

شبیه‌سازی عددی احتراق در کوره صنعتی و ارائه راهکار جهت کاهش دمای گازهای ورودی به دودکش

اسرین قنبریان^{۱*}، ایوب عادل‌ی کوده‌ی^۲، علی اکبر پورفاته‌ی^۳، وحید جلالوندی^۴

۱- دکتری، مهندسی هوافضا، شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت، تهران، ghanbarian@sholehsanat.com

۲- کارشناسی، مهندسی برق، شرکت تولیدی و مهندسی شعله صنعت، تهران، info@sholehsanat.com

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، شرکت پالایش نفت کرمانشاه، کرمانشاه، aliakbarpourfateh@gmail.com

۴- کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، شرکت پالایش نفت کرمانشاه، کرمانشاه، vahidjalalvandi@gmail.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳)

چکیده: در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی احتراق در یکی از کوره‌های صنعتی واحد تبدیل کاتالیستی شرکت پالایش نفت کرمانشاه به منظور بررسی علت آسیب به دمپر آن و ارائه راهکار جهت رفع این مشکل انجام شده است. در ابتدا، بررسی وضعیت موجود انجام شده است. بدین منظور مدل عددی کوره و مشعل، تهیه شده و شبیه‌سازی‌های عددی برای بررسی وضعیت حاضر صورت گرفته است. همخوانی بین داده‌های واقعی کوره با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی، در حد قابل قبول است. بدین ترتیب با اعتماد به روش به کار گرفته شده در شبیه‌سازی حاضر، در گام بعد با تغییر مشعل و تغییر شکل شعله، شبیه‌سازی‌های عددی در جهت رفع ایراد انجام شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با تغییر مشعل و استفاده از ۴ مشعل کوچکتر به جای یک مشعل و با حفظ ظرفیت، شکل شعله شاخه‌ای شده و با افزایش انتقال حرارت ناشی از این وضعیت، دما در محل نصب دمپر با وجود هوای اضافه کمتر، حدود ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد کمتر می‌شود. این کاهش دما می‌تواند مشکل آسیب دیدن دمپر به واسطه ضعیف شدن سازه اتصال آن به دودکش را رفع کند.

کلیدواژگان: کوره حرارتی، احتراق، حل عددی، انتقال حرارت، مشعل، دودکش

مقدمه

شبیه‌سازی عددی فرآیند احتراق به علت وجود واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف و عدم وجود مدل اغتشاش بهینه در حل عددی و همچنین وجود تشعشع گازی، از پیچیده‌ترین مسائل حوزه دینامیک سیالات عددی است [۱-۳]. تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از شبیه‌سازی عددی برای تحلیل عملکرد مشعل‌ها و کوره‌های صنعتی انجام شده است. در تحقیقی که توسط دانون و همکارانش [۴] انجام شده است، از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده و تأثیر چیدمان‌های مختلف مشعل‌ها در کوره حرارتی‌ای که با گاز طبیعی کار می‌کند، بررسی شده است. آن‌ها برای شبیه‌سازی احتراق، از مدل مفهوم اتلاف گردابی^۱ و برای ترم‌های اغتشاشی از مدل ریلایزبل کی-اِپسایلون^۲ استفاده کرده‌اند. در نهایت بهترین وضعیت چیدمان مشعل‌ها جهت رسیدن به بالاترین راندمان را مشخص کرده‌اند.

بنیم و همکارانش [۵] تأثیر مدل اغتشاشی در شبیه‌سازی عددی احتراق را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از مدل اغتشاش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۳ می‌تواند منجر به جواب‌های دقیق شود به شرطی که شبکه حل عددی به اندازه کافی ریز انتخاب شود. در حالی که دقت نتایج این مدل بسیار وابسته به اندازه سلول‌های شبکه است، نتایج این مرجع

^۱ Eddy Dissipation Concept (EDC)

^۲ Realizable k-epsilon

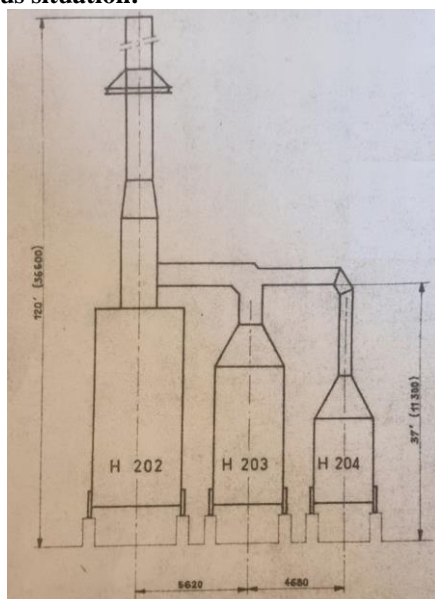
^۳ Large Eddy Simulation (LES)

