

شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل همزمان انرژی کوره واحد ۱۰۴ شرکت پالایش گاز پارسیان به منظور کاهش تلفات حرارتی و بهینه‌سازی مصرف سوخت

دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران،
 rezafruzi7373@gmail.com

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، nazif@eng.ikiu.ac.ir

کارشناس ارشد پژوهش و فناوری، پالایشگاه گاز پارسیان، لامرد، ایران، aref.ezoji54@gmail.com

کارشناس ارشد فرایند سوخت و احتراق، پالایشگاه گاز پارسیان، لامرد، ایران، sabet_mehdi@yahoo.com

رضا فیروزی

حمیدرضا نظیف*

علی اکبر ازوجی

مهدی ثابت

چکیده

در پژوهش حاضر، به شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل انرژی کوره واحد ۱۰۴ پالایشگاه پارسیان به منظور کاهش تلفات حرارتی و بهینه‌سازی مصرف سوخت پرداخته شده است. کوره دارای شش مشعل، ارتفاع ۲۹ متر و قطر ۵/۳۵ متر در محفظه احتراق بوده و به منظور گرمایش گاز طبیعی و احیا مواد جاذب رطوبت استفاده می‌شود. شبیه‌سازی با استفاده از مدل احتراقی species transport به همراه آشفتگی و تابش صورت گرفت. جهت صحت‌سنجی، نتایج عددی با داده‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه آن‌ها، بیانگر تطابق خوبی بین آن‌ها بوده و بیشترین خطای نسبی ۳/۹۱ درصد آمد. سپس، به بررسی تاثیر کاهش درصد هوای اضافی و پیش‌گرمایش آن پرداخته شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که کاهش درصد هوای اضافی از ۲۰ به ۵، منجر به کاهش تلفات به مقدار ۲۸ درصد و پیش‌گرمایش هوای ورودی احتراق از دمای ۳۰۸/۱۵ کلوین به ۴۵۸/۱۵، منجر به کاهش تلفات به مقدار ۲۰ درصد می‌شود. در شرایط بهینه عملکردی کوره، راندمان انرژی آن از ۲۰ درصد به ۳۱/۳۴ درصد و راندمان حرارتی از ۷۱/۱۱ درصد به ۷۸/۹ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: کوره نم زدایی، دینامیک سیالات محاسباتی، هوای اضافی، پیش‌گرمایش، تلفات حرارتی، تحلیل انرژی.

CFD simulation and simultaneous exergy analysis of parsian gas refinery 104 unit furnace in order to decreasing thermal wastes and fuel consumption optimization

R. Firuzi
H. R. Nazif
A. A. Azoji
M. Sabet

Department of Mechanical engineering , Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
 Department of Mechanical engineering , Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
 Parsian Gas Refinery, Lamerd, Iran
 Parsian Gas Refinery, Lamerd, Iran

Abstract

In the present paper, CFD simulation and simultaneous exergy analysis of parsian gas refinery 104 unit furnace is done in order to decrease thermal wastes and fuel consumption optimization. This furnace has six burner, 29 meter height and 5.35 meter diameter in the combustion chamber and using in order to heat natural gas and refresh the molecular screening. Simulations were performed using species transport model in combustion with turbulence and radiation. Numerical results have been compared with experimental data and a good agreement has been seen between these results and the maximum relative error is 3.91%. Numerical results show that decreasing excess air from 20% to 5%, leading to decrease 28% of outlet thermal wastes and preheating the combustion air temperature from 308.15 kelvin to 458.15 kelvin, leading to decrease 20% of outlet thermal wastes. In the optimum operation of furnace, it's exergy efficiency increasing from 20% to 31.34% and it's thermal efficiency increasing from 71.11% to 78.9%.

Keywords: Dehydration Furnace, Computational Fluids Dynamic, Excess air, Preheating, Thermal wastes, Exergy analysis.

۱-مقدمه

سوخت، کاهش راندمان، و در نتیجه افزایش هزینه و کاهش سودآوری صنایع مختلف می‌گردد. صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش تلفات حرارتی و همچنین کنترل نشر آلاینده‌ها به منظور بهبود کارایی کوره-ها، از جمله عواملی هستند که همواره نیاز به مطالعه و پژوهش روی آن‌ها الزامی به نظر می‌رسد. در مطالعات گذشته تاثیر پارامترهای مختلف مانند نوع سوخت، مدل‌های مختلف مورد استفاده در شبیه‌سازی، تحلیل انرژی و انرژی در کوره‌های مختلف و نتایج حاصل از آن‌ها بررسی شده است. مقدسی و ریاضی به بررسی تاثیر دمای پیش گرم و میزان رقیق سازی بر میدان احتراقی و ترکیب محصولات احتراق در یک محفظه احتراق پرداختند. در این سیستم نوین، به کمک رژیم

استفاده از کوره‌های احتراقی در صنایع مختلف جهت افزایش دمای یک سیال تا رسیدن به یک دمای معین برای جداسازی فیزیکی یا انجام واکنش شیمیایی کاربرد فراوانی در صنایع نفت، گاز، و پتروشیمی دارد. در این کوره‌ها از سه بخش تابش، جابجایی و لوله‌های خطوط انتقال به منظور انتقال گرما استفاده می‌شود. بخش تابشی یا محفظه احتراق کوره، محل وقوع احتراق و انتقال گرما به سیال درون دسته لوله‌ها می‌باشد. در واقع در این کوره‌ها سیال فرایندی از طریق لوله‌ها به صورت یک یا چندپایه وارد کوره شده و دمای آن با استفاده از انجام عمل احتراق در مشعل‌ها و انتقال گرما از طریق مکانیزم‌های تابش، جابجایی و رسانش افزایش یافته و در نهایت از کوره خارج می‌شوند. وجود مشکل و اختلال در عملکرد آن‌ها باعث افزایش مصرف

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: nazif@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۲

MILD¹ علاوه بر رفع برخی مشکلات احتراق اکسیژنی، اکسید نیتروژن از ترکیب گازهای خروجی حذف شده و محصولات احتراق عمدتاً متشکل از H₂O و CO₂ هستند. همچنین، افزایش رقیق سازی به کمک CO₂ در شرایط ثابت ورودی، دمای بیشینه را کاهش می‌دهد [۱]. ابراهیمی فردویی و همکاران به بررسی تاثیر سینتیک شیمیایی و مدل تابشی در شبیه سازی احتراق گاز طبیعی- اکسیژن پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از مدل تابشی جهات گسسته نسبت به مدل P-I دارای عملکرد و دقت محاسباتی بالاتری می‌باشد. [۲]. خلیل و همکاران به مطالعه تجربی مشعل متان- اکسیژن در شرایط MILD در جریان چرخشی پرداختند. آن‌ها نوسان‌های شعله را برای درصد های مختلفی از رقیق سازی به کمک CO₂ اندازه گیری کرده و پایداری شعله را با افزایش رقیق سازی از گذر از یک حد نصاب گزارش کردند [۳]. مردانی و فضل الهی به بررسی ساختار شعله و برخی مشخصه‌های احتراق O₂/CO₂ با سوخت متان- هیدروژن پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از وجود ناحیه واکنش وسیع تر و توزیع دمای یکنواخت تر در احتراق oxy-MILD نسبت به احتراق air-Mild بود. همین طور در شرایط یکسان ورودی، برای احتراق oxy-MILD غلظت گونه‌های OH و HCO کمتر و غلظت گونه‌های H₂O و CO در مقایسه با احتراق air-Mild بیشتر است [۴]. مقیمان و همکاران با پیش گرمایش سوخت گاز ورودی با استفاده از المنت‌های الکتریکی به میزان ۷۹۱ درجه سلسیوس و تجزیه حرارتی متان قبل از ورود به کوره، نشان دادند که دوده حاصل از تجزیه حرارتی، پس از ورود به شعله، باعث افزایش تابش به میزان ۹۱ درصد شد. همچنین، نشان داده شد که افزایش تابش از شعله، علاوه بر افزایش بازده، باعث کاهش بیشینه دمای شعله می‌شود و نتیجه آن نیز کاهش انتشار آلانده ناکس است [۵]. جوادی و مقیمان به منظور افزایش تابش شعله، گاز متان ورودی به مشعل را تا ۳۹۱ درجه سلسیوس گرم کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش دمای سوخت گاز طبیعی ورودی به مشعل تا دمای ۲۸۱ درجه سلسیوس، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در شعله ایجاد نمی‌شود، اما، با افزایش دمای گاز از ۲۸۱ درجه تا ۳۹۱ درجه سلسیوس، به علت تجزیه حرارتی سوخت گاز طبیعی و آزاد شدن گونه‌هایی مانند کربن که ضریب صدور بالایی دارند، انتقال گرمای تابشی به میزان ۹۱ درصد افزایش می‌یابد [۶].

