



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2067801.2006



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

## Fuel Consumption Optimization in the Main Furnace of the Fluid Catalytic Cracking Unit Using Numerical Simulation and Operational Data

Seyed Muhammad Sadeqi<sup>1</sup>, Kazem Mohammadzadeh<sup>2\*</sup>, Somayeh Davoodabadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Mechanical Engineering, Arak University of Technology

<sup>2</sup> Assistant Professor, Mechanical Engineering, Arak University of Technology

<sup>3</sup> Associate Professor, Mechanical Engineering, Arak University of Technology

Received: 2 Jun 2025

Accepted: 18 Aug 2025

### Abstract

Optimizing fuel consumption in industrial furnaces plays a crucial role in reducing energy costs and minimizing environmental emissions. This study focuses on improving fuel efficiency in the main furnace of the RFCC unit at Imam Khomeini Shazand Refinery. A combined approach of numerical simulation using Aspen EDR and analysis of operational data from the Distributed Control System (DCS) was employed. Key parameters investigated include excess air ratio, refractory lining thickness, and the application of a 100 mm fibrous ceramic coating. Results indicate that increasing excess air from 15% to 50% leads to a 17.6% rise in fuel consumption and a 2.7% reduction in thermal efficiency. Conversely, the application of a 100 mm ceramic coating resulted in a 7.2% fuel saving and a 5.4 percentage-point improvement in efficiency. Multi-objective optimization using a genetic algorithm identified optimal operating conditions at 5.84% oxygen concentration, 60% damper opening, and a feed rate of 450 m<sup>3</sup>/h, yielding a 1.8% improvement in thermal efficiency compared to baseline operation. The findings provide practical and cost-effective strategies for enhancing energy efficiency in industrial furnaces.

**Keyword:** Fuel Consumption Optimization, Numerical Simulation, Cylindrical Furnace, Genetic Algorithm, Ceramic Fiber Blanket

\* k.mohammadzadeh@arakut.ac.ir

### Please Cite This Article Using:

Sadeqi, S.M., Mohammadzadeh, K., Davoodabadi, S., "Fuel Consumption Optimization in the Main Furnace of the Fluid Catalytic Cracking Unit at Shazand Refinery Using Numerical Simulation and Operational Data", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 90, pp. 57-72, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2067801.2006



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

## بهینه‌سازی مصرف سوخت در کوره اصلی واحد شکست کاتالیستی با استفاده از شبیه‌سازی عددی و داده‌های عملیاتی

سید محمد صادقی<sup>1</sup>، کاظم محمدزاده<sup>2\*</sup>، سمیه داودآبادی فراهانی<sup>3</sup>

<sup>1</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

<sup>2</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

<sup>3</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

دریافت: 1404/03/12 پذیرش: 1404/05/27

### چکیده

بهینه‌سازی مصرف سوخت در کوره‌های صنعتی نقش مهمی در کاهش هزینه‌های انرژی و آلاینده‌های زیست‌محیطی دارد. این پژوهش به بهینه‌سازی مصرف سوخت در کوره اصلی واحد RFCC پالایشگاه امام خمینی شازند می‌پردازد. بدین منظور، از تلفیق شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Aspen EDR و تحلیل داده‌های عملیاتی سیستم کنترل توزیع شده (DCS) استفاده شده است. پارامترهای کلیدی شامل درصد هوای اضافه، ضخامت عایق دیواره محفظه احتراق و استفاده از پوشش سرامیکی الیافی بررسی شدند. نتایج نشان داد افزایش هوای اضافه از 15% به 50% موجب افزایش 6/17 درصدی مصرف سوخت و کاهش 7/2 درصدی بازده حرارتی می‌شود. در مقابل، استفاده از پوشش سرامیکی 100 میلی‌متری سبب صرفه‌جویی 2/7% در مصرف سوخت و بهبود 4/5 واحد درصدی بازده گردید. بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک، شرایط بهینه را در غلظت اکسیژن 84/5%، باز بودن دمپر 60% و دبی خوراک 450 مترمکعب بر ساعت شناسایی کرد که بازده را نسبت به حالت پایه 8/1% افزایش داد. نتایج این مطالعه راهکارهای عملی و کم‌هزینه‌ای برای ارتقای بازده انرژی در کوره‌های صنعتی ارائه می‌کند.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی مصرف سوخت، شبیه‌سازی عددی، کوره استوانه‌ای، الگوریتم ژنتیک، پوشش سرامیکی