بیانگر این است که مدل‌های میانگین رینولدز ناویر-استوکس^۱ مانند کی-اومگا^۲ و ریلایزبل کی-اوسیلون^۳ می‌تواند حتی با شبکه‌های نسبتاً درشت، جواب‌های قابل قبولی ارائه دهد. در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۴، وانگد و همکارانش [۶] نشان دادند که استفاده از مدل‌های پرهزینه‌ای مثل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ همواره با مشکلات فراوانی همراه است و مدل‌های کم هزینه میانگین رینولدز می‌توانند با دقت خوبی مسائل احتراق صنعتی را شبیه‌سازی کنند. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی احتراق کوره ۲۰۴ واحد تبدیل کاتالیستی شرکت پالایش نفت کرمانشاه انجام شده است. این کار به منظور بررسی علت آسیب به دمپر موجود در دودکش این کوره (به واسطه بالا رفتن بیش از حد دمای آن) است. بدین منظور هم شبیه‌سازی عددی وضعیت موجود (جهت اعتبارسنجی روش حل) صورت گرفته است و هم راهکار جهت رفع مشکل ارائه شده است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

شرح مسئله

جدا کردن دودکش کوره ۲۰۴ واحد تبدیل کاتالیستی شرکت پالایش نفت کرمانشاه از دودکش مشترک قبلی با کوره‌های مجاور، باعث تغییر در شرایط عملیاتی و حرارتی و در نتیجه تغییر دمای محفظه احتراق و بازدهی کوره شده است. این تغییرات باعث بالا رفتن دمای دمپر موجود در مسیر گازهای حاصل از احتراق و در نتیجه آسیب دیدن آن می‌شود که با ارتقاء مواد اولیه ساخت دمپر نیز نتیجه مطلوب حاصل نشده است. لذا تحلیل و شبیه‌سازی عددی احتراق کوره و ارائه راهکار عملی جهت رفع این مشکل، مورد نظر تحقیق حاضر است. وضعیت دودکش قبل و بعد از جداسازی، در شکل ۱ نشان داده شده است.

Previous situation:



Current situation:

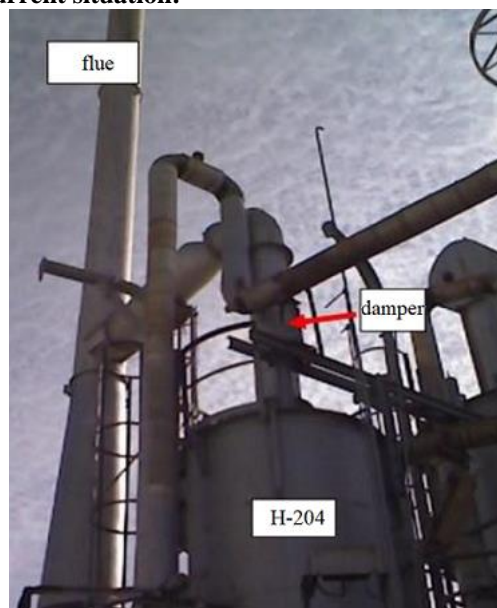


Figure 1- Damper location in previous and current situation

شکل ۱- محل دمپر در وضعیت قبلی و حاضر

¹ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

² K-w

³ Realizable k-e

کوره ۲۰۴ استوانه‌ای شکل به قطر داخلی ۱/۷ متر و ارتفاع ۴ متر است. داخل کوره، ۲۴ لوله با طول ۳ متر و قطر خارجی ۰/۱ متر قرار گرفته و محصولاتی که قرار است در طی فرآیند کوره گرمادهی شوند، در این لوله‌ها جریان دارند. نمای واقعی مشعل اصلی کوره در شکل ۲ آورده شده است.



Figure 2- The real view of the main burner of furnace 204

شکل ۲- نمای واقعی مشعل اصلی کوره ۲۰۴

شبیه‌سازی عددی وضعیت موجود

هندسه ساده شده مشعل و کوره برای تحلیل‌های عددی در شکل ۳ نمایش داده شده است. شبکه حل عددی به صورت هرمی چهاروجهی به تعداد حدود یک میلیون سلول بی‌سازمان برای شبیه‌سازی تولید شد. سلول‌های شبکه روی میدان حل عددی و همچنین بر روی خود مشعل در شکل ۴ آورده شده است.