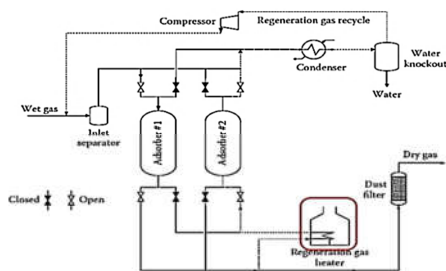
یوان و همکاران به ارزیابی پتانسیل ذخیره انرژی در یک کوره کراکینگ صنعتی اتیلن با استفاده از تحلیل انرژی پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که راندمان انرژی کوره برابر ۴۳ درصد بوده و بیشترین مقدار تخریب انرژی مربوط به فرایند احتراق می‌باشد. همچنین یک پتانسیل بالا برای ذخیره انرژی در لوله‌های راکتور، فرایند احتراق درون کوره و سوپر هیترهای تغذیه بخار وجود دارد [۷].

مرور مقالات گذشته نشان می‌دهد که مطالعات زیادی بر روی مدل سازی کوره‌های مختلف و پارامترهای موثر بر عملکرد آن‌ها صورت گرفته است ولی تاکنون تاثیر ترکیب کاهش هوای اضافی و پیش- گرمایش آن و همچنین تحلیل انرژی بر عملکرد و تلفات حرارتی کوره‌ها و راندمان قانون دوم ترمودینامیک انجام نشده است که در واقع،

این هدف و نوآوری کار حاضر می‌باشد.

۲- فرایند نم زدایی گاز طبیعی و اهمیت آن

با افزایش میزان تولید، انتقال، توزیع و مصرف گاز طبیعی، اهمیت تولید آن بدون ناخالصی افزایش می‌یابد. انتقال سیالات به دلیل اشباع بودن آن با بخار آب در سیستم‌های فرآوری، در مسیر شیرهای کنترل و در شبکه‌های توزیع با خطر بروز مشکلات زیادی همراه است. علاوه بر این، تقطیر آب در طول خطوط انتقال، علاوه بر ایجاد افت فشار زیاد، باعث بروز ساییدگی مکانیکی و همچنین خوردگی شیمیایی داخلی در آن‌ها می‌شود. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی، تمامی گاز مصرفی که از طریق خطوط لوله به محل‌های مصرف منتقل می‌شوند، بایستی نم زدایی^۲ شود [۸]. جذب مولکولی آب و هیدروکربور به دو طریق ممکن است انجام شود. یکی جذب به وسیله واکنش‌های شیمیایی بین ماده جذب شدنی و ماده جاذب رطوبت و دیگری جذب در اثر خاصیت میعان مویینگی، به گونه‌ای که ملکول‌های آب و هیدروکربورهای سنگین در حفره‌های دانه‌های جاذب رطوبت به دام افتاده و مایع شوند و در دمای بالا مجدداً به صورت بخار از درون حفره- ها خارج شده و بستر احیا شود. ماده جامد جاذب رطوبت پس از مدتی از آب اشباع شده و دیگر قادر به نم زدایی نخواهد بود. به منظور احیا و برطرف نمودن رطوبت در مواد جامد اشباع شده از آب برای استفاده مجدد آن‌ها در فرایند مورد نظر، از کوره نم زدایی استفاده می‌شود. در شکل ۱ طرحواره فرایند نم زدایی با مواد جامد رطوبت و کوره مورد نظر (Regeneration Gas Heater) آورده شده است.



شکل ۱- طرحواره فرایند نم زدایی گاز طبیعی با مواد جامد [۸]

بوکسیت، آلومینای فعال، سیلیکاژل، زغال فعال و غربال ملکولی از جمله مواد جامد جاذب رطوبت می‌باشند. در شکل ۲ نمونه ای از ماده جامد جاذب رطوبت مورد استفاده در فرایند نم زدایی گاز طبیعی آورده شده است.

۳- هندسه کوره نم زدایی

نمای کلی هندسه ایجاد شده برای کوره با کمک نرم افزار Solidworks در شکل ۳ نمایش داده شده است. قطر بدنه کوره در محفظه احتراق برابر ۵/۳۵ متر و ارتفاع آن ۱۲ متر، ارتفاع کوره در قسمت جابجایی ۵ متر، ارتفاع دودکش آن ۱۲ متر و قطر آن ۱/۵ متر می‌باشد. تعداد مشعل‌های کوره مورد بررسی، شش عدد از نوع مکش طبیعی است که در کف کوره قرار گرفته و نحوه چینش آن‌ها در شکل

²Dehydration

¹Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution

۴ آورده شده است.

$$\nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \bar{U} + (\nabla \bar{U})^T) - \rho \bar{U} \bar{U}') + \rho g \quad (2)$$

در این معادله، U' بردار سرعت نوسانی آشفتگی، μ لزجت ملکولی دینامیکی سیال و p فشار است.

فرم کلی معادله بقای انرژی به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot (\rho E + p) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \bar{U}) \right) + S_h \quad (3)$$

که در آن، k_{eff} ضریب رسانایی گرمایی موثر، J_i شار نفوذی گونه i و h انتالپی است. همچنین S_h منبع تولید یا مصرف انرژی است. در مدل سازی جریان مخلوط اجزا فرض می شود که اجزای مختلف در مقیاس مولکولی به هم آمیخته شده اند و در یک میدان مشترک سرعت، فشار و دمایی دارند و مکانیزم انتقال جرم اجزا به صورت نفوذ و جابجایی می باشد. معادله بقای گونه ها به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{Y}_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

در معادله فوق، R_i نرخ خالص تولید گونه i ام توسط واکنش شیمیایی، S_i نرخ ایجاد توسط اضافه شدن توسط فاز گسسته و سایر منابع، J_i شار دیفیوژنی گونه i ام می باشد که در جریان های مغشوش به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\bar{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_i} \right) \nabla Y_i \quad (5)$$

در معادله فوق، Sc_i عدد اشمیت می باشد که به صورت زیر محاسبه می شود و مقدار مورد استفاده در حالت معمولی برابر با 0.7 می باشد.

$$Sc_i = \frac{\mu_i}{\rho D_i} \quad (6)$$

فرایند احتراق مشتمل بر اکسیداسیون اجزای ترکیب سوختی است که قابلیت اکسید شدن دارند و لذا می توان آن را به صورت معادله ای شیمیایی بیان کرد. عدد بدون بعد بولتزمن به منظور مقایسه تاثیر دو مکانیزم انتقال حرارت جابجایی و تابشی در فرایند احتراق به کار می رود و برای یک جریان به صورت زیر بیان می شود [۹]:

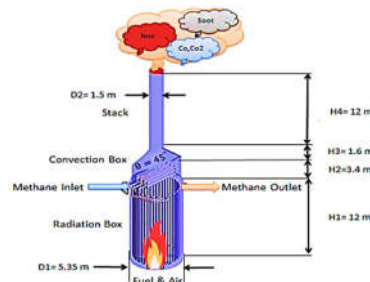
$$Bo = \frac{(\rho u c_p)_{inlet}}{\sigma T_{AF}^3} \approx \frac{convection}{radiation} \quad (7)$$

که در آن، σ ثابت استفان بولتزمن و T_{AF} ، دمای شعله آدیاباتیک^۱ بر حسب کلونین می باشد. این دما به نسبت هم ارزی وابسته بوده و تغییرات آن برای سوخت های مختلف بر حسب نسبت هم ارزی در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به این که در قسمت تابشی کوره، مقادیر مربوط به دما بالا بوده و انتقال گرمای تابشی سهم قابل توجهی در کوره دارد، لذا مدل سازی تابش در کوره مورد نظر دارای اهمیت خاصی می باشد [۲].

