

Investigating the Increase in the Working Period of Therminol 66(Hot Oil) in Shahid Tondgouyan Petrochemical Company Using CFD Simulation Of Furnace And Distribution Manifold

N.N. Karimisedigh¹, S.H. Hashemabadi², A. Sharifi³, N. Jafari⁴, A. Sheikhnezhad Moghadam⁵, H. Hamid⁶, A.R. Rashedian⁷, F. Gholami⁸

¹Master of Chemical Engineering, Flow Measurement Research Center, Faculty of Chemical Engineering, Oil and Gas, University of Science and Technology

²Full Professor of Chemical Engineering, Flow Measurement Research Center, Faculty of Chemical Engineering, Oil and Gas, University of Science and Technology

³Master of Chemical Engineering, Shahid Tondgouyan Petrochemical Company (STPC)

⁴Master of Chemical Engineering, Shahid Tondgouyan Petrochemical Company (STPC)

⁵PhD of Chemical Engineering, Shahid Tondgouyan Petrochemical Company (STPC)

⁶Master of Chemical Engineering, Shahid Tondgouyan Petrochemical Company (STPC)

⁷Bachelor of Chemical Engineering, Shahid Tondgouyan Petrochemical Company (STPC)

⁸Master of Chemical Engineering, Flow Measurement Research Center, Faculty of Chemical Engineering, Oil and Gas, University of Science and Technology

Abstract

The present research is CFD simulation of industrial furnace related to Shahid Tondgouyan Petrochemical Company (STPC) to analyze the impact of operating conditions on thermal properties changes of oil and heat transfer phenomenon in the furnace and its distribution manifold with 8 passes. According to the experimental history of the furnace, the presence of more coke particles in some passes has led to their clogging, which according to the simulation results, the geometry of the oil inlet manifold in it has been effective. This manifold has created a different distribution of flow and coke particles in the 8 parallel passes of the furnace, which, in addition to the greater distribution of coke particles in some of them, has caused different oil residence times in the passes. The combustion simulation in the furnace also showed that hot spots have been created in the furnace areas, especially in the exit of combustion gases from the radiation zone to the convection zone, which could be another reason for the destruction of the oil. Also, according to the simulation results, with a decrease of 3/6 kg/s in the flow rate of an oil pass, the outlet temperature of that pass in the radiation section increased by 1/1 degrees Celsius.

Keywords

CFD Simulation, Thermal Oil, Furnace, Flow Distribution manifold, Therminol 66

بررسی افزایش دوره کاری روغن حرارتی ترمینول ۶۶ در پتروشیمی شهید تندگویان با استفاده از شبیه‌سازی CFD کوره و مینیولد توزیع

نازنین نرگس کریمی صدیق^۱، سیدحسین هاشم آبادی^{۲*}، عادل شریفی^۳، نعمت‌الله جعفری^۴، عبدالله شیخ‌نژاد مقدم^۵، حسین حمید^۶، علیرضا راشدیان^۷، فاطمه غلامی^۸

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت
^۲ استاد تمام مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت
^۳ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، شرکت پتروشیمی شهید تندگویان (STPC)، ماهشهر، ایران
^۴ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، شرکت پتروشیمی شهید تندگویان (STPC)، ماهشهر، ایران
^۵ دکترای مهندسی شیمی، شرکت پتروشیمی شهید تندگویان (STPC)، ماهشهر، ایران
^۶ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، شرکت پتروشیمی شهید تندگویان (STPC)، ماهشهر، ایران
^۷ کارشناسی مهندسی شیمی، شرکت پتروشیمی شهید تندگویان (STPC)، ماهشهر، ایران
^۸ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت
Hashenabadi @ust.ac.ir*

چکیده:

پژوهش حاضر، شبیه‌سازی CFD یک کوره صنعتی مربوط به شرکت پتروشیمی شهید تندگویان (STPC) است که به منظور تحلیل شرایط بهره‌برداری بر تغییرات خواص حرارتی روغن و پدیده‌های انتقال حرارت در کوره و داکت توزیع آن دارای ۸ گذرگاه انجام شده است. وجود بیشتر ذرات کک در برخی گذرگاه‌ها بنا بر سابقه‌ی تجربی کوره، گرفتگی آنها را در پی داشته که بنا بر نتایج شبیه‌سازی، هندسه‌ی داکت ورودی روغن در آن، موثر بوده است. این داکت، توزیع متفاوتی از جریان و ذرات کک را در ۸ گذرگاه موازی کوره ایجاد کرده که بجز توزیع بیشتر ذرات کک در برخی آنها، موجب زمان ماند متفاوت روغن در گذرگاه‌ها شده است. شبیه‌سازی احتراق در کوره نیز نشان داد که نقاط داغ در نواحی کوره به خصوص در خروج گازهای احتراق از ناحیه تشعشع به ناحیه همرفت ایجاد شده است که می‌تواند دلیل دیگری برای تخریب روغن باشد. همچنین مطابق نتایج شبیه‌سازی، با کاهش ۳/۶ کیلوگرم بر ثانیه در دبی یک گذرگاه روغن، دمای خروجی آن گذرگاه در بخش تشعشع، ۱/۱ درجه سانتیگراد افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها:

شبیه‌سازی CFD، روغن حرارتی، کوره، مینیولد توزیع جریان، ترمینول ۶۶

* تهران، دانشکده‌ی مهندسی شیمی، نفت و گاز، مرکز تحقیقاتی اندازه‌گیری جریان، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

۱. مقدمه

در یک فرایند شیمیایی در صنعت، گاه برای انتقال حرارت، از یک سیال واسطه استفاده می‌کنند. بدین صورت که سیالاتی مانند روغن‌های مصنوعی در یک کوره، در معرض حرارت قرار می‌گیرند و سپس در بخش دیگری از فرایند این حرارت را به سیال اصلی منتقل می‌کنند. در طول فرایند کارکرد این روغن‌ها، ممکن است عوامل مختلفی از جمله دمای بیش از حد در کوره، ورود ناخالصی، هوا و آب به روغن به تدریج موجب تخریب روغن شود که هزینه‌هایی را جهت خرید مجدد روغن، تحمیل خواهد کرد. با توجه به اینکه یکی از عوامل موثر در تخریب روغن، دمای بالایی است که در کوره اتفاق می‌افتد، بدست آوردن پروفایل حرارتی روغن در کوره دارای اهمیت است. یک راه بهینه برای بدست آوردن پروفایل حرارتی کوره نیز شبیه‌سازی CFD است که از محاسبات عددی برای حل معادلات ناویر استوکس تا رسیدن به میدان‌های دمایی و هیدرودینامیک جریان استفاده می‌کند. در پژوهش فعلی، برای بدست آوردن راهکارهایی برای افزایش کارکرد روغن حرارتی، کوره به همراه داکت توزیع روغن، در شبیه‌سازی CFD بررسی شده است.