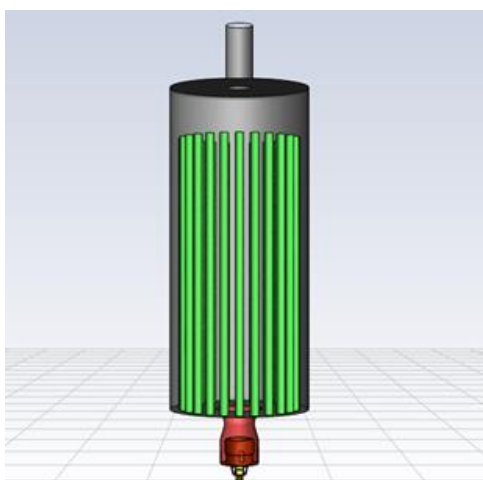


Figure 3- burner and furnace 3D model

شکل ۳- مدل سه بعدی تولید شده برای مشعل و کوره

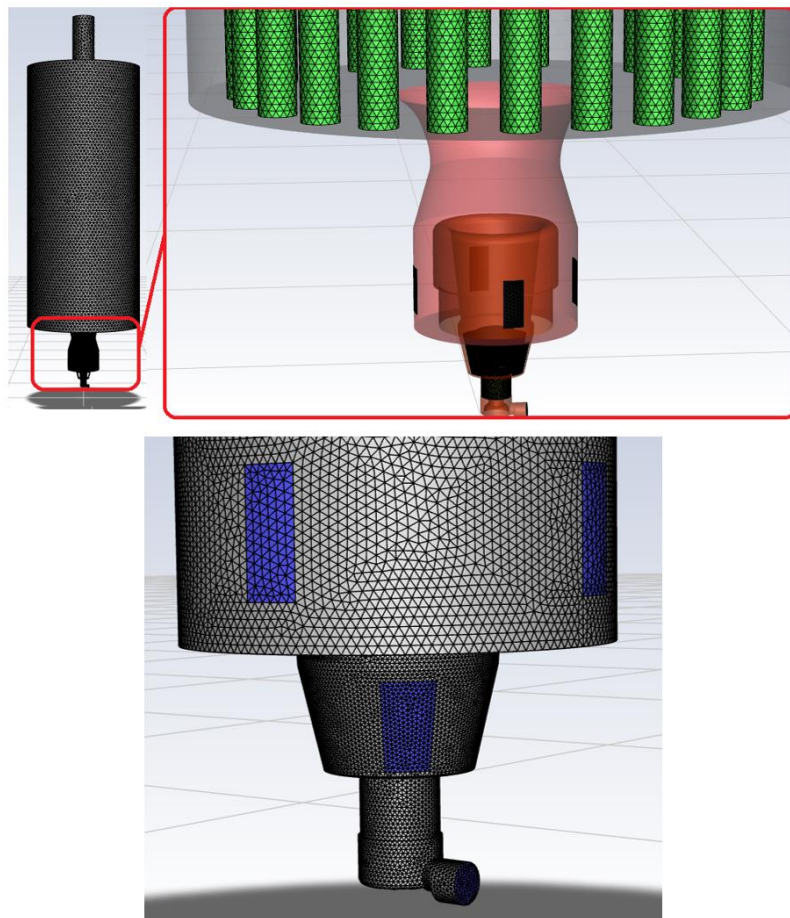


Figure 4- The grid used for numerical solution
شکل ۴- شبکه به کار رفته برای حل عددی

شبیه‌سازی‌های عددی، توسط نرم‌افزار فلوئنت [۷] انجام شده است. برای مدل‌سازی احتراق، از روش غیرپیش‌آمیخته^۱ [۸] که مخصوص شبیه‌سازی عددی احتراق‌هایی شبیه آنچه در مشعل اتفاق می‌افتد، استفاده شده است. احتراق با فرض غیرآدیاباتیکی شبیه‌سازی شده است و از روش دستورات گسسته^۲ [۹] برای مدل‌سازی تشعشع در حل عددی بهره گرفته شده است. این روش هزینه محاسباتی بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد ولی نتایج آن برای شبیه‌سازی‌های عددی احتراق از دقت بالاتری برخوردار است. برای ارتباط معادله سرعت و فشار در حل عددی، از روش کوپل استفاده شده است و گسسته‌سازی معادلات نیز همگی با دقت مرتبه دوم انجام شده است.