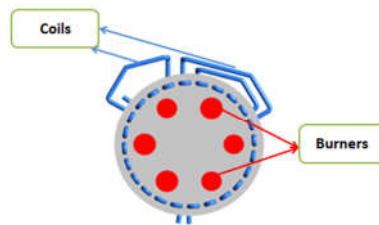


شکل ۲- انواع مواد جاذب رطوبت در نم زدایی گاز طبیعی، (الف) سیلیکاژل، (ب) آلومینای فعال [۸]

گاز طبیعی به منظور گرمایش و افزایش دما از قسمت جابجایی کوره از طریق دسته لوله ها وارد کوره گردیده و پس از گرمایش اولیه، وارد قسمت تابشی کوره گردیده و پس از رسیدن به دمای مورد نظر از آن خارج و ادامه فرایند نم زدایی را طی می کند. تعداد دسته لوله های موجود در کوره سه پاس، قطر دسته لوله های ورودی به کوره برابر 0.116 متر، طول موثر دسته لوله ها برابر 2.45 متر و تعداد دور آن ها در هر پاس برابر با 8 عدد و در کل کوره برابر با 24 دور می باشد.



شکل ۳- هندسه ایجاد شده کوره و نامگذاری قسمت های مختلف آن



شکل ۴- چینش مشعل ها در کف کوره

۴- معادلات حاکم بر شبیه سازی

مدل های دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای حل معادلات مومنوم و اندازه حرکت برای تحلیل هیدرو دینامیک سیالات مورد استفاده قرار می گیرند. در کوره مورد نظر علاوه بر این معادلات، به علت وجود احتراق و انتقال گرما، نیاز به اعمال معادلات مربوط به احتراق و انرژی می باشد. معادلات حاکم در اعداد ماخ پایین (کمتر از 0.3) عبارتند از [۹]:

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (8)$$

در این معادله، ρ چگالی سیال و \bar{U} متوسط بردار سرعت است که در یک فضای سه بعدی تعریف شده است.

معادله بقای اندازه حرکت

¹ Adiabatic Flame Temperature

کیلوپاسکال	خروجی فشار	خروجی کوره
آدیاباتیک	دیوار	دیواره کوره

۶- مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی کوره

پس از ایجاد هندسه و شبکه‌بندی آن، به شبیه‌سازی احتراق و گرمایش متان درون دسته لوله‌ها با کمک نرم افزار Ansys Fluent پرداخته شده است. برای توصیف جریان مغشوش نیز از مدل $k-\epsilon$ با $Realizable$ رفتار نزدیک دیواره استاندارد استفاده شده است. این مدل برای هر یک از متغیرهای انرژی جنبشی اغتشاشی k و نرخ اتلاف اغتشاش ϵ ، یک معادله انتقال حل می‌کند [۹]. معادلات حاکم بر این مدل به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{ve}} + C_{3\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{4\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (15)$$

در معادلات فوق، عبارت G_k نشان دهنده انرژی جنبشی متلاطم به دلیل گرادیان‌های سرعت متوسط و G_b نشان دهنده انرژی جنبشی متلاطم به دلیل بویانسی (شناوری) می‌باشند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$G_k = -\overline{\rho u_i \rho u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (16)$$

$$G_b = -\beta g_i \frac{\mu_t}{\rho r_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (17)$$

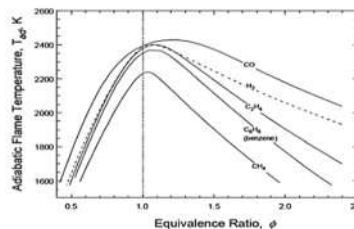
همچنین ضرایب C موجود در معادلات، ضرایب ثابت مورد استفاده در مدل مورد نظر می‌باشند. به منظور مدل‌سازی نرخ واکنش شیمیایی از روش Eddy _ dissipation با در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی به صورت دو مرحله‌ای استفاده شده است. در مخلوط دو مرحله‌ای متان و هوا، ابتدا سوخت هیدروکربنی به گونه‌های میانی مانند CO تبدیل شده و سپس این گونه‌های میانی به محصولات نهایی احتراق مانند CO_2 و H_2O تبدیل می‌شوند. نتایج به دست آمده در این حالت با دقت زیادی قابل قبول و استفاده می‌باشند [۱۲]. در این مدل، عبارت نرخ خالص تولید گونه‌های k در واکنش مورد نظر ($R_{k,r}$) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$R_{k,r} = v'_{k,r} M_{w,k} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,r}} \right) \quad (18)$$

$$(19)$$

$$R_{k,r} = v'_{k,r} M_{w,k} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum p Y_p}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}}$$

در معادلات فوق، Y_p کسر جرمی گونه تولیدی p ام، Y_R کسر جرمی گونه واکنش دهنده (R) و A و B ضرایب ثابت تجربی بوده و به ترتیب دارای مقادیر ۴ و ۰/۵ می‌باشند. در سیستم‌های احتراقی دما به واسطه انجام واکنش‌های شیمیایی بالا بوده و همچنین با کاهش درصد هوای اضافی و پیش گرمایش هوای ورودی به کوره، دمای شعله آدیاباتیک افزایش و در نتیجه عدد بولتزمن کاهش می‌یابد و به همین علت، مدل‌سازی تابش حائز اهمیت بوده و بر دقت حل عددی می‌افزاید. در این مقاله از مدل جهات گسسته^۱ جهت مدل‌سازی و پیش-



شکل ۵- دمای شعله آدیاباتیک سوخت بر حسب نسبت هم ارزی [۱۰]

در واقع مکانیزم تابشی مکانیزم غالب در انتقال حرارت درون محفظه احتراق کوره می‌باشد [۲]. فرم کلی معادله حاکم بر انتقال حرارت تابشی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_r) I(\vec{r}, \vec{s}) = am^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_r}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\theta' \quad (8)$$

در معادله فوق، \vec{r} بردار موقعیت، \vec{s} بردار جهت، a ضریب جذب، T دمای موضعی، I شدت تابش، ϕ تابع فاز، θ' زاویه جامد، σ ضریب ثابت استفان بولتزمن، S طول مسیر و n ضریب شکست می‌باشد [۹]. همچنین معادله کلی واکنش احتراق سوخت متان با هوا در حالت استوکیومتری به صورت زیر می‌باشد:



۵- شرایط مرزی معادلات حاکم بر شبیه‌سازی کوره

در این مدل‌سازی شرایط مرزی با توجه به شرایط طراحی کوره تعریف شده‌اند [۱۱]. شرایط مرزی مورد نظر در جدول ۱ آورده شده است. درصد هوای اضافی مورد استفاده برای احتراق، ۲۰ درصد می‌باشد. روی دیواره کوره و همچنین دیواره دسته لوله‌ها برای سرعت، شرط عدم لغزش ($u=0$) و همچنین روی دیواره کوره برای دما، شرط عایق بودن در نظر گرفته شده است. برای محاسبات عددی درانتقال گرما میان شعله و سطح جامد دسته لوله‌هایی که سیال متان در آن جریان دارد، شرایط دیواره آن‌ها از لحاظ حرارتی به صورت coupled در نظر گرفته شده است. معادلات این حالت عبارتند از:

$$T_{fluid} = T_{solid} \quad (10)$$

$$q_{fluid} = q_{solid} \quad (11)$$

$$q_{fluid} = k_{fluid} \quad (12)$$

$$q_{solid} = k_{solid} \quad (13)$$

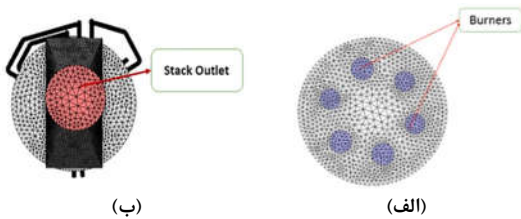
در معادلات فوق، T دما، q شار گرمایی، k ضریب رسانایی گرمایی، و n بردار عمود بر سطح می‌باشند. در این روش شار گرمایی از ناحیه سیال به دلیل دمای بالاتر به ناحیه جامد دارای دمای پایین تر منتقل می‌شود و دمای جامد از طریق سطح مشترک به سیال منتقل می‌شود. جسم جامد (استیل) دارای ضخامت ۱۴/۲۷ میلی‌متر و رسانایی گرمایی ۵۰ w/m-K می‌باشد.