انجام فرایند بر روی چندین گذرگاه با دبی جریان کم به جای یک گذرگاه با دبی جریان بالا از جمله بدلیل اینکه سطح بیشتری از سیال در تماس با فرایند (حرارت و...) است، عمدتاً بازده بیشتر و هزینه کمتری خواهد داشت. به همین دلیل در مواردی قبل از تجهیزاتی اصلی فرایند، یک داکت توزیع جریان^۱ قرار می‌گیرد تا سیال ورودی را بین چندین گذرگاه تقسیم کند. این داکت‌ها الزاماً جریان را در تمام خروجی‌ها به صورت کاملاً یکنواخت توزیع نخواهد کرد. پژوهش‌هایی که بر روی این موضوع انجام گرفته در جدول ۱ ذکر شده است. از جمله در مورد بهبود توزیع جریان داکت، موارد زیر ذکر شده است:

- تغییر مقطع داکت از یکنواخت به همگرا و مخروطی (مقطع کاهشی در طول داکت) [۶-۱]
- افزایش قطر ورودی (یا افزایش نسبت مقطع داکت اصلی به مجموع مقطع شاخه‌ها) [۱، ۵، ۷، ۸]
- کاهش ابعاد مقاطع خروجی (اثر قرارگیری اریفیس در خروجی‌ها مانند اثر کاهش مقاطع خروجی است).
- افزایش تعداد خروجی‌ها
- کاهش عدد رینولدز در ورودی منیفولد (تا مقداری معین)
- تغییر فاصله اولین خروجی از ورودی داکت
- تغییر زاویه مقطع ورودی (یا قرارگیری صفحات (بافل) زاویه دار در ابتدای داکت)

^۱ dividing-flow manifold, distribution manifold, distribution header

- گنجاندن بافل سوراخ‌دار با ابعاد متفاوت در تمام طول داکت [۱]
- کاهش قطر خروجی دارای دبی بیشتر عمدتاً کاهش قطر خروجی‌های انتها نسبت به ابتدا (یا قرارگیری اریفیس با ابعاد متفاوت در مقاطع خروجی) [۵]

جدول ۱، نتایج پژوهش بر روی داکت توزیع جریان را نمایش داده است. در عمده تحقیقات، نتایج نشان داد که توزیع جریان در شاخه‌ی نزدیک به ورودی تا آخر، به صورت صعودی است (ستون چهارم جدول ۱)، به گونه‌ای که همواره بیشترین دبی جریان به آخرین خروجی خواهد رسید. این روند ممکن است در رینولدز پایین متفاوت باشد. هم‌چنین ستون شش تا هشت جدول ۱، تاثیر تغییر عدد رینولدز را بر روی پراکندگی توزیع جریان توضیح می‌دهد. تقریباً نیمی از پژوهشگران نتیجه گرفتند که با افزایش رینولدز، پراکندگی افزایش می‌یابد. نیمی آن را بدون تاثیر و تعداد کمتری اثر کاهشی در پراکندگی مشاهده کردند. به عبارتی رابطه‌ی پراکندگی توزیع جریان در یک داکت توزیع با عدد رینولدز، به شرایط مطالعاتی دیگر (شکل هندسی و...) نیز بستگی دارد. برای چگونگی توزیع جریان در یک داکت، روابطی توسعه یافته‌اند که در تحقیقات تامر و کریستوف [۹]، آمارا [۱۰]، بجورا و همکاران [۱۱]، چادری و همکاران [۱۲]، وانگ [۱۳]، پرتوریا [۱۴]، آهن و همکاران (برای رینولدز ۲۵ تا ۴۵۰) [۱۵]، چن و همکاران (با احتساب دقیق تر تلفات اصطکاکی) [۱۶]، کابو و یودا [۱۷]، آکریووس و همکاران [۱۸]، داتا و ماچوندار [۳] ذکر شده است. داکجنگ کیم و همکاران [۱۹]، برای توزیع یکنواخت در یک داکت توزیع متصل به داکت تجمیع و ورودی در وسط داکت، یک کمیت بدون بعد هندسی یافتند که بایستی به $0/8$ برسد. ژیانگ و همکاران [۲۰] در شرایط رینولدز ۵۰ هزار تا ۲۰۰ هزار، با کاهش AR^1 از $0/48$ به $0/13$ توانستند توزیع یکنواخت را تا 76 درصد بهبود دهند. در پژوهش چن و همکاران [۸] در رینولدز ۴۰ هزار تا ۲۰۰ هزار و انتخاب مدل $k-\epsilon$ برای جریان آشفته در شبیه‌سازی، افزایش نسبت طول خروجی به قطر خروجی از ۵ تا ۴۵ تاثیر اندکی در یکنواختی داشت. در پژوهش وگل و همکاران [۲۱]، دبی جریان خروجی داکت ساده در شبیه‌سازی، طی زمان، نوسان منظم و در داکت اصلاح شده، نوسان نامنظم با دوره تکرار بزرگتر پیدا کرد. مینوچا و همکاران [۱] مشاهده کردند در نوعی داکت با جریان ورودی عمود بر داکت، در دو خروجی اول، به علت گردابه، جریان منفی (برگشتی)، در خروجی سوم، جریان صفر و خروجی‌های بعدی جریان مثبت است. در پژوهش پیگفورد و همکاران [۲۲] روند توزیع برخلاف دیگران، از ابتدا تا انتها به صورت نزولی است. گاندهی و همکاران [۱۸]، خلاصه‌ای از پژوهش برخی از محققان را ارائه داده‌اند که جمعا در این پژوهش‌ها، انواع سیال (هوا، آب، نیتروژن)، مقادیر مختلف قطر ورودی (۱۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر)، قطر خروجی (۴ تا ۲۶ میلی‌متر)، تعداد خروجی (۴ تا ۱۲۴)، انواع فاصله بین خروجی‌ها (۶۰ تا ۱۸۷۰ میلی‌متر)، رینولدز (۵۰ تا یک میلیون)، انواع AR ($0/5$ تا $2/5$ برای داتا و ماچوندار) ذکر شده است.

^۱ نسبت سطح مقطع داکت اصلی به مجموع سطح مقاطع شاخه‌ها: AR (Area Ratio)

جدول ۱. نتایج پژوهش‌ها بر روی داکت توزیع جریان (ابعاد طولی داخل جدول در واحد میلی‌متر است).
 Table 1. Results of researchs on flow distribution ducts (length dimensions in the table are in millimeters).

Row	Inlet position	Connection of distribution duct to	Distribution process from the first outlet (near the inlet) to the last	Reynolds number	Distribution dispersion with increasing Re. number			Some study conditions	References
					Increase dispersion	No effect	Decrease dispersion		
۱	first	*	Neither completely Ascending nor completely Descending	50 to 300	*			Separating the outputs with a baffle (plate) - AR=16	[1] [6]
۲	first	*	Ascending	35 to 1400	*			-	[1] [5]
۳	first	-	Ascending	2'000 to 20'000	*			Analytical study (without experiments and computer simulation) effect of the number of outlets (5 to 50) - the ratio of the length to the diameter of the main duct (3 to 100)	[1] [13] [18]
۴	first	-	Ascending	13'000 to 40'000		*		Experiment, simulation and analytical Study	[9]
۵	first	-	Ascending	7'000 to 70'000			*	The entrance is at the beginning of the duct but perpendicular to it	[1] [7]
۶	first	*	Ascending	30'000 to 100'000		*		Header diameter from 20 to 35 - Outlet diameter 10 - Distance between outlets 60 - Number of outlets 10 - Water fluid	[1] [17] [18]
۷	first	-	Ascending	40'000 to 200'000		*		-	[8]
۸	first	-	Ascending	100'000 to 200'000		*		Ascending distribution trend (fixed section duct mode) - uniform distribution (conical duct mode)	[4]
۹	first	-	Ascending	۱۳۸۰ to 1'000'000	*			The inlet is perpendicular to the duct and the outlets are angled	[1]
۱۰	Middle of the duct	*	Higher flow at the middle output.	44'000 to 100'000	*			Investigating the effect of changing duct dimensions and fluid type	[1] [18]
۱۱	Middle of the duct	-	Higher flow at the middle output.	۵۰۰ to 2500	*			Duct with plate fin heat exchanger – inlet diameter 40 – duct diameter 60 – 13 outlets – air fluid	[1] [23] [18]
				2500 to 3'000			*		