\* k.mohammadzadeh@arakut.ac.ir

## 1- مقدمه

بهینه‌سازی مصرف سوخت در کوره‌های صنعتی، به‌ویژه در واحدهای شکست کاتالیستی بستر سیال<sup>1</sup> RFCC، از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این واحدها به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در پالایشگاه‌ها شناخته می‌شوند [1]. در واحد RFCC، هیدروکربن‌های سنگین شامل ته‌مانده‌های پالایشگاهی، نفت کوره و گازوئیل سنگین، در حضور کاتالیست سیال بر پایه زئولیت و در دمای 500-550 درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار 1-3 بار، از طریق مکانیسم‌های شکست کاتالیستی، ایزومریزاسیون و آلکیلاسیون به محصولات سبک‌تر مانند بنزین با اکتان بالا، پروپیلن و گازهای سبک (C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>) تبدیل می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهد که حدود 60 تا 65 درصد از انرژی مصرفی در این واحدها به‌صورت تلفات حرارتی هدر می‌رود، که این امر نه تنها هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد، بلکه تأثیرات منفی بر محیط زیست از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند NO<sub>x</sub> و CO دارد [2]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی با بهره‌گیری از ترکیب شبیه‌سازی عددی (CFD) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی الگوی احتراق در کوره‌های پالایشگاهی انجام شده‌اند. یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهد که با استفاده از این رویکرد می‌توان ضمن حفظ بازده احتراق و پایداری شعله، تا حدود 30 درصد از میزان انتشار NO<sub>x</sub> کاست [3]. بهبود بازدهی حرارتی و کاهش مصرف سوخت در کوره‌هایی مانند H-1502، علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، گامی مهم در راستای کاهش آلاینده‌ها و تحقق اهداف توسعه پایدار است [4]. کوره‌های صنعتی واحد RFCC به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در پالایشگاه‌ها شناخته می‌شوند و مطالعات نشان می‌دهد حدود 60-65 درصد از انرژی مصرفی در این واحدها به‌صورت تلفات حرارتی از بین می‌رود [2]. گزارش‌های مراجع معتبر، از جمله وزارت انرژی آمریکا (DOE)، نشان می‌دهند که بهینه‌سازی پارامترهای احتراق و عایق‌کاری می‌تواند منجر به بهبود 10 تا 20 درصدی در بازدهی کوره‌های RFCC گردد [5]. در یک مطالعه موردی در پالایشگاه شیراز، جایگزینی عایق فیبر سرامیکی پتویی به‌جای سیمان نسوز ریختنی منجر به کاهش 39 درصد دمای بدنه و بهبود 2/7 درصد راندمان شد [6]. این یافته‌ها با نتایج پژوهش ژانگ<sup>2</sup> و همکاران که کاهش 35 درصد تلفات حرارتی با پوشش‌های نانو ساختار (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub>) را گزارش کرده‌اند، همسو است [7].