جدول ۱- شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی کوره [۱۱]

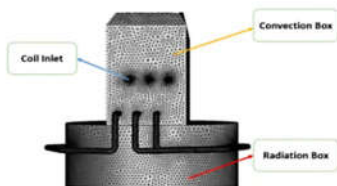
مقدار	نوع شرط مرزی	شرط مرزی
۵/۰۴۵ کیلوگرم بر ثانیه	ورودی دبی جرمی	مشعل‌ها
۱۳/۸۱ کیلوگرم بر ثانیه	ورودی دبی جرمی	ورودی کویل‌ها
فشار: ۹۷۵۵ کیلوپاسکال	خروجی فشار	خروجی کویل‌ها

¹Discrete Ordinates

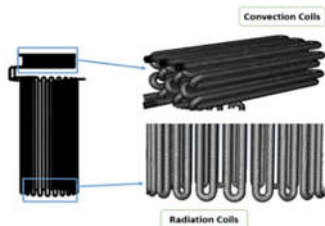
زیاد، از شبکه چهاروجهی نامنظم^۲ در شبکه‌بندی هندسه مورد نظر استفاده شده است. این نوع شبکه در اکثر مسائل کاربردی از جمله شبیه‌سازی جریان‌های داخلی و خارجی در صنعت به کار می‌رود. شبکه محاسباتی با کمک نرم افزار Ansys Meshing ایجاد شده و قسمت‌های مختلف آن در شکل‌های ۹-۶ آورده شده است. با توجه به شکل ۹، در اطراف کویل‌های کوره و روی سطح جسم جامد و همچنین دیواره‌های کوره از شبکه‌بندی ریزتری نسبت به سایر قسمت‌های آن به منظور افزایش دقت محاسبات عددی استفاده شده است.



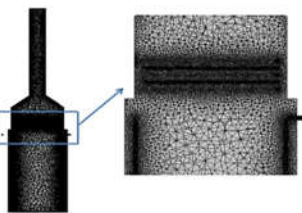
شکل ۶- شبکه ایجادشده برای کوره، (الف) مشعل‌ها در قسمت کف کوره و (ب) دیواره و خروجی کوره



شکل ۷- شبکه ایجادشده در قسمت تشعشع و جابجایی کوره



شکل ۸- شبکه ایجادشده برای لوله‌های درون کوره



شکل ۹- شبکه ایجادشده در صفحه مرکزی کوره

۸- اعتبارسنجی نتایج عددی

به‌منظور بررسی دقت نتایج عددی مورد نظر، به مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی موجود برای دما بر حسب کلونین در نقاط مورد نظر

بینی شار گرمایی تابشی استفاده شده است. این مدل تمام محدوده‌های ضخامت اپتیکال را پوشش می‌دهد و این امکان را فراهم می‌سازد تا دامنه وسیعی از مدل‌سازی‌ها، از تابش‌های سطح به سطح تا تابش‌های پیش بینی شده در مسائل احتراق مدل شوند [۱۳]. معادله حاکم بر این مدل به صورت زیر می‌باشد:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_r) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_r}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\theta' \quad (20)$$

در مدل‌سازی تابش برای سطح جامد دسته لوله‌ها، از مدل سطح مات استفاده شده است.

۷- روش عددی و بررسی استقلال شبکه محاسباتی

جهت انجام حل عددی مطلوب از حلگر سه بعدی با دقت مضاعف و تفکیک کننده معادلات در حالت پایا استفاده شده است. جهت معرفی نوع احتراق و سوخت مصرفی گزینه Species Transport در نرم افزار Fluent فعال گردیده است. سوخت مصرفی مخلوط متان و هوا است که واکنش احتراق آن در معادله (۹) آورده شده است. برای فرمول‌بندی معادلات حاکم نیز از گسسته‌سازی‌های مرتبه دوم برای تمامی عبارت‌های موجود در معادلات مورد نظر و برای کوپلینگ بین فشار و سرعت، از الگوریتم coupled استفاده شده است. این الگوریتم در شبیه‌سازی احتراق و انتقال گرما کاربرد گسترده‌ای دارد. پس از انجام تنظیمات حل می‌بایست دفعات تکرار حل را تنظیم نمود. معیار همگرایی معادلات انرژی و تابش برابر 1×10^{-6} و برای مابقی معادلات برابر با 1×10^{-4} در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی در کوره مورد نظر، به بررسی دمای متوسط در خروجی کوره و لوله‌های درون آن (بر حسب کلونین) برای مقادیر متفاوت سلول پرداخته شده و نتایج حاصل در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج این جدول، در تعداد سلول ۴۶۳۲۹۲۸ مقدار دمای متوسط در خروجی قسمت‌های مختلف کوره نسبتاً یکنواخت می‌شود. بنابراین به منظور بالا بردن دقت محاسباتی نتایج نهایی، از شبکه دارای تعداد سلول ۷۸۷۵۹۷۶، تعداد گره ۱۵۱۸۲۳۶ با حداقل اندازه ۰/۰۱ متر و حداکثر اندازه ۰/۰۵ متر برای اجرای شبیه‌سازی‌های مورد نظر استفاده شده است.

جدول ۲- دمای خروجی کوره و لوله‌ها برای مقادیر متفاوت سلول

تعداد سلول	دمای خروجی کوره	دمای خروجی لوله‌ها
۱۲۱۷۶۸۹	۸۰۵/۲۱	۶۲۶/۲۶
۲۴۳۸۳۸۵	۷۵۹/۳۲	۶۱۳/۰۸
۴۶۳۲۹۲۸	۷۴۶/۸۷	۶۱۲/۰۲
۷۸۷۵۹۷۶	۷۰۸/۱۲	۶۰۷/۶۸
۱۵۶۸۹۹۴۰	۷۰۷/۹۶	۶۰۵/۱۶

بررسی استقلال حل از شبکه‌بندی^۱ هندسه کوره طوری صورت گرفته است که به ازای کوچکتر نمودن شبکه، تغییری در نتایج حاصل ایجاد نگردد و نتایج مستقل از شبکه ارائه شود. با توجه به پیچیدگی هندسی مسئله و نیاز به همگرایی مناسب و همچنین تعداد سلول‌های

² Tetrahedral

¹ Grid Study

کوره [۱۱] پرداخته شده و نتایج حاصل در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این جدول، تطابق خیلی خوبی بین نتایج تجربی و عددی حاصل وجود دارد و حداکثر خطای نسبی برابر ۳/۹۱ درصد می‌باشد.