تحقیقات زیادی نیز بر روی شبیه‌سازی کوره توسط پژوهشگران، انجام شده است. ماتیوس و همکارانش [۲۴]، یک کوره دارای دو مشعل را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای کوره، دو بخش تشعشی (بخش با دمای بالاتر دارای

انتقال حرارت تشعشی^۱ و بخش همرفت (بخش با دمای پایین تر دارای انتقال حرارت از نوع همرفت^۲) در نظر گرفتند و از دیدگاه RANS برای مدل سازی سه بعدی با در نظر گرفتن سیال غیرقابل تراکم و بدلیل عدم وجود گرادیان فشار زیاد و تغییرات جهتی نسبتاً کم در خطوط جریان و متعاقباً چرخش کم در جریان، از مدل $k-\epsilon$ به عنوان مدل اغتشاش در شبیه سازی استفاده کرده اند. در پژوهش مذکور، به منظور شبیه سازی احتراق از احتراق آشفته نامختلط^۳ به عنوان تابع توزیع احتمال استفاده شده است که این مدل غالب بودن جریان آشفته بر نفوذ مولکولی را مفروض دارد. آنها برای اعمال انتقال حرارت تشعشی بر شبیه سازی، از مدل DO^4 استفاده کرده اند [۲۴]. مدل انتقال حرارت تشعشی، تاثیر قابل توجهی در دقت محاسبه دما دارد [۲۹]. مرگان و همکاران [۲۵]، نیز با بررسی ده مورد از تحقیقات پژوهشگران در مورد شبیه سازی کوره، بیان کردند که اغلب از مدل $P-1$ بدلیل سادگی و سرعت بالا و برخی نیز از مدل DO استفاده کرده اند. هم چنین اغلب برای شبیه سازی جریان آشفته از مدل $k-\epsilon$ و تعدادی برای افزایش دقت از مدل $k-\omega$ بهینه شده با مدل SST برای دیواره ها استفاده کرده اند. امینی و همکاران [۲۶] تاثیر وجود خم 180° درجه در یک گذرگاه کوپل کوره با نه خم با در نظر گرفتن شار حرارتی به جای کوره (با شش گذرگاه) را بررسی کردند. فیروزی و همکاران [۲۸]، کوره ای مشابه را با سه گذرگاه شبیه سازی کردند. در پژوهش فعلی، کوره دارای هشت گذرگاه و هر گذرگاه دارای هفت خم است و تاثیر هندسه ی داکت توزیع کوره در پراکندگی جریان، هندسه دیواره ی کوره، مشعل ها، چینش کوپل ها در کنار هم بر روی انتقال حرارت، میزان اتلاف حرارت دیواره و میزان تخریب روغن در کوره بررسی شده است.

۲. روش تحقیق

در این مسئله، جهت افزایش دوره کارکرد روغن، یک کوره حرارتی و داکت توزیع متصل به آن، در شبیه سازی CFD مورد بررسی قرار گرفت تا نکاتی از فرایند که موجب تسریع در تخریب روغن می شود، تشخیص و بهبود یابد. در این روش، از محاسبات عددی، برای حل معادلات بقا جرم و انرژی و معادلات ناویر - استوکس استفاده شده است. در ابتدا به جهت یافتن توزیع جریان در کوره، داکت توزیع جریان ورودی روغن شبیه سازی گردید. سپس بدلیل اینکه، یافتن حداکثر دمای روغن در کوره جهت مقایسه با شرایط تخریب آن مدنظر بود، بخش تشعشی کوره که با توجه به نظر پژوهشگران دیگر (ماتیوس و همکاران [۲۴])، احتمال رخ دادن دمای بالاتر در آن بیشتر بود، شبیه سازی شد. جریان ابتدا وارد بخش همرفت شده و سپس وارد بخش تشعشی می شود. بدلیل

^۱ Radiation

^۲ Convection

^۳ Non premixed turbulent combustion

^۴ Discrete Ordinate

تقارن در هندسه‌ی بخش تشعشی که یک استوانه است، یک چهارم آن دارای دو گذرگاه بررسی شده است. در جدول ۲، شماتیک ساده‌ای از کوره‌ی مورد بحث را ارائه شده است. در این کوره، هشت گذرگاه از جریان روغن، به صورت مستقل در معرض حرارت قرار دارند. در کوره‌ی صنعتی مورد بحث، ورود هوا به کوره به صورت مکش طبیعی از زیر کوره است. سوخت ورودی حاوی حدود ۹۹ درصد متان و مابقی عمدتاً هیدروکربن اتان است. روغن داخل لوله‌های کوره از نوع ترمینول ۶۶^۱ در نظر گرفته شد. رسم هندسه با نرم‌افزار Spaceclaim و شبکه بندی با Ansys Meshing نسخه R1-2020 انجام شده است. برای شرط مرزی ورودی مشعل و لوله‌ها، جرم ورودی با تعیین دمای جریان ورودی و شرط مرزی خروجی، فشار خروجی اتمسفر در نظر گرفته شد. دمای جریان روغن ورودی از بخش همرفت به بخش تشعشع، از موازنه حرارت بین گرمای منتقل شده از گازهای احتراق با گرمای دریافتی توسط لوله‌ها با استفاده از داده‌های عملیاتی کوره، محاسبه شد. روش‌های انتقال حرارت شامل هدایت، همرفت و تشعشی (تابشی) می‌باشد. برای شبیه‌سازی جریان بصورت هدایت و همرفت از همان معادلات حاکم (معادله انرژی) استفاده می‌گردد. اما برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تشعشی نیاز است تا علاوه بر معادله انرژی از مدل‌های تشعشع نیز استفاده گردد. در این مسئله از مدل DO بدین منظور استفاده شده است. روش حل، به صورت پایا در نظر گرفته شده است. برای حل پدیده‌ی آشفستگی جریان که به خاطر حرکت توده‌ای در رینولدزهای بالا رخ می‌دهد، از مدل RANS K- ω SST، برای محاسبه توزیع اجزا در یک مخلوط از مدل انتقال گونه‌ها^۲ و برای واکنش‌ها (احتراق مشعل‌ها و واکنش تخریب روغن در لوله‌ها) از مدل اتلاف گردابی^۳ استفاده شده است. شبیه‌سازی کوره با داده‌های دمای خروجی از گذرگاه‌های کوره شبیه‌سازی با خطای نسبی و مطلق ۲/۲٪ و ۷ درجه با دمای خروجی روغن از شرایط عملیاتی کوره‌ی صنعتی اعتبارسنجی شده است که بخشی از این خطا ممکن است بدلیل دمای ورودی محاسبه شده از موازنه حرارت کوره باشد. در پژوهشی مشابه، فیروزی و همکاران [۲۷] از شبیه‌سازی CFD کوره، مقدار خطای نسبی و مطلق دمای سیال داخل لوله‌ها را ۳/۹۱ درصد و ۲۰/۳۶ درجه در مقایسه با داده‌های تجربی کوره بدست آورده است. دیگر مقادیر مسئله، مطابق جدول ۲ است.