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مواد نانوالیافی و نانو ساختارهای سرامیکی (مانند SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) به‌دلیل مقاومت حرارتی و پایداری شیمیایی بالا، می‌تواند در بهبود عملکرد حرارتی و کاهش تلفات گرمایی در سامانه‌های صنعتی مؤثر باشد [8]؛ همچنین، به‌کارگیری فناوری‌های نوین احتراقی مانند بازگردش گازهای دودکش (FGR<sup>3</sup>) نقش قابل توجهی در کاهش آلاینده‌های اکسید نیتروژن و بهبود بازده احتراق دارد [9]. وانگ<sup>4</sup> و همکاران در مطالعه‌ای روی مواد عایق نانو ساختار به ضریب هدایت حرارتی 0/038 W/(m.K) دست‌یافته‌اند [10]. علاوه بر این، مطالعات اخیر با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های CFD بر اصلاح ساختار مشعل، تحلیل الگوی آزادسازی حرارت و بهینه‌سازی توزیع دما برای ارتقای بازده حرارتی و کنترل انتشار آلاینده‌ها در کوره‌های صنعتی تأکید دارند [11]. تنظیم هوای اضافه در محدوده 9 تا 15 درصد بهینه‌ترین عملکرد را ایجاد می‌کند که با دستورالعمل‌های به‌روز راهنمای عملیات

<sup>1</sup> Residue Fluid Catalytic Cracking

<sup>2</sup> Xinfang

<sup>3</sup> Flue gas recirculation

<sup>4</sup> Wang

پالایشگاهی 2024 مطابقت دارد [12]. در زمینه بهینه‌سازی احتراق، قنبریان و همکاران [9] در مطالعه کوره پالایشگاه کرمانشاه نشان دادند که اصلاح سیستم مشعل توانست دمای گازهای خروجی را از 850 درجه سانتی‌گراد به حدود 170 درجه سانتی‌گراد کاهش دهد [13]. این نتایج با یافته‌های مطالعه کومار<sup>5</sup> و همکاران نشان داد که تنظیم هوای اضافه در محدوده 9 تا 15 درصد با استفاده از ترکیب روش‌های شبیه‌سازی CFD و یادگیری ماشین می‌تواند منجر به کاهش 22 درصد مصرف سوخت و کاهش 30 درصد انتشار NOx شود. این پژوهش با اعتبارسنجی داده‌های عملیاتی از سه پالایشگاه مختلف، بهینه‌ترین محدوده عملکرد برای کوره‌های صنعتی را شناسایی کرده است [14]. سیستم‌های مانیتورینگ پیشرفته نیز امکان پایش لحظه‌ای عملکرد را فراهم کرده‌اند. برای مثال چن و لی<sup>6</sup> از یک سیستم پایش پیشرفته با قابلیت پایش 200 پارامتر در نرخ نمونه‌برداری 10 Hz را توسعه دادند [15].

با توجه به شکاف‌های پژوهشی موجود، این مطالعه با رویکردی نوآورانه به بهینه‌سازی عملکرد کوره واحد RFCC می‌پردازد. نوآوری اصلی پژوهش در ترکیب سه رویکرد مکمل است: شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Aspen EDR، تحلیل داده‌های عملیاتی استخراج شده از سیستم کنترل توزیع شده (DCS) و بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک<sup>8</sup> [16] برای ارائه راهکارهای عملی و قابل اندازه‌گیری در بهینه‌سازی عملکرد کوره واحد RFCC است. این تلفیق روش‌ها امکان ارائه راهکارهای عملی، کم‌هزینه و قابل اندازه‌گیری برای ارتقای بازده انرژی و کاهش مصرف سوخت در کوره‌های صنعتی را فراهم می‌کند.

## 2- بیان مسئله

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی مصرف سوخت و بهبود بازده حرارتی کوره H-1502 در واحد RFCC پالایشگاه امام خمینی (شازند) انجام شده است. در این مطالعه، بازده حرارتی کوره مطابق با استاندارد API 560 [17]، به عنوان نسبت انرژی مفید جذب شده توسط سیال فرآیندی (بخار) به انرژی ورودی از سوخت تعریف و محاسبه می‌شود.

منابع تأمین بخار اشباع ورودی به کوره H-1502 (شکل 1) به شرح زیر است:

1- تولید بخار از بازیابی حرارت از کاتالیست داغ: در مبدل حرارتی E-1501، با تبادل حرارت بین جریان کاتالیست داغ و آب تغذیه بویلر (BFW) در مخزن V-1505، بخار اشباع تولید می‌شود.