جدول ۳- اعتبارسنجی نتایج عددی با مقادیر تجربی موجود [۱۰]

خطا (%)	تجربی	عددی	پارامتر
۳/۴۵	۵۸۹	۶۰۹/۳۶	دمای خروجی لوله اول
۲/۱۶	۵۸۹	۶۰۱/۷۱	دمای خروجی لوله دوم
۳/۹۱	۵۸۹	۶۱۱/۹۸	دمای خروجی لوله سوم
۲/۳۶	۱۰۴۱	۱۰۷۶	دمای گازهای خروجی بخش تشعشع
۳/۲۹	۶۵۴	۶۷۵/۵۴	دمای گازهای خروجی بخش جابجایی

۹- تحلیل انرژی

تحلیل انرژی همراه با قانون اول و دوم ترمودینامیک، این امکان را فراهم می‌سازد که روش مطلوب برای تحلیل سیستم‌های تبدیل انرژی و همچنین شناخت سطوح انرژی و فرایندهای نامطلوب ترمودینامیکی سیستم‌های انرژی را بتوان یافت. این روش، ابزاری مفید برای ظاهر کردن تفاوت بین تلفات انرژی با برگشت ناپذیری‌های داخلی در یک فرایند می‌باشد [۱۴]. با این روش می‌توان انرژی نقطه‌ای را که در آن‌ها تبدیل انرژی صورت می‌گیرد، به دست آورد و راندمان اجزای سیکل را محاسبه کرد. همچنین می‌توان محل وقوع بیشترین تلفات را شناسایی و برای کاهش آن‌ها راهکارهایی را ارائه کرد [۱۴]. برای گرمایش سیال درون لوله‌های کوره، سه فرایند مهم و اساسی صورت می‌گیرد که عبارتند از:

الف) فرایند آدیباتیک احتراق

ب) فرایند انتقال گرما به سیال درون لوله‌ها

ج) مرحله خروج گازهای داغ از دودکش کوره

بنابراین تلفات داخلی انرژی کوره مجموع تلفات انرژی احتراق، انتقال گرما و دودکش می‌باشد [۷]. بر خلاف انرژی که از بین نمی‌رود و تنها از نوعی به نوع دیگر تبدیل می‌شود، انرژی به واسطه بازگشت ناپذیری‌های یک فرایند از بین می‌رود. این هدر رفت با افزایش آنتروپی سیستم و محیط متناسب است و می‌توان آن را با در نظر گرفتن روابط بقای جرم (رابطه ۲۰)، قانون اول ترمودینامیک (رابطه ۲۱) و ترکیب آن با قانون دوم ترمودینامیک (رابطه ۲۲) به دست آورد.

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (20)$$

$$\frac{dE}{dt}_{cv} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_e h_e \quad (21)$$

$$\frac{dS}{dt}_{cv} = \sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen} \quad (22)$$

در روابط فوق، \dot{m} دبی جرمی، \dot{Q} نرخ حرارت داده شده به حجم کنترل، \dot{w} نرخ کار صورت گرفته توسط حجم کنترل، E انرژی کل، h آنتالپی و s آنتروپی بر واحد جرم جریان و اندیس‌های i و e به ترتیب برای جریان‌های ورودی و خروجی به کار می‌روند. رابطه (۲۲) قانون دوم ترمودینامیک است که در آن نرخ تغییرات آنتروپی حجم کنترل بر اساس اختلاف آنتروپی ورودی و خروجی جریان، آنتروپی ایجاد شده بر اثر بازگشت ناپذیری‌ها ($\dot{S}_{generation}$) و انتقال گرما با منابع گرمایی مختلف (\dot{Q}_i) با دماهای متفاوت (T_i) بیان می‌شود. با ترکیب قوانین اول

و دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل، به رابطه زیر می‌رسیم [۱۵]:

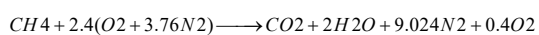
$$\frac{d\phi}{dt}_{cv} = \sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i \epsilon_i - \sum \dot{m}_e \epsilon_e - \dot{I} \quad (23)$$

در رابطه فوق، ϕ انرژی کل سیستم، \dot{I} برگشت ناپذیری و ϵ انرژی جریانی بر جرم واحد است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\epsilon = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (24)$$

انرژی همواره نسبت به یک حالت مرجع (دما و فشار محیط) محاسبه و ارزیابی می‌شود [۷]. در این ارزیابی دما و فشار مرجع هوا به ترتیب برابر با ۲۹۸ کلوین و ۱۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. معادلات استوکیومتری، تشریح ساده‌ای از واکنش‌های احتراق کامل اجزای قابل احتراق سوخت با اکسیژن را به همراه موازنه مواد و واکنش‌ها بر مبنای مولی یا جرمی ارائه می‌کنند. معادله واکنش کلی سوخت متان در حالت ۲۰ درصد هوای اضافی به صورت زیر می‌باشند:

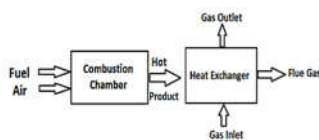
$$(25)$$



برای محاسبه انرژی بایستی درصد مولی هر یک از اجزای گازهای حاصل از احتراق محاسبه گردد. درصد مولی محصولات احتراق از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$y_x = \frac{n_x}{n_{total}} \quad (26)$$

که در آن، y_x کسر مولی گونه X ام، n_x تعداد مول‌های گونه X ام در محصولات احتراق و n_{total} تعداد کل مول‌های محصولات احتراق می‌باشند. یک کوره می‌تواند همانند شکل ۱۰ به محفظه احتراق و مبادله کن گرمایی تقسیم شود. داده‌های مربوط به آنتالپی و آنتروپی و سایر خواص مورد نیاز در محاسبه و تحلیل انرژی و انرژی کوره از مرجع [۱۵] استخراج شده اند و محاسبات آن‌ها با کمک نرم افزار EES صورت گرفته است.



شکل ۱۰- طرحواره کلی محفظه احتراق و مبادله کن گرمایی کوره [۱۵]

۹-۱- آنالیز قانون اول برای محفظه احتراق کوره

محفظه احتراق یک کوره به خوبی عایق بندی گردیده و بنابراین تلفات حرارتی آن به محیط اطراف صفر می‌باشد. همچنین کار انجام شده در آن برابر صفر بوده و انرژی جنبشی و پتانسیل جریان سیال در آن قابل چشم پوشی می‌باشند. لذا معادله موازنه انرژی محفظه احتراق کوره با فرضیات ارائه شده به صورت زیر می‌باشد [۱۵]:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE}{dt}_{system} \quad (27)$$

معادله فوق در حالت پایا به صورت زیر می‌باشند:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (28)$$

$$\dot{m}_f h_f + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_p h_p \quad (29)$$

در معادلات فوق، \dot{m}_f دبی جرمی سوخت، h_f آنتالپی سوخت، \dot{m}_a دبی جرمی هوا، h_a آنتالپی هوا، \dot{m}_p دبی جرمی محصولات احتراق و h_p آنتالپی محصولات احتراق می‌باشند. با توجه به فرضیات فوق، بازده

$$\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out} - \dot{X}_{destroyed} = \left(\frac{dX}{dt}\right)_{system} \quad (40)$$

$$\dot{I}_H = \dot{m}_p(\varepsilon_p - \varepsilon_g) + \dot{m}_m(\varepsilon_{m,inlet} - \varepsilon_{m,outlet}) \quad (41)$$

در معادلات فوق، \dot{I}_H نرخ تخریب انرژی در مبادله کن گرمایی درون کوره می‌باشد. بنابراین نرخ تخریب انرژی در کوره (\dot{I}_F) برابر است با:

$$\dot{I}_F = \dot{I}_c + \dot{I}_H \quad (42)$$

همچنین بازده قانون دوم ترمودینامیک برای مبادله کن گرمایی کوره به صورت زیر به دست می‌آید:

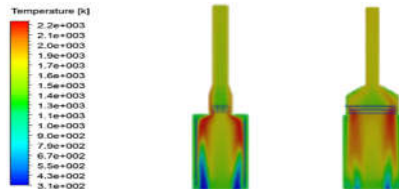
$$\omega_H = \frac{\dot{m}_m(\varepsilon_{m,outlet} - \varepsilon_{m,inlet})}{\dot{m}_p(\varepsilon_p - \varepsilon_g)} * 100 \quad (43)$$

در نهایت، بازده انرژی کلی کوره با کمک رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

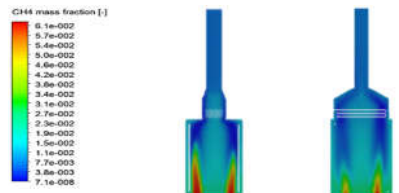
$$\omega_F = \frac{\dot{m}_m(\varepsilon_{m,outlet} - \varepsilon_{m,inlet})}{\dot{m}_f \varepsilon_f} * 100 \quad (44)$$

۱۰- بحث و بررسی نتایج

در این قسمت به منظور بحث و بررسی نتایج حاصل، به ارائه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کوره در حالت‌های مختلف عملکردی پرداخته شده است. نتایج مربوط به توزیع دمای کوره در شکل ۱۱ و توزیع کسر جرمی متان در شکل ۱۲ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۱، بیشترین دما در نوک محل شکل‌گیری شعله می‌باشد و با نزدیک شدن به قسمت‌های بالای کوره و کامل شدن انجام واکنش احتراق، دمای محفظه کوره نیز افزایش یافته است. با توجه به شکل ۱۲، بیشترین غلظت سوخت متان در قسمت مشعل‌ها (ورودی کوره) می‌باشد که در این قسمت احتراقی صورت نگرفته است. در ادامه به دلیل انجام احتراق و شکل‌گیری شعله، اکسیژن و متان مصرف شده و از میزان غلظت آن‌ها کاسته شده است.



