد، محاسبات انجام شده و اطلاعات مربوط به هر گونه حاصل می‌گردد. که نواحی در نظر گرفته شده بدین قرار می‌باشند:



شکل ۱۷- تقسیم بندی نواحی مختلف شبکه

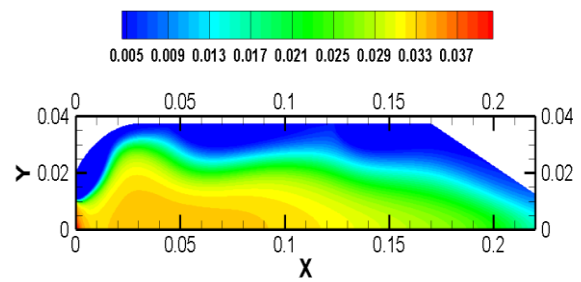
این تقسیم بندی مطابق هندسه‌ی اصلی بدین ترتیب می‌باشد:



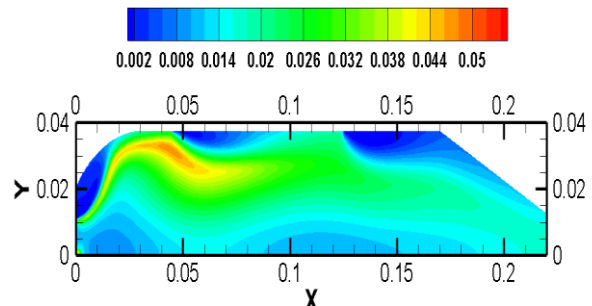
شکل ۱۸- تقسیم بندی مطابق هندسه‌ی اصلی جریان

نتایج حاصل از حل شبکه‌ای:

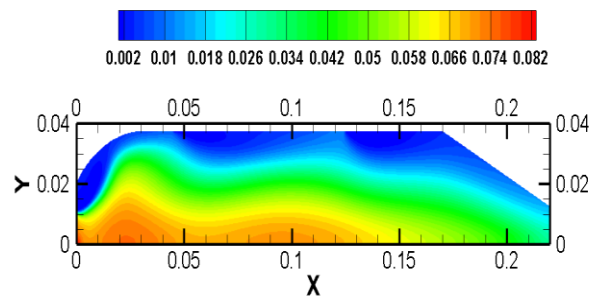
در ادامه، نتایج حاصل از حل شبکه‌ای آورده شده‌اند. این نتایج شامل مقادیر دمای هر راکتور و مقادیر کسر جرمی H_2 و OH می‌باشند که این نتایج تا حد زیادی همخوانی بسیار خوبی را با نتایج عددی احتراقی داراست. بنابراین این امر نشانگر صحت شبکه‌ی در نظر گرفته شده برای محفظه می‌باشد.



شکل ۱۳- کانتور کانتور کسر جرمی گونه‌ی H_2O



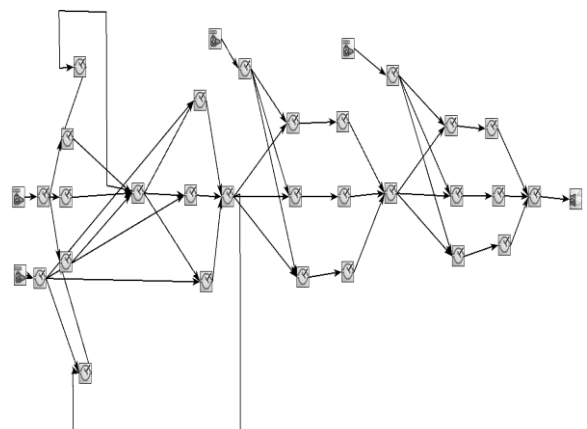
شکل ۱۴- کانتور کانتور کسر جرمی گونه‌ی CO



شکل ۱۵- کانتور کسر جرمی گونه‌ی CO_2

بررسی عددی محفظه به روش شبکه

مدل شبکه‌ای در نظر گرفته شده برای این محفظه در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