مقادیر فشار و دما در مرز ورودی گاز برابر ۱/۵ بار و ۲۵ درجه سانتی‌گراد و مقدار فشار در مرز خروجی دودکش به صورت مکشی و برابر ۳۰- پاسکال فرض شده است. لوله‌های داخل کوره از نوع دما ثابت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌اند. دمای دیواره بیرونی کوره ۵۰ درجه فرض شده و ضخامت عایق دیواره کوره ۰/۱۳ متر با خواص حرارتی زیر در نظر گرفته شده است:

$$\rho=2400 \text{ kg/m}^3, C_p=1000 \text{ J/kg K}, k = 2.25 \text{ W/m K},$$

$$\text{Inner Wall Absorption Coefficient} = 0.6 \text{ m}^{-1}$$

¹ Non-Premixed

² Discrete Ordinates (DO)

ترکیب گاز ورودی به مشعل، به صورت ۴۰٪ متان، ۱۵٪ اتان، ۱۵٪ پروپان و ۳۰٪ هیدروژن است. ارزش حرارتی این ترکیب برابر مجموع حاصلضربهای ارزش حرارتی هر گاز در جزء مولی آن گاز است [۱۰] که برابر ۱۰۸۰۰ کیلوکالری بر مترمکعب است. لازم به توضیح است که برای تمامی مقادیر ذکر شده در شرایط مرزی، مشخصات عایق و ترکیب گاز ورودی، از داده‌های ارائه شده توسط کارفرما (اندازه‌گیری شده توسط واحد تبدیل کاتالیستی شرکت پالایش نفت کرمانشاه) استفاده شده است. شبیه‌سازی عددی با فرضیات بالا انجام گرفت که نتایج آن در ادامه توضیح داده شده است.

شکل شعله مرئی جزء خروجی‌های مستقیم شبیه‌سازی عددی نیست. در شبیه‌سازی عددی، معادلات حاکم، معادلات ناویر استوکس است که به همراه معادلات مربوط به احتراق، تشعشع و اغتشاش حل می‌شود و با حل این معادلات، می‌توان توزیع فشار، سرعت، دما و توزیع گونه‌های مولی گازهای حاصل از احتراق را محاسبه نمود. شکل شعله به صورت غیرمستقیم و از روی خروجی‌های شبیه‌سازی عددی به دست می‌آید. برای محاسبه سطح خارجی شعله مرئی، در مراجع مختلف معیارهای مختلفی بیان شده است که عمدتاً از روی توزیع گونه مولی CO، توزیع گونه مولی OH و توزیع دما است. یکی از پرتکرارترین معیارهای به کار رفته برای محاسبه شکل شعله، معیار CO است. مطابق مرجع [11] مقادیر Iso-surface با سطح 2000 ppm برای کسر مولی CO می‌تواند معیار خوبی برای قطر و طول شعله باشد که در این تحقیق از این معیار استفاده شده است.

در شکل ۵، کانتور دما و شعله مرئی حاصل از این احتراق نشان داده شده است. با شرایط ذکر شده، شعله‌ای به طول ۲/۱ متر و قطر ۰/۴۵ متر تشکیل می‌شود و دمای شعله به حدود ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. مقدار متوسط شار حرارتی وارد بر تیوب‌ها حاصل از حل عددی در این شرایط، ۱۰۰۰۰ وات بر متر مربع است.