شکل ۱۱- توزیع دما در صفحات مرکزی کوره



شکل ۱۲- توزیع کسر جرمی متان در صفحات مرکزی کوره

با توجه به این که واکنش احتراق به صورت ایده آل صورت نگرفته است، میزان اکسیژن و کربن در خروجی کوره به صفر نرسیده است و گونه مونوکسید کربن به عنوان یکی از گونه‌های میانی در محصولات احتراق مشاهده شده است که کانتورهای دوبعدی آن در صفحات مرکزی کوره در شکل ۱۳ آورده شده است. با توجه به این شکل، غلظت مونوکسید کربن در ناحیه نزدیک شعله به شدت افزایش می‌یابد.

قانون اول ترمودینامیک برای محفظه احتراق با کمک رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_p h_p}{\dot{m}_f h_f} * 100 \quad (30)$$

۹-۲- آنالیز قانون دوم برای محفظه احتراق کوره

بیشترین مقدار توان یا توان بازگشت پذیر تولیدی در محفظه احتراق با استفاده از معادله موازنه انرژی به صورت زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out} - \dot{X}_{destroyed} = \left(\frac{dX}{dt}\right)_{system} \quad (31)$$

معادله فوق در حالت پایا به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{I}_c = \dot{m}_f \varepsilon_f + \dot{m}_a \varepsilon_a - \dot{m}_p \varepsilon_p \quad (32)$$

که در آن، ε_f انرژی سوخت، ε_a انرژی هوا، ε_p انرژی محصولات احتراقی و همچنین \dot{I}_c نرخ تخریب انرژی در محفظه احتراق کوره می‌باشند. بازده قانون دوم ترمودینامیک برای محفظه احتراق کوره به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\omega_c = \frac{\dot{m}_p \varepsilon_p}{\dot{m}_f \varepsilon_f} * 100 \quad (33)$$

۱-۱- آنالیز قانون اول برای مبادله کن گرمایی کوره

در مبادله کن گرمایی درون کوره، شار گرمایی از ناحیه با دمای بالاتر ناشی از واکنش احتراق به ناحیه با دمای پایین تر انتقال می‌یابد. مقدار کار انجام شده در مبادله کن گرمایی برابر صفر بوده و انرژی جنبشی و پتانسیل در آن قابل نظر کردن می‌باشند. بنابراین معادلات موازنه انرژی برای مبادله کن گرمایی کوره به صورت زیر می‌باشند [۱۵]:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \left(\frac{dE}{dt}\right)_{system} = 0 \quad (34)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_p(h_p - h_g) + \dot{m}_m(h_{m,outlet} - h_{m,inlet}) \quad (35)$$

در معادلات فوق، h_g آنالیزی گازهای خروجی از کوره، \dot{m}_m دبی جرمی سیال ورودی به مبادله کن گرمایی، $h_{m,inlet}$ آنالیزی سیال ورودی به مبادله کن گرمایی و همچنین $h_{m,outlet}$ آنالیزی سیال خروجی از آن می‌باشند. بازده قانون اول ترمودینامیک برای مبادله کن گرمایی درون کوره به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\eta_H = \frac{\dot{m}_m(h_{m,outlet} - h_{m,inlet})}{\dot{m}_p(h_p - h_g)} * 100 \quad (36)$$

بازده انرژی کلی کوره با کمک رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\eta_F = \frac{\dot{m}_m(h_{m,outlet} - h_{m,inlet})}{\dot{m}_f h_f} * 100 \quad (37)$$

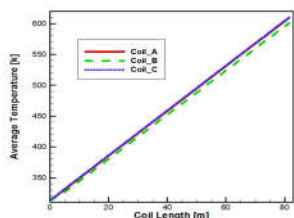
درصد تلفات حرارتی از کوره و راندمان حرارتی آن نیز از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$ThermalWastes(\%) = \frac{\dot{m}_p h_g}{\dot{m}_f h_f} * 100 \quad (38)$$

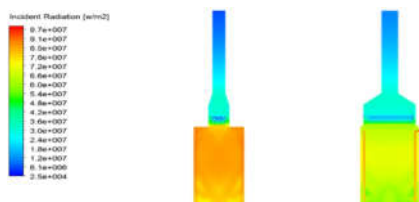
$$\eta_{f,th} = 100(\%) - ThermalWastes(\%) \quad (39)$$

۱-۲- آنالیز قانون دوم برای مبادله کن گرمایی کوره

با توجه به شرایط مرجع در تحلیل انرژی کوره، معادله موازنه انرژی برای مبادله کن گرمایی کوره به صورت زیر می‌باشد:

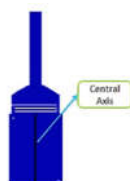


شکل ۱۶- نمودار تغییرات دمای متان درون لوله‌ها بر حسب طول



شکل ۱۷- توزیع شار گرمایی تابشی در صفحات مرکزی کوره

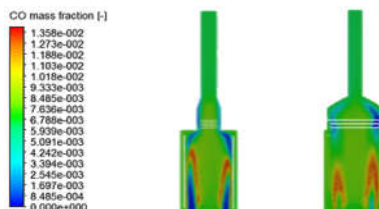
در ادامه به منظور بررسی تغییرات پارامترهای مختلف در فرایند احتراق، به بررسی تغییرات کسر جرمی متان، کربن دی اکسید، مونوکسید کربن، سرعت و دما بر روی محور مرکزی محفظه احتراق کوره که در شکل ۱۸ نشان داده شده، پرداخته شده است.



شکل ۱۸- محور مرکزی کوره در قسمت محفظه احتراق

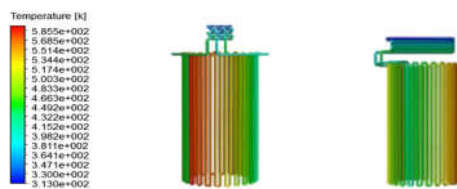
نمودار تغییرات کسر جرمی متان و مونوکسید کربن در طول محور مرکزی کوره به ترتیب در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها، با افزایش فاصله از کف کوره و انجام فرایند احتراق سوخت، کسر جرمی متان کاهش و کسر جرمی محصولات نهایی احتراق (کربن دی اکسید و بخار آب) افزایش می‌یابد. همچنین با شروع فرایند احتراق در نزدیکی مشعل‌های کوره، گونه میانی مونوکسید کربن، ابتدا افزایش یافته ولی با افزایش فاصله از کف کوره و مشعل‌ها و مصرف اکسیژن در فرایند احتراق، میزان آن کاهش یافته و به کمترین مقدار خود می‌رسد [۱]. همچنین نمودار تغییرات دما در طول محور مرکزی کوره در شکل ۲۱ آورده شده است. با توجه به این شکل، با انجام عمل احتراق در کوره، مقدار دما در این قسمت رفته رفته با افزایش فاصله از کف کوره، افزایش یافته و در ادامه با انتقال حرارت به سیال درون کویل‌ها، مقدار دما در روی این محور کاهش می‌یابد.