نتایج و بحث

۱.۳. بررسی استقلال از شبکه

^۱ terphenyl hydrogenated (C₁₈H₁₂)

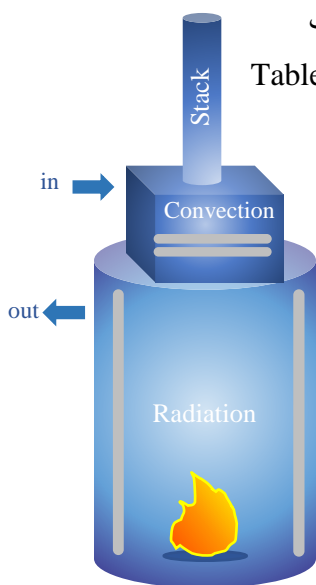
^۲ Species Transport

^۳ Eddy-Dissipation

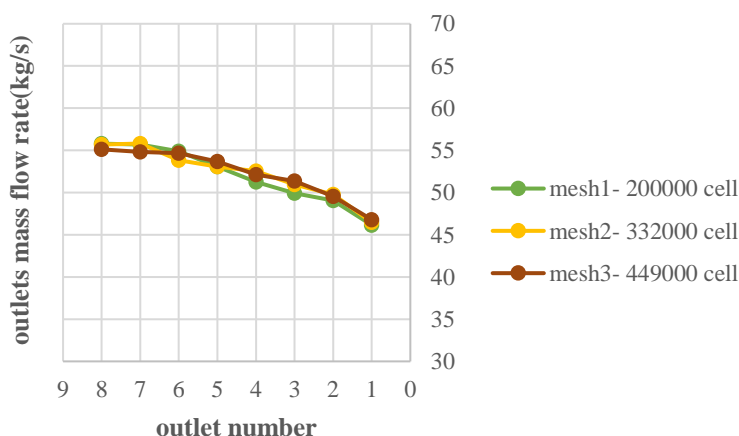
شکل ۱، نتایج استقلال از شبکه داکت توزیع جریان را نمایش داده است. شبکه چهاروجهی نامنظم در سه حالت ۲۰۰ هزار، ۳۳۲ هزار و ۴۴۹ هزار سلول شبیه‌سازی شد. میانگین اختلاف نسبی و اختلاف مطلق نتایج هشت دبی خروجی داکت بین حالت اول و دوم شبکه، ۱/۱ درصد و ۰/۵۸ کیلوگرم بر ثانیه و بین حالت دوم و سوم شبکه، ۱ درصد و ۰/۵۵ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمد. هم‌چنین شبکه‌بندی کوره با ۱/۲ میلیون سلول، ۳/۰۸ میلیون و ۳/۴۱ میلیون از نوع چندوجهی بررسی شد. اختلاف نسبی و مطلق دمای یک خروجی روغن، بین شبکه اول و دوم مقدار ۰/۳ درصد و ۰/۹ درجه و بین شبکه دوم و سوم، مقدار ۰/۰۳ درصد و ۰/۱ درجه بدست آمد.

جدول ۲- شرایط جریان در شبیه‌سازی به همراه شماتیک ساده‌ای از کوره‌ی مورد بحث

Table 2. flow conditions in simulation with a simple schematic of the discussed furnace



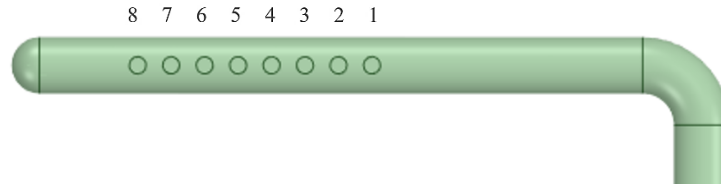
Parameter	Unit	value	Parameter	Unit	Value
Percentage of excess combustion air	%	۱۵	The weight percentage of coke particles considered in the oil stream	%	۰/۶۶
Oil stay time in the whole furnace	min	۱/۱۹	Diameter of coke particles	μm	۳۰
The speed of heating the oil in the furnace	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$	۲۵/۲	Density of coke particles	g/m ³	۱۵۰۰۰
Oil inlet temperature to the furnace	$^{\circ}\text{C}$	۲۹۰	Thermal conductivity coefficient of coke particles	W/m.k	۳
Oil outlet temperature from the furnace	$^{\circ}\text{C}$	۳۲۰	Ratio of the distribution duct inlet cross-section to the total outlet cross-section area (AR)	-	۰/۳۴۷
Center-to-center distance of distribution duct outlets	mm	۳۰۴/۸	Reynolds Number in inlet	-	۸۲۶۷۷



شکل ۱ - دبی خروجی از ۸ گذرگاه داکت توزیع جریان در سه شبکه‌بندی متفاوت
Figure 3. Output flow from 8 flow distribution ducts in three different mesh

۲.۳. نتایج داکت توزیع جریان

جهت یافتن دبی ورودی روغن به هر گذرگاه کوره، ابتدا داکت توزیع جریان شبیه‌سازی شده است. شکل ۲، هندسه‌ی رسم شده از این داکت در شبیه‌سازی است.



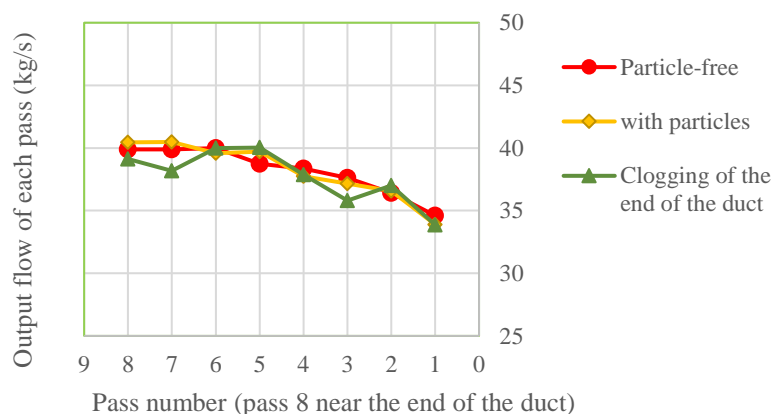
شکل ۲. هندسه‌ی رسم شده داکت در شبیه‌سازی

Figure 2. The drawn geometry of the duct in the simulation

این داکت در سه حالت شبیه‌سازی شده است. حالتی که روغن تمیز باشد و حالتی که دارای ذرات کک باشد و حالتی که کلگی انتهای داکت توسط ذرات کک کاملاً دچار گرفتگی شود و از محدوده جریان حذف شود. مطابق نتایج شبیه‌سازی، در حالت اول (با روغن تمیز)، دریافت شد که سرعت در انتهای کلگی بسیار پایین است و $13/3$ درصد اختلاف بین دبی خروجی ابتدا و انتها بدست آمد. در حالت دوم (با ذرات کک)، دریافت شد که ذرات در انتهای کلگی تجمع زیادی دارند. با توجه به نتایج این دو حالت، احتمال رسوب و ته نشینی ذرات در کلگی انتهای داکت، بالا می‌باشد. بنا بر سابقه‌ی عملیاتی کوره و طبق گزارش‌های موجود، سابقه‌ی این اتفاق نیز وجود دارد. بنابراین، در حالت سوم، کلگی پر از ذرات ته نشین شده‌ی کک و مسدود شده، در نظر گرفته شد. به عبارتی کلگی داکت از هندسه و دامنه‌ی شبیه‌سازی در حالت سوم شبیه‌سازی، حذف شد. شکل ۳، مقایسه‌ی شبیه‌سازی‌های داکت را در این سه حالت، نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت کلی داکت بدون ذره و دارای ذره، بیشترین دبی خروجی از گذرگاه ۸ (سمت کلگی) و کمترین دبی از گذرگاه ۱ خواهد بود. اما در حالت ته‌نشینی و رسوب ذرات در انتهای کلگی و مسدود شدن انتهای داکت، دبی گذرگاه‌های ۷ و ۸، کاهش خواهد یافت. این در حالی است که کسر حجمی ذرات کک ورودی به گذرگاه ۸ نسبت به دیگر گذرگاه‌ها مطابق نتایج شبیه‌سازی، هم‌چنان بیشتر خواهد شد. به عبارتی هرچه ته‌نشینی ذرات در انتهای داکت بیشتر شود، دبی جریان خروجی از گذرگاه ۸ و ۷ کمتر و کسر حجمی ذرات کک در آنها بیشتر خواهد شد. شکل ۴، حرکت جریان و گردابه‌های ایجاد شده در انتهای داکت را در نمایی نزدیک نمایش می‌دهد. با توجه به آشفتگی بودن رژیم جریان و بالا بودن سرعت آن، جریان در ابتدای ورود به داکت، بیشتر تمایل دارد به مسیر خود ادامه دهد تا اینکه به داخل گذرگاه‌های اولیه وارد شود، در نتیجه مطابق نتایج شبیه‌سازی، جریان ورودی به گذرگاه‌های انتهای کلگی، بیشتر و جریان ورودی به گذرگاه‌های ابتدایی کمتر است (شکل ۳). از طرفی تاثیر گردابه‌ی بزرگ ایجاد شده در انتهای کلگی (شکل ۴) به گونه‌ای است که تا حدی در برابر عبور جریان به گذرگاه‌های آخر (نزدیک کلگی) مانع ایجاد می‌کند. به