2- تولید بخار از بازیابی حرارت از برج تقطیر اصلی<sup>9</sup> (V-1532): با تبادل حرارت بین سیال داغ بخش پایین برج تقطیر اصلی (V-1532) و آب تغذیه بویلر (BFW) در یک سری مبدل حرارتی نوع کتل، بخار اشباع دیگری تولید می‌گردد.

3- تبدیل نهایی در کوره: بخار اشباع حاصل از این دو مسیر، در کوره H-1502 گرم شده و به بخار فوق‌اشباع تبدیل می‌شود.

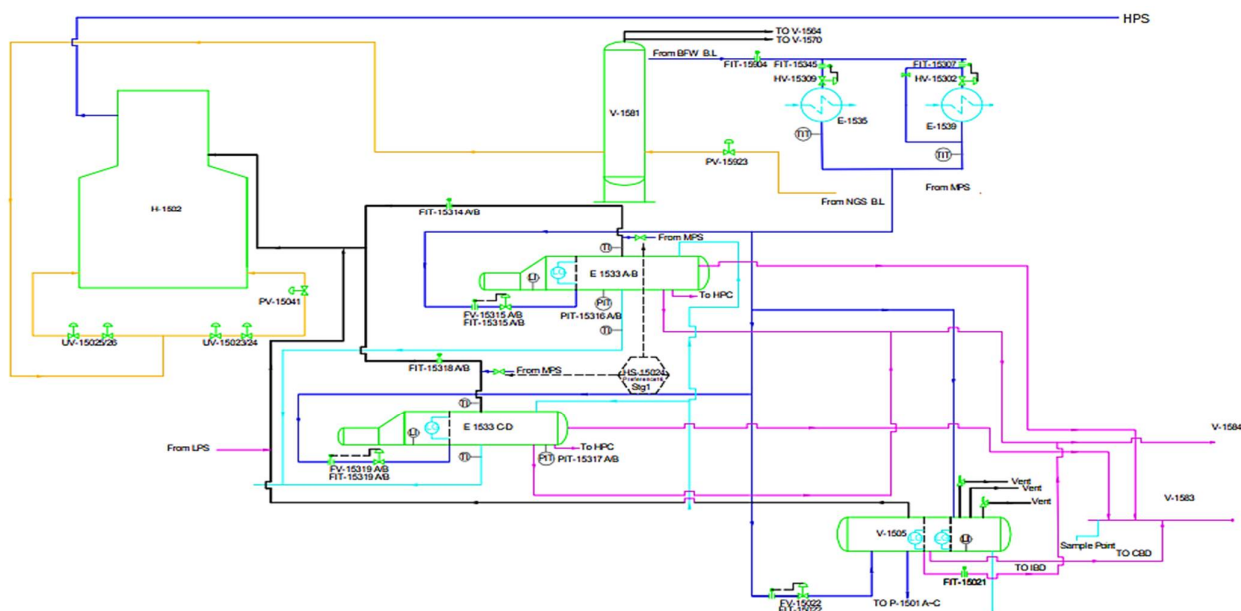
<sup>5</sup> Kumar

<sup>6</sup> Chen, W. & Lee, H.

<sup>7</sup> Distributed Control System

<sup>8</sup> Genetic Algorithm

<sup>9</sup> Main Column



شکل 1- دیاگرام جریان سیستم تولید بخار واحد 1502

ساختار و مشخصات فنی: کوره H-1502 از نوع استوانه‌ای عمودی و شامل سه بخش اصلی است: بخش تابشی؛ مجهز به 80 لوله عمودی از جنس فولاد آلیاژی: ASTM SA335 P22 بخش همرفتی؛ متشکل از 88 لوله افقی در 8 مسیر از جنس فولاد آلیاژی: ASTM SA335 P22 سیستم احتراق؛ دارای 8 مشعل مکش طبیعی از نوع کم‌آلاینده (Low-NOx) در کف کوره. مشخصات عملیاتی: خوراک ورودی به کوره، بخار اشباع است که در دمای حدود 260 سانتی‌گراد وارد و تا دمای عملیاتی 390 سانتی‌گراد گرم می‌شود. ظرفیت حرارتی طراحی کوره 21/075 مگاوات است. داده‌های فرایندی مربوطه در جدول 1 ارائه شده‌است.