سپس در ادامه با کامل شدن احتراق، میزان انتشار این آلاینده کاهش می‌یابد. حضور اکسیژن و مونوکسید کربن در گازهای خروجی دودکش نشان دهنده هدر رفتن سوخت و اکسیدکننده می‌باشد [۱]. توزیع دمای سیال درون لوله‌های کوره در شکل ۱۴ و توزیع دمای جداره لوله‌ها در شکل ۱۵ آورده شده است. با توجه به شار گرمایی یکنواخت موجود در محفظه احتراق و جابجایی کوره، دمای سیال درون کویل‌ها رفته رفته افزایش یافته و در نهایت به مقدار مورد نیاز در خروجی کوره رسیده است. با افزایش مقدار دما از قسمت پایین به بالای کوره و همچنین برخورد مستقیم شار گرمایی به کویل‌های قسمت جابجایی کوره، حداکثر دمای جداره کویل‌ها در بالای کوره دیده می‌شود و با توجه به محدودیت‌های دمایی برای جداره کویل‌ها، نتایج حاصل در محدوده قابل قبول از نظر عملکردی می‌باشند.



شکل ۱۳- توزیع کسر جرمی مونوکسید کربن در صفحات مرکزی کوره

نمودار تغییرات دما درون لوله‌های مورد نظر بر حسب طول نیز در شکل ۱۶ آورده شده است. با توجه به این شکل، شار گرمایی یکنواخت درون کوره منجر به افزایش دمای متان درون کویل‌ها گردیده است. مدل‌سازی تابش نقش مهمی در میزان انتقال حرارت درون کوره و محاسبات عددی آن دارد. نتایج مربوط به توزیع شار گرمایی در صفحات مرکزی کوره در شکل ۱۷ آورده شده است. با توجه به این شکل، بیشترین مقدار شار گرمایی تابشی در محفظه احتراق کوره متناظر با حداکثر دمای کوره می‌باشد. در واقع توزیع دمای داخل کوره، تاثیر بسزایی بر روی میزان انتقال حرارت تابشی دارد. مدل سازی تابش منجر به توزیع دمای یکنواخت بیشتر و کاهش حداکثر دمای شعله نسبت به حالت بدون مدل سازی تابش می‌گردد.



شکل ۱۴- توزیع دمای متان درون لوله‌ها



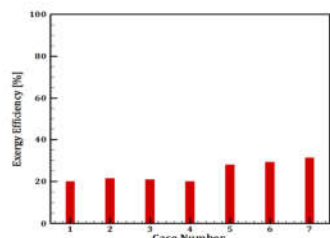
شکل ۱۵- توزیع دمای دیواره لوله‌ها

جدول ۴- تلفات حرارتی خروجی در حالت‌های مختلف عملکرد کوره

حالت	هوای اضافی (%)	دمای هوا (کلوین)	تلفات (کیلووات)
۱	۲۰	۳۰۸/۱۵	۲۲۱/۰۸
۲	۱۵	۳۰۸/۱۵	۱۷۷/۸۴
۳	۱۰	۳۰۸/۱۵	۱۶۸/۳۳
۴	۵	۳۰۸/۱۵	۱۶۰/۴۲
۵	۲۰	۳۵۸/۱۵	۲۱۰/۸۵
۶	۲۰	۴۰۸/۱۵	۱۹۶/۱۴
۷	۲۰	۴۵۸/۱۵	۱۷۸/۴۹

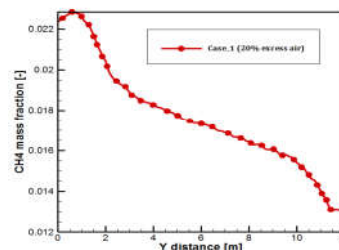
جدول ۵- راندمان حرارتی، اگزوزی در حالت مختلف عملکرد کوره

حالت	راندمان حرارتی (%)	راندمان اگزوزی (%)	راندمان کلی (%)
۱	۷۱/۱۱	۲۰	۶۶/۱۹
۲	۷۶/۵۹	۲۱/۵۲	۶۹/۳۳
۳	۷۷/۶۴	۲۰/۸۶	۶۸/۰۲
۴	۷۸/۹۱	۲۰/۰۴	۶۶/۳۶
۵	۷۰/۸۳	۲۷/۸۶	۸۲/۱۴
۶	۷۰/۶۷	۲۹/۲۸	۸۴/۹۱
۷	۷۰/۲۳	۳۱/۳۴	۸۸/۷۸



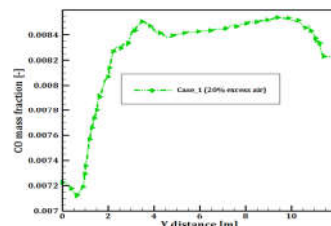
شکل ۲۲- راندمان اگزوزی کوره در حالت‌های مختلف

کاهش درصد هوای اضافی ورودی به کوره منجر به کاهش تلفات حرارتی آن شده است. در این حالت، کاهش درصد هوای ورودی از ۲۰ به ۵، منجر به کاهش ۲۸ درصدی تلفات حرارتی خروجی از کوره به ازای مصرف سوخت مشخص ثابت گردیده است. هوای اضافی به دلیل این که دارای اختلاف دمای بالایی با گازهای حاصل از احتراق دارد، مقدار زیادی از گرما را با خود از کوره خارج کرده و در نتیجه باعث سرد شدن کوره و افزایش تلفات حرارتی خروجی از دودکش می‌گردد. کاهش هوای اضافی باعث کاهش طول شعله، اختلاف فشار و همچنین افزایش دمای آن می‌شود. بنابراین کاهش درصد هوای اضافی ورودی به کوره منجر به کاهش تلفات حرارتی و همچنین کاهش میزان گرمای تولیدی در کوره می‌شود. لذا مقدار بهینه هوای اضافی برای هر کوره بایستی مشخص گردد. طبق نتایج حاصل، با کاهش درصد هوای اضافی ورودی به کوره، تلفات حرارتی خروجی کاهش یافته و در نتیجه، راندمان حرارتی آن افزایش می‌یابد. با توجه به معادلات ارائه شده در قسمت، محفظه احتراق کوره بیشترین سهم اگزوزی در کوره‌ها را دارد. با کاهش درصد هوای اضافی، راندمان اگزوزی محفظه احتراق افزایش و تخریب اگزوزی در آن کاهش می‌یابد. در این حالت، تخریب اگزوزی در کوره نیز کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش درصد هوای اضافی به محفظه احتراق، اگزوزی محفظه احتراق کوره افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از محاسبات مربوط به راندمان انرژی و اگزوزی کوره و مبدل

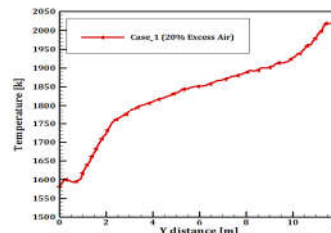


شکل ۱۹- نمودار تغییرات کسر جرمی متان روی محور کوره

نتایج مربوط به عملکرد کوره در شرایط مختلف عملکردی در جدول ۴ و ۵ آورده شده است. با پیش گرمایش هوای ورودی کوره، مقدار انرژی کمتری برای افزایش دمای هوا تا دمای گازهای حاصل از احتراق در کوره لازم بوده و لذا تلفات حرارتی کاهش می‌یابند. لازم به ذکر است که حداکثر دمای شعله نیز در این حالت افزایش می‌یابد. همچنین با پیش گرمایش هوای ورودی، تکانه جت افزایش یافته و در نتیجه آن بهبود یکنواختی توزیع دما و کاهش گرادیان دما منجر به کاهش تلفات حرارتی و افزایش راندمان حرارتی کوره می‌شود. با افزایش دمای اولیه جت اکسیدکننده (هوا)، چگالی آن کاهش و در نتیجه جت اکسیدکننده افزایش می‌یابد که به بزرگ شدن ناحیه واکنش احتراق می‌انجامد [۴].