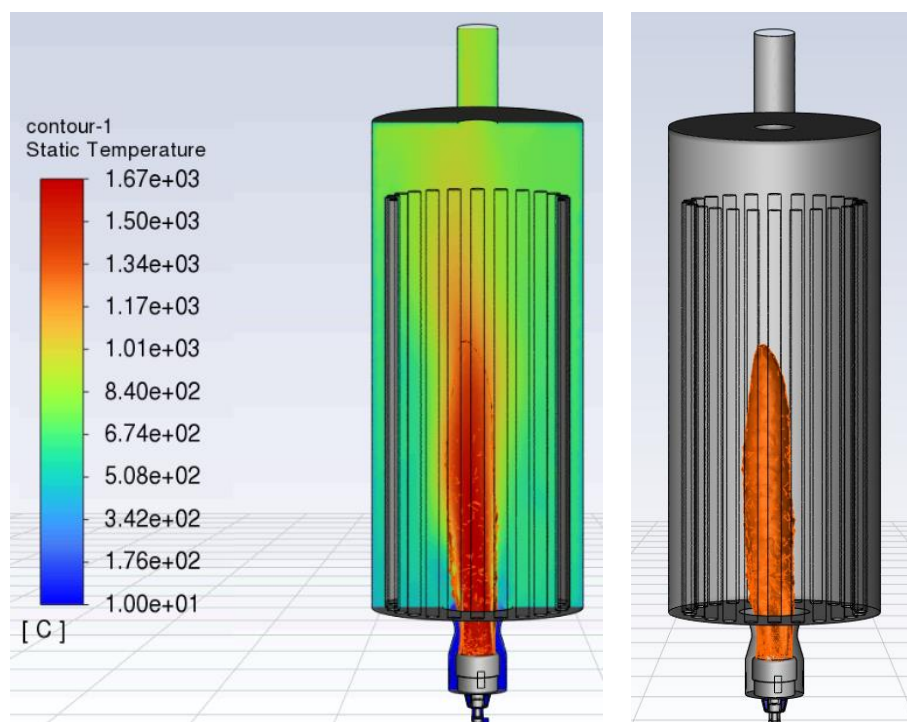


Figure 5- Visible flame and temperature contour

شکل ۵- شعله مرئی و کانتور دما

در جدول ۱، نتیجه آنالیز محصولات احتراق در دودکش که در حالت واقعی اندازه‌گیری شده است و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. اندازه‌گیری محصولات احتراق توسط دستگاه آنالایزر مدل Testo 340 انجام شده است.

جدول ۱- مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تست تجربی

Table 1- Comparison of numerical simulation results with experimental test results

Variable	Test Results	CFD
O ₂	5.62%	5.56 %
CO	10 ppm	18 ppm
NO _x	88 ppm	65 ppm
CO ₂	8.6 %	8.6 %
SO ₂	622 ppm	669 ppm
Flue Gas Temperature	840 °C	866 °C

با توجه به نزدیکی قابل قبول نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های اندازه‌گیری شده در کوره، می‌توان در گام بعد از این ابزار استفاده نمود و با شبیه‌سازی عددی راهکار پیشنهادی، به بررسی و رفع مشکل موجود اقدام نمود.

جایگزینی مشعل اصلی با چهار مشعل کوچک‌تر

با مشاهده نتایج بالا، جمع‌بندی تیم تحقیق و توسعه شرکت شعله صنعت به این نتیجه ختم شد که باید از شعله‌ای با شکل شاخه‌شاخه شده برای افزایش سطح انتقال حرارت و تشعشعی‌تر شدن شعله و در نتیجه کاهش دما در دودکش استفاده کرد. بدین ترتیب به عنوان گام نهایی، از چهار مشعل اتمسفریک برای حل مشکل استفاده شد. ظرفیت هر یک از این مشعل‌ها برابر ۱۹۰ مگا کالری بر ساعت است. نحوه چیدمان در نظر گرفته شده برای چهار مشعل به همراه شبکه حل عددی تولید شده بر روی آن و کوره در حالت جدید، در شکل ۶ آورده شده است.