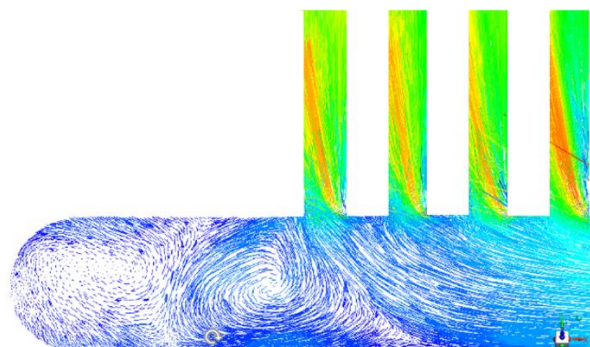
همین دلیل روند افزایشی دبی تا گذرگاه ششم ادامه دارد و از آن پس، گردابه‌های ایجاد شده در انتهای داکت، تا حدی شیب این روند افزایشی دبی را کاهش می‌دهد. این تاثیر در حالت سوم (انسداد کلگی)، بیشتر است.

شکل ۵، کانتور کسر حجمی ذرات و نمودار تغییرات این کسر حجمی در هشت گذرگاه را در حالت حذف کلگی نمایش می‌دهد. در حالت وجود کلگی نیز، ذرات ورودی به گذرگاه هشتم نزدیک به کلگی بیشتر است. اما به تدریج با رسوب ذرات در انتهای کلگی و مسدود شدن انتهای آن مطابق شکل ۵ غیریکنواختی توزیع ذرات و ورود بیشتر آن‌ها به گذرگاه هشتم افزایش می‌یابد. کسر حجمی ذرات گذرگاه ۸ نسبت به ۱، ۳ درصد بیشتر است.



شکل ۳. مقایسه شبیه‌سازی داکت در شرایط مختلف

Figure 3. Comparison of duct simulation in different conditions



شکل ۴. بردارهای جهت حرکت جریان در داکت از نمای نزدیک‌تر در حالت تک فاز

Figure 4. Flow direction vectors in the duct from a closer view in single phase mode

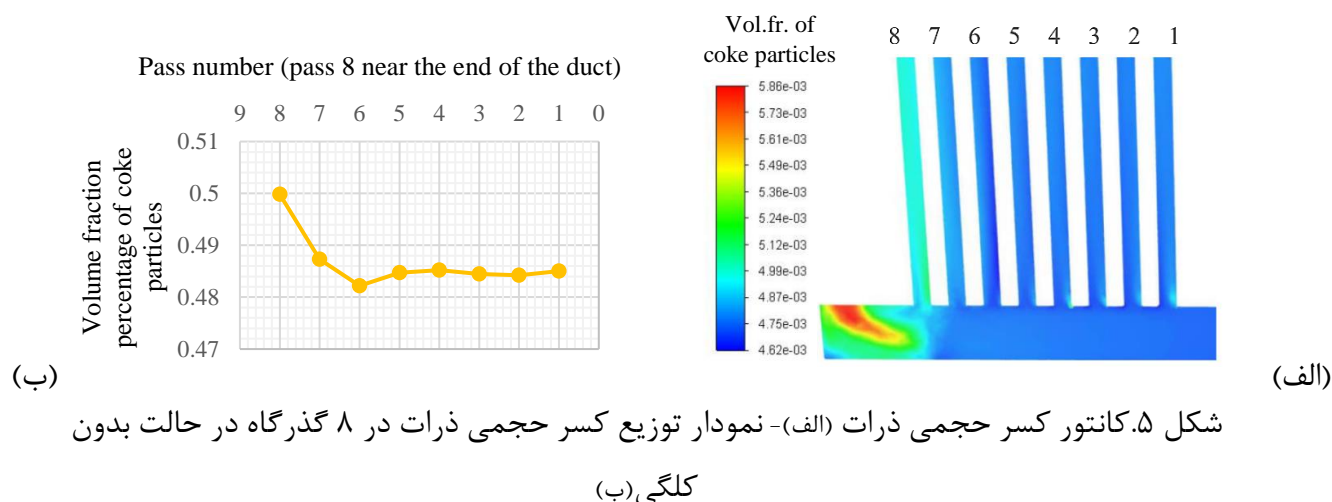


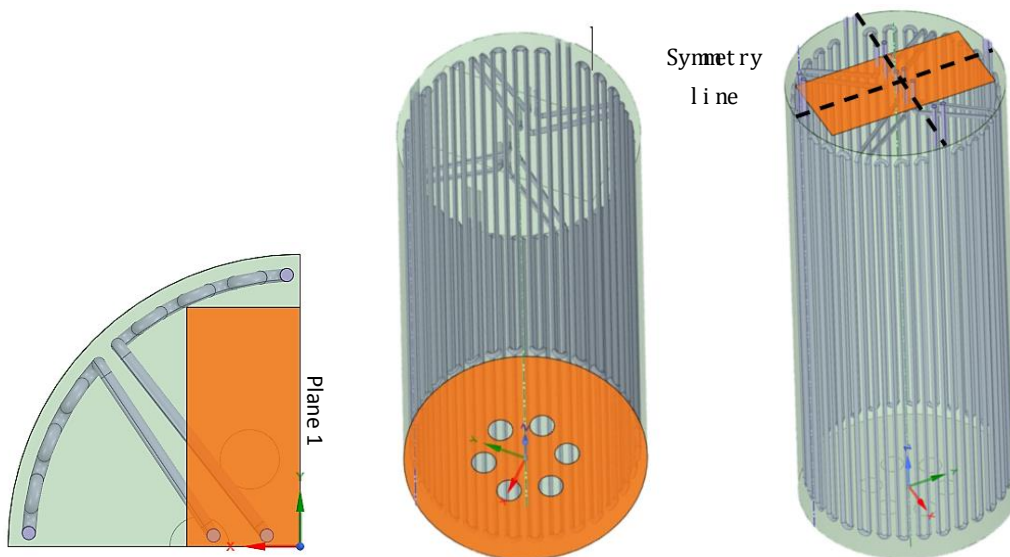
Figure 5. The contour of the volume fraction of particles (a) and the distribution diagram of the volume fraction of particles in 8 passes in the case of blockage at the end of the duct head (b)

۳،۳ کوره

شکل ۶، هندسه‌ی رسم شده از بخش تشعشی کوره را نمایش می‌دهد. بنابر خطوط تقارن در شکل، یک ربع از این بخش وارد شبیه‌سازی شده است. روغن ورودی به کوره تمیز و بدون ذرات کک در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی داکت دارای کلگی و بدون ذره در شکل ۳، هر چهار ربع در دبی ورودی به گذرگاه‌ها با یکدیگر تفاوت دارند و بنا بر این نتایج، ربعی که دارای گذرگاه ۱ و ۳ است (گذرگاه‌های داکت توزیع، در کوره، یکی در میان کنار هم قرار گرفته‌اند)، دارای کمترین دبی روغن می‌باشد. به همین دلیل برای بدست آوردن بالاترین دمای خروجی نسبت به سه ربع دیگر، این ربع برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. به عبارتی کمترین دبی یا سرعت ورودی، به جهت افزایش زمان ماند روغن در کوره، بالاترین دمای خروجی را در پی خواهد داشت.