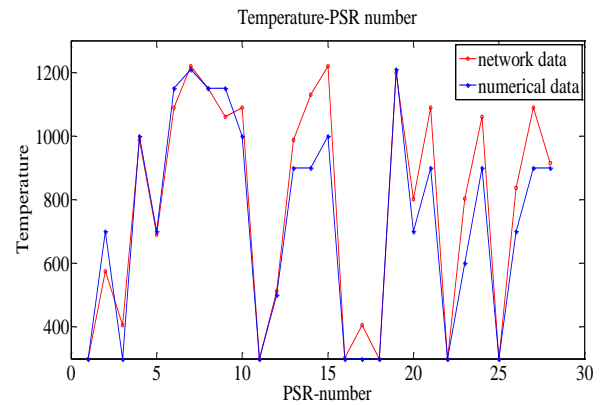


شکل ۱۶- راکتورهای پیشنهادی برای مدل سازی شبکه‌ی محفظه

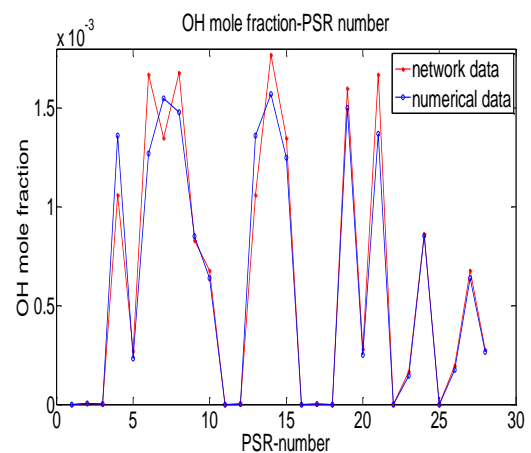
استفاده از مدل STANDARD k-ε و جریان احتراقی با استفاده از مدل EDC مدلسازی گردید. شبیه‌سازی در حالت RANS، پایا و متقارن محوری انجام گردید و سینتیک شیمیایی بکار رفته برای سوخت مایع کروسین شامل ۱۰ مرحله زیرواکنش همراه با ضرایب آرنیوس مناسب می‌باشد. در ابتدا با استفاده از حل غیر احتراقی، میدان جریان سرد جهت تشکیل نواحی بازگشتی ناشی از پیچش جریان و محاسبه‌ی زمان اقامت جریان در نواحی متخلف میدان انجام گردید و سپس مدل EDC جهت پیش‌بینی میدان احتراقی بکار گرفته شد. همچنین در ادامه با استفاده از روش شبکه‌ای و بکارگیری ۲۸ راکتور، ضمن اعتبارسنجی میدان حل، تخمین میدان دما و وجود گونه‌های احتراقی و آلاینده تکامل پیدا کرد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که علی‌رغم اعمال فرضیات ساده کننده همانند شرایط RANS و فرض تقارن محوری و همچنین در مدل شبکه‌ای بدون در نظرگیری هیچ گونه اغتشاش، امکان شبیه‌سازی این‌گونه محفظه‌های احتراق مهیا می‌باشد.

منابع

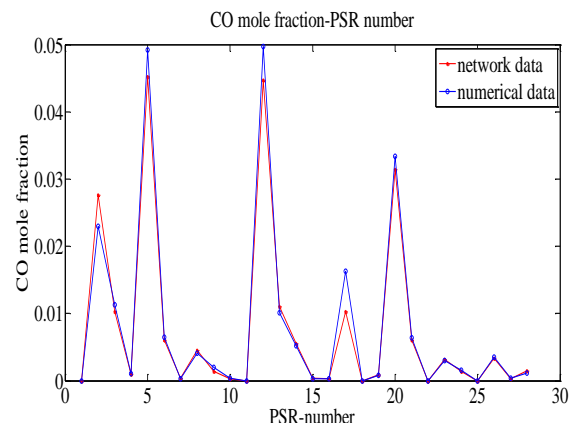
[1] Arthur H.Lefebvre, Dilip R.Ballal, "Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emission", Third Edition, Taylor and Francis Group, 2010
 [۲] فضل‌الهی، علیرضا، مردانی، امیر، شبیه‌سازی عددی جریان احتراقی در محفظه‌ی احتراق توربین گاز مدل با تکنولوژی ورودی هوای پیچش دوگانه، نشریه‌ی علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال نهم، شماره‌ی دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۵
 [3] Anthony F.Shelborn, Devin W.Hodgson, Scott A.Drennan, Cheng-Pan Chou,"Flow Field Derived Equivalent Reactor Networks For Accurate Chemistry Simulation In Gas Turbine Combustor",GT2009-59861, 2009
 [4] Igor V.Novoselov, "Chemical Reactor Network For Combustion System Modeling", A Dissertation Submitted In Partial Fullfilment Of The Requirement For The Degree Of Philsophy , University Of Washington, 2006
 [5] Chi-Ming Lee, Krishna Kundu, "Simplified Jet-A Kinetick Mechanism For Combustor Application", NASA Technical Memorandum 105940, AIAA-93-0021
 [6] Bonnie J.Mcbride, "Coefficient For Calculating Thermodynamic And Transport Properties Of Individual Species", NASA Technical Memorandum 4513
 [7] Fluent inc, "Fluent 6.3 User's Guide"
 [8] Heitor, M. V., & Whitelaw, J. H. (1986). Velocity," temperature, and species characteristics of the flow in a gas-turbine combustor", *Combustion and Flame*, 64(1), 1-32.
 [9] C. K. W. Westbrook, J. Pitz, O. Herbinet, "A Detailed Chemical Kinetic Reaction Mechanism for n-Alkane Hydrocarbons from n-Octane to n-Hexadecane," *Combust. Flame*, 156 (1) 181-19, 2009
 [10] Stephan R.Turns, "An introduction to combustion, concepts and application", second edition, department of mechanical and nuclear engineering the pennsylvania state university
 [11] reaction-chemkin, "chemkin tutorial manual"
 [۱۲] کنکاشور، بنیامین، تابع جماعت، صادق، بررسی توزیع هوای محفظه‌ی احتراق موتور نمونه با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی هوافضای ایران، زمستان ۱۳۹۵



شکل ۱۹- مقایسه‌ی بین نتایج میدان دمایی حاصل از حل عددی و حل شبکه‌ای



شکل ۲۰- مقایسه‌ی بین نتایج کسر جرمی OH حاصل از حل عددی و حل شبکه‌ای



شکل ۲۱- مقایسه‌ی بین نتایج کسر جرمی CO حاصل از حل عددی و حل شبکه‌ای

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان احتراقی در محفظه‌ی احتراق لوله‌ای توربین گاز با تکنولوژی ورودی هوای پیچشی یگانه به‌همراه پاشش سوخت مایع به روش عددی و شبکه‌ای شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی عددی جریان اغتشاشی با