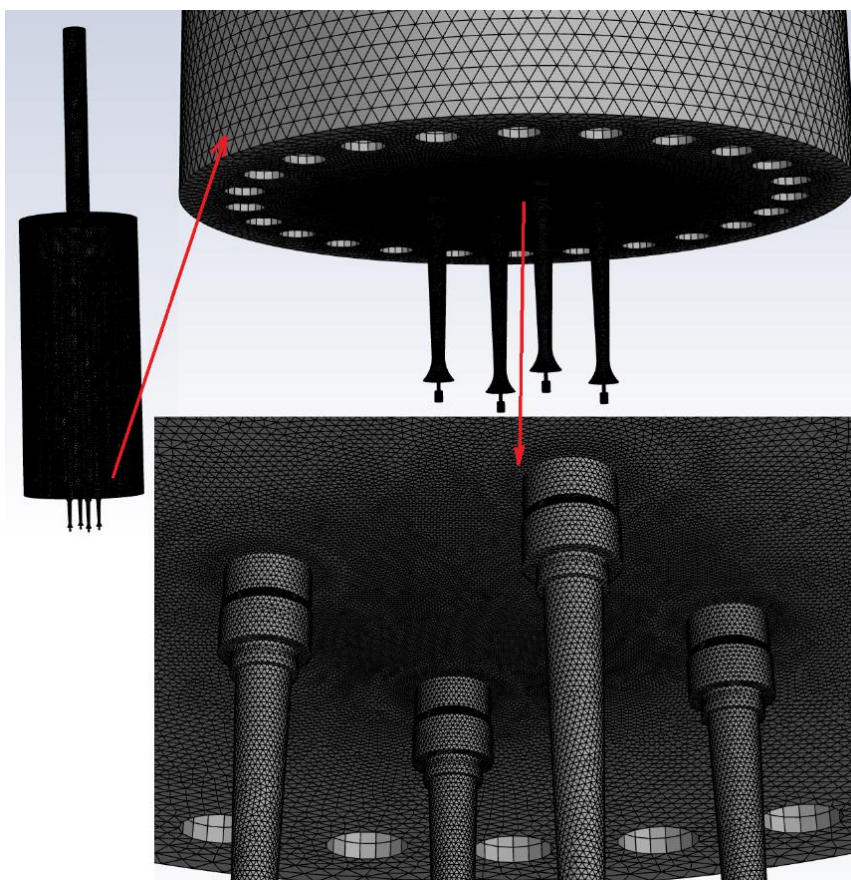


Figure 6- Arrangement of new burners on the furnace and numerical solution mesh

شکل ۶- چیدمان مشعل‌های جدید روی کوره و شبکه حل عددی

لازم به ذکر است که فواصل بالا با توجه به این نکته انتخاب شده است که بتوان هر چهار مشعل را در حفره موجود در کف کوره جانمایی نمود. واضح است که اگر با تغییر در نقشه کف کوره، بتوان مشعل‌ها را با فواصل بیشتری از هم قرار داد و آن‌ها را به تیوب‌ها نزدیک‌تر نمود، انتقال حرارت به تیوب‌ها بیشتر شده و می‌توان با مصرف گاز پایین‌تری به عملکرد مورد نظر دست یافت. ورودی گاز مجموع چهار مشعل معادل ظرفیت ۷۱۵ مگاکالری بر ساعت و هوای اضافه ۱۵٪ در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی عددی احتراق با فرضیات بالا به انجام رسید که نتیجه کار در ادامه آورده شده است. ابعاد شعله مشعل‌ها در کوره، در شکل ۷ آورده شده است. شعله‌ها ارتفاعی در حدود ۰/۶ متر دارند. از شکل کاملاً مشخص است که تداخلی بین شعله‌ها وجود ندارد. برخوردی بین شعله‌ها و تیوب‌ها نیز به چشم نمی‌خورد. کانتور دما و خطوط جریان داخل کوره که از شبیه‌سازی عددی حاصل شده است به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دمای شعله به ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای گازهای حاصل از احتراق در قسمت بالایی کوره به حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است.