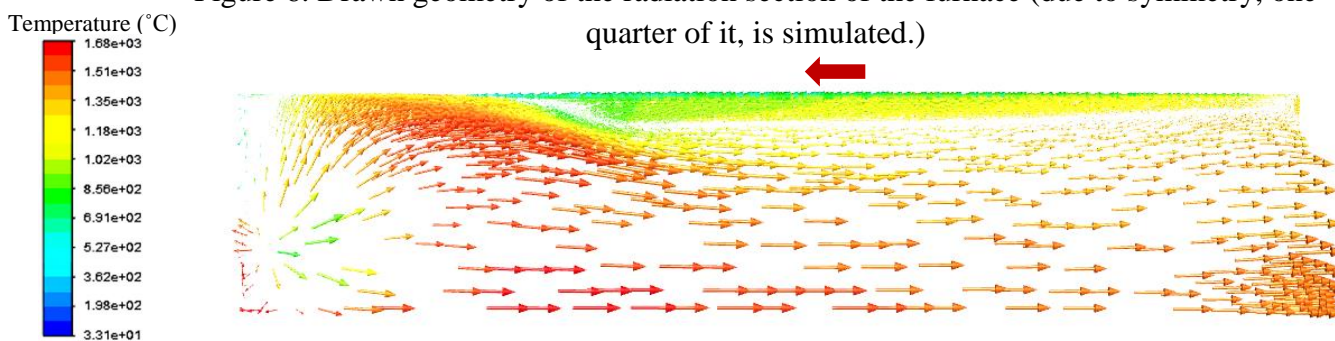
براساس نتایج شبیه‌سازی، (در حالت توزیع برابر دبی روغن بین ۸ گذرگاه) گذرگاه ۳ و ۴ و ۵ و ۶ در شکل ۷، حرارت برابر و گذرگاه ۱ و ۲ و ۷ و ۸ نیز در این شکل، حرارت برابر دریافت کرده‌اند. اما بدلیل شکل خروجی دود و مشعل‌ها، گروه اول، حرارت بیشتری نسبت به گروه دوم (۱/۱۸ برابر) گرفته‌اند (گذرگاه‌هایی که ناحیه‌ی بزرگتری از آنها در نزدیک خروجی دود قرار دارد). شکل ۷، جهت جریان را در صفحه‌ی ۱ مشخص شده در شکل ۶ (یک صفحه قائم از کوره بین دو برنر و بین دو گذرگاه) نمایش می‌دهد. مطابق شکل، جهت جریان در پشت لوله‌ها، عکس جهت جریان در مرکز کوره است. بدلیل اینکه تمام مقطع سقف استوانه، برای خروج دود باز نیست (بخش نارنجی رنگ در شکل ۶ تنها باز می‌باشد) جریان در وسط کوره به سمت بالا حرکت کرده و از خروجی مستطیل

شکل خارج شده است و بخشی نیز به ناحیه‌ی مسقف در شکل ۶ برخورد کرده و از پشت لوله‌ها به سمت پایین (کف) برگشته است.



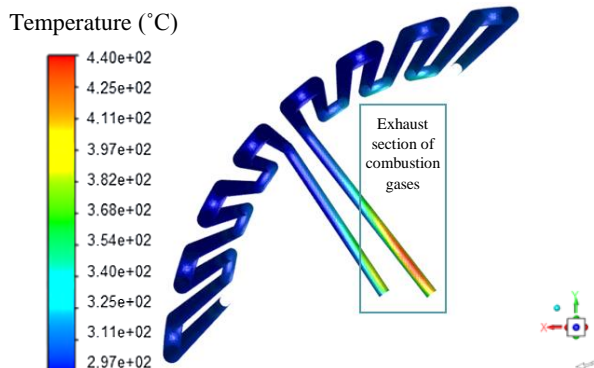
شکل ۶. هندسه‌ی رسم شده از بخش تشعشعی کوره (باتوجه به تقارن، یک ربع آن وارد شبیه‌سازی شده است)

Figure 6. Drawn geometry of the radiation section of the furnace (due to symmetry, one quarter of it, is simulated.)



شکل ۷. جهت جریان در یک صفحه قائم از کوره (طیف رنگی، نشان دهنده دمای جریان است)

Figure 7. Flow direction in a vertical plane of the furnace (color spectrum indicates flow temperature)



شکل ۸ - کانتور دمای فیلم روغن (درجه سانتیگراد، دمای روغن مجاور پوسته داخلی لوله ها)

Figure 8. Oil film temperature contour (degrees Celsius, oil temperature adjacent to the inner shell of the tubes)

با توجه به کانتور دمای روغن در شکل ۸، در نزدیکی خروجی مستطیل شکل، حداکثر دمای فیلم روغن (لایه‌ی نازکی از روغن که مجاور پوسته داخلی لوله قرار دارد) به ۴۴۰ درجه سانتیگراد رسیده این دما تنها در لایه‌ی نازک مجاور پوسته لوله‌ها رخ داده و در لایه‌های مرکزی داخل لوله در همین ناحیه، دما نزدیک به ۲۹۷ درجه سانتیگراد بدست آمد. مطابق با کاتالوگ روغن ترمینول ۶۶، حداکثر دمای فیلم روغن، ۳۷۵ درجه سانتیگراد است. لذا باید انتظار داشت در این قسمت جریان روغن عبوری از لوله‌ها دچار تخریب شود. در نتیجه تخریب روغن ترکیبات سبک با نقطه جوش پایین و همینطور کک تولید می‌شود. رخ دادن حداکثر دمای روغن در بخش خروجی مستطیل شکل تشعشع در نتایج شبیه‌سازی می‌تواند بدلیل افزایش سرعت گازهای احتراق، به جهت کاهش ناگهانی مقطع عبور گاز و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی باشد. برای کاهش این مسئله، تغییر مقطع خروجی تشعشع از مستطیلی به شیبدار مطابق شکل ۹، جهت کاهش تدریجی مقطع و در نتیجه افزایش تدریجی سرعت گاز و متعاقباً ضریب انتقال حرارت جابجایی، ممکن است بتواند مفید باشد.