شکل ۲۰- تغییرات کسر جرمی مونوکسید کربن روی محور کوره



شکل ۲۱- نمودار تغییرات دما روی محور مرکزی کوره

با افزایش دمای هوای ورودی به محفظه احتراق، اگزوزی محفظه احتراق کوره افزایش می‌یابد. در این حالت با بهبود توزیع دمای درون کوره و کاهش تلفات حرارتی درون کوره، دمای سیال در خروجی کویل‌ها افزایش یافته و در نتیجه، راندمان اگزوزی کوره از ۲۰ درصد به ۳۱/۳۴ درصد و راندمان کلی کوره از ۶۶/۱۹ درصد به ۸۸/۷۸ درصد افزایش یافته و تخریب اگزوزی و افزایش آنروپی سیستم در کوره و مبادله کن گرمایی کاهش می‌یابند. نتایج راندمان اگزوزی کوره در هر حالت به ترتیب در شکل ۲۲ آورده شده است.

حرارتی نشان دهنده آن است که در کوره مورد نظر، بیشترین مقدار این راندمان‌ها در درصد هوای اضافی ۱۵ به دست آمده اند.

۱۱- نتیجه گیری

در این مقاله، به شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل همزمان آگزروی کوره واحد ۱۰۴ پالایشگاه گاز پارسین به منظور کاهش تلفات حرارتی و بهینه‌سازی مصرف سوخت پرداخته شده است. بدین منظور در حل عددی از مدل Realizable k-epsilon در آشفتگی، مدل انتقال گونه‌ها با در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی به صورت دو مرحله‌ای در احتراق و مدل جهت گسسته در تابش استفاده گردید. نتایج عددی با داده‌های تجربی موجود برای کوره مورد نظر مقایسه و تطابق خیلی خوبی بین این دو مشاهده گردید. مدل‌سازی تابش منجر به افزایش دقت محاسبات عددی و کاهش درصد خطای نسبی می‌گردد. مهمترین عوامل تاثیرگذار بر روی کوره‌ها عبارتند از: دمای هوا، میزان درصد هوای اضافی و دمای سیال ورودی به کویل‌ها. بدین منظور، به بررسی تاثیر کاهش درصد هوای اضافی و پیش گرمایش هوای ورودی به کوره بر روی تلفات حرارتی آن پرداخته شده است. راندمان حرارتی کوره به تلفات ناشی از بدنه کوره و همچنین تلفات خروجی از دودکش آن وابسته می‌باشد. نتایج عددی حاصل نشان دادند که کاهش درصد هوای اضافی و همچنین پیش گرمایش آن منجر به کاهش تلفات حرارتی خروجی از کوره و در نتیجه افزایش راندمان حرارتی آن می‌گردد. با توجه به نتایج مربوط به محاسبات مربوط به قسمت‌های مختلف کوره نشان داد که در شرایط عملکرد معمولی آن، راندمان حرارتی برابر با ۷۱/۱۱ درصد، راندمان آگزروی آن ۲۰ درصد و راندمان کلی آن برابر با ۶۶/۱۹ درصد به دست آمد. طبق نتایج حاصل، کاهش درصد هوای اضافی، منجر به افزایش راندمان حرارتی کوره می‌گردد. با کاهش درصد هوای اضافی، آگزروی محفظه احتراق کوره افزایش می‌یابد. در این حالت در درصد هوای اضافی ۱۵ برای مصرف سوخت ثابت مشعل‌ها، شاهد بیشترین مقدار راندمان کلی و آگزروی برای کوره مورد نظر نسبت به سایر درصدهای هوای اضافی هستیم. همچنین پیش گرمایش هوای ورودی به کوره، منجر به افزایش راندمان آگزروی و راندمان کلی کوره می‌گردد. کاهش درصد هوای اضافی نقش بیشتری بر روی کاهش تلفات حرارتی نسبت به پیش گرمایش هوای ورودی به کوره دارد و در حالت پیش گرمایش هوای ورودی، نیازمند افزایش دما به میزان بیشتری می‌باشیم. در این حالت بایستی محدودیت‌های عملیاتی از لحاظ پیش گرمایش هوای ورودی به منظور جلوگیری از ایجاد خوردگی در متعلقات کوره و همچنین محدودیت‌های اقتصادی و آلاینده‌گی خروجی آن (دوده، اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن) را در نظر گرفت.

۱۲- سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت شرکت ملی گاز ایران-پالایشگاه گاز پارسین انجام گردیده است. لذا از زحمات کلیه کسانی که در انجام این تحقیق یاری رسانده اند، تقدیر و تشکر می‌شود.

۱۳- نمادها

Bo	عدد بولتزمن (-)
h	آنتالپی (kJ kg^{-1})
S	آنتروپی ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
ϵ	آگزروی (kJ kg^{-1})

۱۴- مراجع

- [۱] مقدسی م. ه.، ریاضی ر.، تابع جماعت س. و مردانی ا.، تاثیر دمای پیش گرم و میزان رقیق سازی بر میدان احتراقی و ترکیبات محصولات در احتراق ترکیبی Oxy-Mild در یک محفظه آزمایشگاهی. مجله سوخت و احتراق، د. ۱۲، ش. ۳، ص ۵۳-۷۱، ۱۳۹۸.
- [۲] ابراهیمی فردویی ا.، مظاهری ک. و احسانی درخشان ف.، مطالعه عددی تاثیر سینتیک شیمیایی و مدل تشعشعی بر میدان دما و سرعت در احتراق گاز طبیعی- اکسیژن با استفاده از مدل احتراقی فلیمنت پایا. مجله سوخت و احتراق، د. ۱۱، ش. ۱، ص ۲۹-۴۸، ۱۳۹۸.
- [3] Khalil A. and Gupta A.K., Flame fluctuations in Oxy-CO₂-methane mixtures in swirl assisted distributed combustion. *Applied Energy*, Vol. 12, No. 20, pp. 303-317, 2017.
- [4] Mardani A. and Fazlollahi G. A., Numerical study of oxy-fuel MILD (moderate or intense low-oxygen dilution combustion) combustion for CH₄/H₂. *Fuel and Energy*, Vol. 99, pp. 136-151, 2016.
- [5] Jalilimehr M., Behzadan H., Javadi Mal Abad S. M., Moghiman M., and Niazmand H., Investigating the effects of natural gas preheating on soot formation, flame luminosity, and NOx emissions: a combined experimental and numerical approach. *Heat Transfer Asian Research*, Vol. 46, No. 7, pp. 895-912, 2017.
- [6] Javadi S. M. and Moghiman M., Experimental study of natural gas temperature effects on the flame luminosity and no emission in a 120 Kw boiler. *International journal of spray and combustion dynamics*, Vol. 4, No. 2, pp. 175-184, 2012.
- [7] Yuan B., Zhang Y., Du W., Wang M. and Qian, F., Assesment of energy saving potential of an industrial ethylene cracking furnace using advanced exergy analysis. *Applied Energy*, Vol. 254, pp. 973-985, 2019.
- [۸] مسگریان ر.، اصول نم زدایی از نفت و گاز طبیعی. انتشارات شرکت ملی گاز ایران، تهران، ۱۳۸۹.
- [9] Booklet, *Heat Transfer Model Theory*. Fluent 6.1 documentation User's Guide, 2003.
- [10] Glassman I., Yetter R. A., *combustion*, 4th edition, Elsevire, 2008.
- [11] Born J., *H-104 fired heater data sheet*, parsian gas refinery, Shiraz, 2005.
- [12] Glassman I., *Combustion*, 2nd edition, San Diego Academic Press, 1987.
- [13] Booklet, *DO Radiation Model Theory*. Fluent 6.3 User's Guide, 2003.
- [14] Norio S., *Chemical Energy and Exergy*, Elsevier, Chapter 8-11, Sapporo, Japan, 2001.
- [15] Cengel Y.A., Boles M. and Michael A. *Thermodynamics an Engineering Approach*, 6th Ed, McGraw-Hill, 2008.