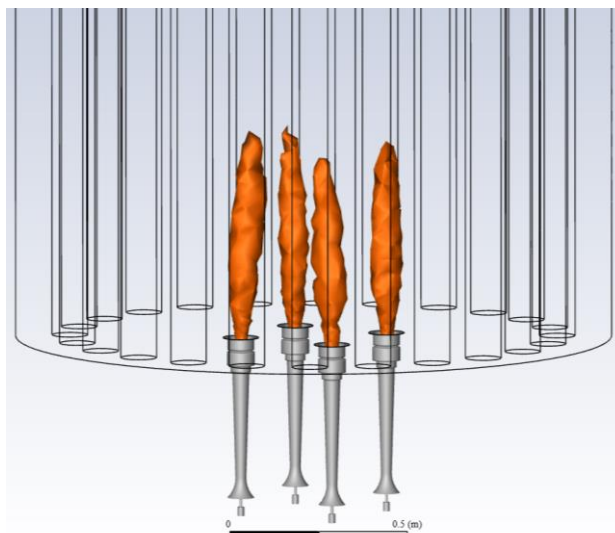


Figure 7- Visible flame in the new situation
شکل ۷- شعله مرئی در حالت جدید

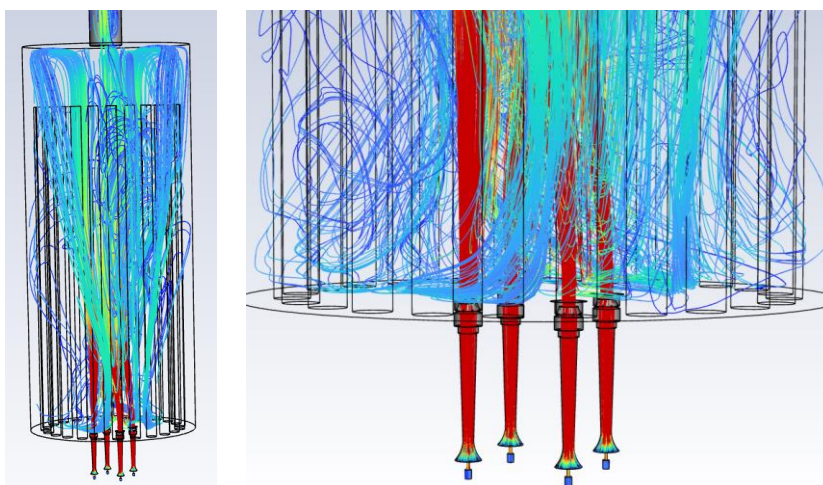


Figure 8- Flow streamlines inside the furnace
شکل ۸- خطوط جریان در داخل کوره

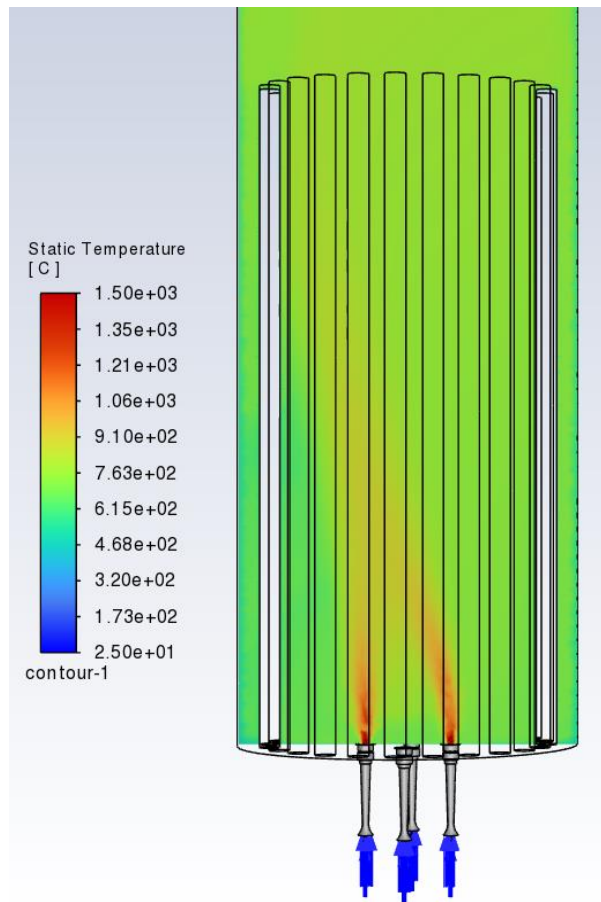


Figure 9- Temperature contour in the new situation
 شکل ۹- کانتور دما در حالت جدید

مقدار متوسط شار حرارتی کل وارد بر تیوب‌ها در حالت جدید، ۱۰۵۰۰ وات بر متر مربع است که حدود ۵٪ از وضعیت قبلی بیشتر است. ترکیب محصولات احتراق در دودکش در حالت جدید که از حل عددی حاصل شده است، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- آنالیز محصولات احتراق در شرایط جدید

Table 2- Analysis of combustion products in new conditions

Variable	CFD Results
O ₂	2.9%
CO	1 ppm
NO _x	10 ppm
CO ₂	10.2 %
SO ₂	170 ppm
Flue Gas Temperature	690 °C

بدین ترتیب با توجه به نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی‌های بالا می‌توان گفت برای این کوره و با توجه به ابعاد و مشخصات کوره و فرآیند آن، با استفاده از چهار مشعل کوچک به جای یک مشعل بزرگ و چند شاخه شدن شعله، هم میزان انتقال حرارت به تیوب‌ها افزایش یافته و راندمان عملکرد کوره بالاتر می‌رود و هم دمای گازهای خروجی از دودکش حدود ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد کمتر می‌شود.

بحث نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در تحقیق حاضر با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، میزان بهبود عملکرد کوره ۲۰۴ به منظور رفع مشکل بالا بودن دما در محل دمپر در شرایطی که از ۴ مشعل کوچکتر به جای یک مشعل بزرگ استفاده شود، بررسی شد. استفاده از چند مشعل باعث چند شاخه شدن شعله می‌شود. نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی بیانگر این است که این کار هم میزان انتقال حرارت به تیوب‌ها را افزایش می‌دهد و هم دمای گازهای خروجی از دودکش حدود ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. همین‌طور، با توجه به چهارشاخه شدن شکل شعله و افزایش سطح انتقال حرارت از شعله به کوره، میزان انتقال حرارت بیشتر از حالتی شد که در حالت اولیه وجود داشت. به همین دلیل، مقدار گاز ورودی به مشعل‌ها کاهش داده شد و با مصرف سوخت کمتر، انتقال حرارتی مشابه با حالت اولیه حاصل شد و بدین ترتیب مصرف سوخت کاهش پیدا کرد. خلاصه مزایای طرح پیشنهادی به قرار زیر است:

- کاهش ۱۷۰ درجه‌ای دمای گازهای خروجی از دودکش (در جهت حل مشکل دمای بالای دمپر)
- چند شاخه‌ای شدن و تشعشعی‌تر شدن شعله
- کاهش هوای اضافه کوره از حدود ۵۰٪ (وضعیت موجود) به ۱۵٪
- کاهش آلاینده ناکس از حدود ۸۰ ppm به حدود ۱۰ ppm
- کاهش ۱۵ درصدی مصرف سوخت کوره
- امکان جانمایی مشعل‌ها در محل مشعل اصلی در کف کوره بدون نیاز به تغییر در طراحی کوره