شکل ۹ - تغییر مقطع عبوری از ناحیه تشعشع به ناحیه همرفت از حالت مستطیلی به شیبدار

Figure 9. Changing the cross section from the radiation zone to the convection zone from rectangular to inclined

جدول ۳، مقایسه‌ی دو شبیه‌سازی از کوره در مورد تاثیر تغییر دبی و سرعت ورودی روغن و تاثیر هندسه‌ی کوره در دمای خروجی گذرگاه‌ها را نمایش می‌دهد. در شبیه‌سازی اول، داکت توزیع روغن ورودی (حالت دارای کنگی و بدون ذره) به همراه کوره در نظر گرفته شده و در نتیجه دبی به صورت غیریکنواخت بین هشت گذرگاه توزیع شد و در شبیه‌سازی دوم کوره، تاثیر این داکت حذف شده و دبی به صورت یکسان بین هشت گذرگاه تقسیم شد. مطابق جدول ۳، مشاهده شد که گذرگاه ۱ که در حالت اول (دبی ۳۴/۶) دارای دمای خروجی ۳۰۷/۳۹ بود، در حالت دوم (دبی ۳۸/۱۹)، به دمای خروجی ۳۰۶/۲۹ درجه سانتیگراد رسیده است. به عبارتی به میزان حدود ۳/۶ واحد کیلوگرم بر ثانیه کاهش در دبی روغن ورودی در گذرگاه ۱، افزایش ۱/۱ واحد درجه سانتیگراد در دمای خروجی آن را در پی داشته است. همچنین با مقایسه‌ی دما در سطر آخر این جدول دریافت شد که در صورت

توزیع یکسان دبی بین هشت گذرگاه، بدلیل هندسه‌ی کوره، حدود ۲ درجه اختلاف دمایی خروجی به صورت یک در میان بین گذرگاه‌ها از نتایج بدست آمد.

جدول ۳. مقایسه دما و دبی دو شبیه‌سازی کوره

Table 3. Comparison of temperature and flow of two furnace simulations

Comparison of the effect of furnace geometry and change of inlet oil flow on oil outlet temperature			
		Pass-۳	Pass-1
Furnace with different flow (considering the oil inlet duct)	flow (kg/s)	۳۷/۶	۳۴/۶
	out temp. (°C)	۳۰،۸/۳	۳۰،۷/۳۹
Furnace with equal flow distribution	flow (kg/s)	۳۸/۱۹	۳۸/۱۹
	out temp. (°C)	۳۰،۸/۳۵	۳۰،۶/۲۹

۴،۳ اتلاف حرارتی دیواره‌ی کوره

اتلاف حرارت از کوره در جدول ۴ ذکر شده است. اتلاف حرارت از بخش تشعشع کوره از شبیه‌سازی بدست آمده است و اتلاف حرارت از دیواره‌ی بخش همرفت با استفاده از معادله‌ی ضرایب انتقال حرارت هر ماده محاسبه شده است. مقدار انرژی اتلافی از هر متر مربع دیواره بخش ردییشن، مطابق نتایج شبیه‌سازی، ۶۵۹/۲۰ وات و مقدار انرژی اتلافی از هر متر مربع از سقف تشعشعی، ۶۷۹/۲۳ وات بدست آمد. برای محاسبه‌ی اتلاف حرارت دیواره در ناحیه همرفت، براساس رابطه‌ی زیر، مجموع مقاومت حرارتی هدایتی و جابجایی لایه‌های دیواره، ضرب در مساحت سطح دیواره و اختلاف دمایی بین بیرون دیواره و درون کوره (دمای عملیاتی از اندازه‌گیرهای موجود در کوره)، استفاده شده است.

$$q = UA\Delta T = \frac{1}{\sum_i R_i} A\Delta T = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{h_i} + \sum_i \frac{x_i}{k_i}} A(T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

جدول ۴. میزان اتلاف حرارت بخش تشعشعی و بخش همرفت

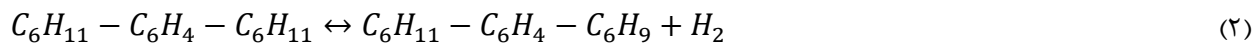
Table ۴. Radiation and convection heat loss rate

No.	Name	value
۱	The percentage of heat loss from the radiation section to the total heat produced in the furnace (The wall includes refractory cement (125 mm) and carbon steel (6))	۲%
۲	The percentage of heat loss in the convection section compared to the total heat entering the convection (Convection section has four walls, two walls with refractory cement (150 mm) and carbon steel (5) and two walls with 5 layers of	% ۰/۳۲

	refractory cement (125), carbon steel (12), air (520), Refractory cement (50), carbon steel (5)	
۳	The percentage of heat loss in the convection part of the total heat produced in the furnace	۰/۱۸ %

۵.۳ بررسی تاثیر سنتیک تخریب روغن در شبیه‌سازی

بررسی میزان تخریب روغن در کوره با اضافه کردن واکنش تخریب برای روغن داخل لوله‌های کوره در شبیه‌سازی پیشین بدست آمد. در تحقیقات پژوهشگران، رابطه‌ی ۱ به عنوان واکنش اصلی تخریب و رابطه‌ی ۲ به عنوان سنتیک تخریب روغن ترمینول ۶۶ ذکر شده است [۲۸]. با یافتن میزان گازهای تولیدی حاصل از تخریب روغن (H_2 محصول واکنش)، میزان کاهش جرم روغن در طول زمان برای همه‌ی ۸ گذرگاه، $10^{-8} \times 3/71$ کیلوگرم در ثانیه بدست آمد (بدلیل دمای بالاتر بخش تشعشع نسبت به بخش همرفت، عمده تخریب روغن در این بخش صورت می‌گیرد).



$$k = 1/39 \exp\left(-\frac{82033}{RT}\right) \quad (3)$$

۳. نتیجه‌گیری

به هدف یافتن حداکثر دمای روغن، شبیه‌سازی بخش تشعشع کوره که مطابق نظر پژوهشگران (ماتیوس و همکاران [۲۴])، احتمال وقوع دمای بالاتر در این بخش بیشتر بود و داکت توزیع جریان روغن آن انجام شد. مطابق نتایج شبیه‌سازی، با کاهش ۳/۶ کیلوگرم بر ثانیه در دبی یک گذرگاه روغن، دمای خروجی آن گذرگاه ۱/۱ درجه سانتیگراد افزایش یافت. همچنین در حالت توزیع یکسان، بدلیل هندسه‌ی کوره، حدود ۲ درجه اختلاف دمای خروجی به صورت یک در میان بین گذرگاه‌های روغن رخ داد. جهت جریان گازهای احتراق در بخش تشعشع کوره در پشت لوله‌ها، به صورت عکس و به سمت کف کوره است. نسبت میزان اتلاف حرارت بخش تشعشع کوره از دیواره به حرارتی تولیدی، ۲ درصد از شبیه‌سازی بدست آمد. با توجه به اینکه یکی از عوامل موثر در تخریب روغن، دمای بالایی است که در کوره رخ می‌دهد، شبیه‌سازی CFD برای بررسی عملکرد کوره انجام شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی یکی از مواردی که احتمال تخریب روغن را افزایش می‌دهد هندسه‌ی داکت توزیع روغن در کوره است که جریان را به صورت غیریکنواخت توزیع می‌کند و همچنین ظرفیت بالایی در ته‌نشین کردن ذرات در انتهای کلگی آن و مسدود کردن گذرگاه‌های نزدیک به کلگی تحت تاثیر رسوب کک را دارد. لذا اصلاح هندسه‌ی داکت توزیع جریان از جمله تغییر مقطع ثابت به مقطع کاهشی مطابق پژوهش‌های مشابه ذکر شده در بخش مقدمه، به منظور توزیع یکنواخت و جلوگیری از ته‌نشین شدن ذرات، ممکن است مفید باشد. نکته دیگر، در

بخش خروجی تشعشی در داخل کوره، گازهای احتراق با سرعت بالاتری به لوله‌های روغن برخورد می‌کنند که در نتیجه با افزایش ناگهانی نرخ انتقال حرارت، دمای بالاتری ایجاد می‌شود که احتمال تخریب روغن را بالا می‌برد. لذا تغییر هندسه‌ی ناحیه‌ی اتصال بخش استوانه‌ای (بخش تشعشی) به بخش مکعب مستطیل کوره (بخش همرفت) از مستطیلی به صورت شیبدار، ممکن است مفید باشد.

۴. منابع

- [1] Minocha, N., Joshi, J. B. (2020), 3D CFD simulation of turbulent flow distribution and pressure drop in a dividing manifold system using openfoam, *Heat & Mass Transfer*, 151(119420). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119420>
- [2] Yazici, F., Karadag, M. A., Gokluber, P., Kibar, A. (2024), Examining the uniformity of flow distribution in manifolds, *Applied Fluid Mechanics*, 17(5), 989-1001. <https://doi.org/10.47176/jafm.17.05.2302>
- [3] Majumdar, A. K. (1980), Mathematical modelling of flows in dividing and combining flow manifold, *Applied Mathematical Modelling*, 4 (6) , 424-432. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(80\)90174-2](https://doi.org/10.1016/0307-904X(80)90174-2)
- [4] Hassan, J. M., Mohamed, T. A. Wahid S. Mohammed and Wissam H. Alawee, (2014), Modeling the Uniformity of Manifold with Various Configurations, *Fluids*,11. <https://doi.org/10.1155/2014/325259>
- [5] Jimmy, C.K. T., Sparrow, E. M., Abraham, J. P. (2009), Geometric strategies for attainment of identical outflows through all of the exit ports of a distribution manifold in a manifold system, *Thermal Engineering*, 29, 3552–3560. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.06.010>
- [6] Kim, S., Choi, E., Cho, Y. (1995), The effect of header shapes on the flow distribution in a manifold for electronic packaging applications, *Heat & Mass Transfer*, 22(3), 329-341. [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(95\)00024-S](https://doi.org/10.1016/0735-1933(95)00024-S)
- [7] Zhang, W., Li, A., Gao, R., and Li, Ch. , (2018), Effects of geometric structures on flow uniformity and pressure drop in dividing manifold systems with parallel pipe arrays, *Heat & Mass Transfer*, 127 , 870–881. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.111>
- [8] Chen, A. W., & Sparrow, E. M. (2009). Systematic Approaches for Design of Distribution Manifolds Having the Same Per-Port Outflow. *Fluids Engineering*, 131(061101-1). <https://doi.org/10.1115/1.3111256>
- [9] Tomor, A., Kristóf, G. (2016), Validation of a discrete model for flow distribution in dividing-flow manifolds: Numerical and experimental studies, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 60(1), 41-49. <https://doi.org/10.3311/PPme.8518>
- [10] Amara, L., & Carvalho, R. (2022), A simplified analytical solution for the dividing manifold flow problem, *Larhyss* ,50 , 95-107.
- [11] Bajura, R. A., Jones, Jr., E. H. (1976), Flow distribution manifolds, *Fluids Eng.*, 98(4), 655. <https://doi.org/10.1115/1.3448441>
- [12] Chaudhry, F. H., Reis, L. F. R., (1992), Calculating flow in manifold and orifice system, *Environmental Engineering*, 118(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1992\)118:4\(585\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1992)118:4(585))
- [13] Wang, J. (2011), Theory of flow distribution in manifolds, *Chemical Engineering*, 168, 1331–1345. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.050>

- [14] pretorius, w. (1997), Dividing-flow manifold calculations with a spreadsheet, water utilisation division, *Water SA*, 23(2), 147-150
- [15] Ahn, H. H., Lee, S. H., Shin, S. H. (1998), Flow distribution in manifolds for low Reynolds number flow, *KSME International Journal*, 12(1), p. 87–95.
- [16] Chen, F., Liu, Y., Cui, Zh., Shao, W. (2020), An optimization method for uniform flow distribution in the manifold of server cabinet, *Energy Science and Engineering*, (00), 1–12. <https://doi.org/10.1002/ese3.826>
- [17] Kubo, T., Ueda, T. (1969), On the characteristics of divided flow and confluent flow in headers, *Jpn. Soc. Mech. Eng.*, 52, 802–809. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.12.802>
- [18] Gandhi, M. S., Ganguli, A. A., Joshi, J.B., Vijayan, P.K. (2012), CFD simulation for steam distribution in header and tube assemblies, *Chem. Eng. Res. Des.*, 90, 487–506. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.08.019>
- [19] Kim, D., Hwan, Y. Ch., Yoon, S. H., Choi, J. S. (2011), Effects of manifold geometries on flow distribution to parallel microchannels, *Mechanical Science and Technology*, 25(12), 3069-3074. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-1220-3>
- [20] Jiang, Y., Alawee, W. H., Abdelmonem, F. E., Abdelkader, s. A., Zakaria, M. O., Hijaz, A., Rifaqat, A., Fuzhang, W., Younes, M. (2022), Effect of area ratio and Reynolds number on the distribution of discharge in dividing manifold, *Low-Carbon Technologies*, 17, 1271–1279. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac018>
- [21] Vogel, G. A., Felis, F. C., Rojas, O. J. (2021), 3D printed manifolds for improved flow management in electro dialysis operation for desalination, *Desalination*, 505 (114996). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114996>
- [22] Pigford, R., Asharf, M., Miron, Y. (1983), Flow distribution in piping manifolds, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 22, 463–471. <https://doi.org/10.1021/i100012a019>
- [23] Zhang, Z., Li, Y. (2003), CFD simulation on inlet configuration of plate-fin heat exchangers, *Cryogenics*, 43, 673–678. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(03\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(03)00179-6)
- [24] Díaz-Mateus, F. A. (2011). CFD Technique to calculate tube skin peak temperatures in refinery furnaces. *C.T.F Cienc. Tecno. Futuro*, 4(4), 73-88. <https://doi.org/10.29047/01225383.230>
- [25] Mergan, P., Hashemabadi, S. H. (2021), *Successes of CFD analysis in solving the problems of industrial furnaces*, International Conference Of New Technologies In Oil, Gas And Petrochemical Industries(3th), Tehran,Iran.
- [26] Amini, E., Peyghambarzadeh, S. M., Zarinabadi, S., & Hashemabadi, S. (2021). Effect of bends on heat transfer and hydrodynamics of hot oil in the coils of the radiation section of an industrial furnace, *Energy Conversion Mechanical Engineering*, 8(3), 30-46.
- [27] Firouzi, R., Nazif, H. R., Azoji, A. A., Sabet, M. (2021), Computational Fluid Dynamics Simulation and Simultaneous Exergy Analysis of Furnace Unit 104 of Parsian Gas Refining Company in Order to Reduce Heat Losses and Optimize Fuel Consumption, *Chemical Engineering Journal of Tabriz University*, 51(4 -97), 395-404.
- [28] Mansi, E., Sau, S., Balog, I., Caputo, G., Corsaro, N., Tiranti, G., Filippi, F., Panza, F., Ratto, N., Simonetti, A., Tizzoni, C., Ciotti, M., Cemmi, A., Annesini, C. (2021), High temperature stability of a commercial terphenyl-based thermal oil, *Progress in Nuclear Energy*, 140(103900). <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103900>
- [29] Kian, A. J., Bazoyar, B., Shariati, A., Hashemabadi, S. H. (2024), Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation of NO_x Pollutant Formation in a Pre-Unmixed and Turbulent Biodiesel Flame, *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 23 (134), 109-122.