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از شرکت پالایش نفت کرمانشاه بویژه واحد پژوهش و توسعه که با قرار دادن امکانات، ما را در انجام این تحقیق یاری کرده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- [1] L. Zhang, C. Wu, J. Zhang, B. Zhang, and C. Sui, "Numerical Simulation of the Combustion Characteristics in a Flue Gas Internal Recirculation Burner", *ACS Omega*, vol. 7, no. 46, pp. 42264–42271, November 2022.
- [2] P.J. Coelho, and N. Peters, "Numerical simulation of a mild combustion burner", *Combustion and Flame*, vol. 124, pp. 503-518, February 2001.
- [3] D. Moell, D. Lorstad, and X.S. Bai, "Numerical Investigation of Methane/Hydrogen/Air Partially Premixed Flames in the SGT-800 Burner Fitted to a Combustion Rig", *Flow Turbulence Combust*, vol. 96, no. 4, pp. 987-1003, March 2016.
- [4] B. Danon, E.S. Cho, W.D. Jong, and D.J. Roekaerts, "Numerical investigation of burner positioning effects in a multi-burner flameless combustion furnace", *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 17, pp. 3885-3896, December 2011.
- [5] A.C. Benim, S. Iqbal, A. Nahavandi, W. Meier, A. Wiedermann, and F. Joos, *Analysis of Turbulent Swirling Flow in an Isothermal Gas Turbine Combustor Model*: In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions. Düsseldorf, Germany, ASME, pp. 16–20, Paper number V04AT04A001, 2014.
- [6] M.J. Wankhede, F.A. Tap, P. Schapotschnikow, and W.J.S. Ramaekers, *Numerical Study of Unsteady Flow-Field and Flame Dynamics in a Gas Turbine Model Combustor*: In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, ASME, Paper number V04AT04A050, 2014.
- [7] ANSYS Inc, 2021. *ANSYS FLUENT User's Guide*, Release 2021 R2.
- [8] S. Karyeyen, "Combustion characteristics of a non-premixed methane flame in a generated burner under distributed combustion conditions: A numerical study", *Fuel*, 230, pp. 163-171, October 2018.
- [9] S.T. Thynell, "Discrete-ordinates method in radiative heat transfer", *International Journal of Engineering Science*, vol. 36, no. 12, pp. 1651-1675, September 1998.
- [10] C. E. Baukal, Ed., *The John Zink Hamworthy Combustion Handbook*. New York: CRC Press, 2013.
- [11] *Burners for Fired Heaters in General Refinery Services*, API Standard- API Recommended Practice 535, American Petroleum Institute, Third Edition, May 2014.

English Abstract

Numerical simulation of combustion in an industrial furnace and providing a solution to reduce the flue gas temperature

Asrin Ghanbarian^{1*}, Ayoub Adeli Kodehi², Ali Akbar Pourfateh³, Vahid Jalalvandi⁴

1- Sholeh Sanat Manufacturing and Engineering Co., Tehran, Iran, ghanbarian@sholehsanat.com

2- Sholeh Sanat Manufacturing and Engineering Co., Tehran, Iran, info@sholehsanat.com

3-Kermanshah Oil Refining Co., Kermanshah, Iran, aliakbarpourfateh@gmail.com

3-Kermanshah Oil Refining Co., Kermanshah, Iran, vahidjalalvandi@gmail.com

*Corresponding author

(Received: 2024/04/08, Received in revised form: 2024/05/26, Accepted: 2024/06/02)

In this paper, the numerical simulation of combustion in one of the industrial furnaces of Kermanshah Oil Refining Company has been carried out in order to investigate the cause of high temperature damage to its damper and provide a solution to solve this problem. At first, the current situation has been investigated. For this purpose, the numerical model of furnace and burner has been produced and numerical simulations have been carried out to check the current situation. The agreement between the actual factory data and the numerical simulation data is acceptable. In the next step, by changing the burner and changing the shape of the flame, numerical simulations have been performed in order to solve the problem. The obtained results show that by changing the burner and using 4 smaller burners but with a longer flame, the shape of the flame becomes branched and with the increase of heat transfer caused by this situation, the temperature at the place where the damper is installed decreases by about 170 degrees Celsius. This decrease in temperature can solve the problem of damaging the damper and softening the structure connecting it to the flue.

Keywords: Heater, combustion, Numerical Solution, Heat Transfer, Burner, Stack