جدول 1- مشخصات طراحی کوره [18]

نرمال	طراحی	پارامتر
114893	167476	دبی بخار (kg/hr)
19/818	21/075	ظرفیت (MW)
262	263	دمای ورودی بخار (°C)
47/69	48/38	فشار ورودی بخار (bar)
390	390	دمای خروجی بخار (°C)
46/26	46/48	فشار خروجی بخار (bar)

در حالت حاضر، دیواره محفظه احتراق این کوره با عایق دیرگداز ریختنی (Castable Refractory) بر پایه آلومینا به ضخامت اسمی 138 میلی‌متر عایق‌بندی شده است. در این پژوهش، جایگزینی این عایق با پوشش‌های سبک وزن و کارآمد از جنس پتوهای الیاف سرامیکی (Ceramic Fiber Blanket) به عنوان یک راهکار بهینه‌سازی پیشنهاد و اثرات آن به طور کمی آنالیز شده است. با وجود طراحی بهینه، آنالیز داده‌های عملیاتی سیستم کنترل توزیع شده

(DCS) نشان‌دهنده عملکرد غیربهبینه کوره است که مهم‌ترین نمود آن در مصرف سوخت بالا و تلفات حرارتی قابل توجه از طریق دیواره‌ها و گازهای دودکش می‌باشد. این پژوهش به دنبال شناسایی ریشه‌های این اتلاف و ارائه راهکارهای عملی و کم‌هزینه برای کاهش آن است.

### 3- روش‌شناسی پژوهش

#### 3-1- بررسی عملکرد حرارتی کوره H-1502

جمع‌آوری اطلاعات در سه دسته داده‌های عملیاتی از DCS واحد RFCC، اندازه‌گیری میدانی از دمای کوره و تحلیل گازهای خروجی از دودکش جمع‌آوری شده است. میانگین اطلاعات حاصل از تنظیمات لحظه‌ای سیستم کنترل DCS کوره H-1502 در بازه‌های مشخص زمانی 12 ماهه در جدول 2 آورده شده است. بازه حرارتی کوره با استفاده از داده‌های DCS و بر اساس موازنه انرژی بین گرمای ورودی از سوخت و گرمای مفید منتقل شده به سیال فرآیندی محاسبه شد.

جدول 2- پارامترهای کلیدی عمل کردی از سیستم DCS

پارامتر	مقدار میانگین	استاندارد مرجع	حد مجاز استاندارد
بازده حرارتی (%)	84/7	API 560 [17]	بیشتر از 85 درصد
دبی بخار تولیدی (kg/h)	108/742	DATA BOOK [18]	-
دمای بخش تابشی (°C)	573/2	API 560 [19]	- دمای طراحی کمتر از 550 °C - دمای مجاز عملیاتی کمتر از 495 °C
دمای دودکش (°C)	270/1	EPA [1]	کمتر از 300 °C
O <sub>2</sub> (%)	6/12	API 560 [20]	2/5 تا 3 درصد برای سوخت گاز طبیعی

با توجه به داده‌های جدول 2، نقاط بحرانی زیر شناسایی شدند:

1. دمای بخش تابشی برابر با 2573/2 درجه سانتی‌گراد است که 278/2 درجه بالاتر از حد مجاز عملیاتی 495 درجه سانتی‌گراد و 223 درجه بالاتر از دمای طراحی 550 درجه سانتی‌گراد قرار دارد. این وضعیت خطر خزش لوله‌های آلیاژی ASTM A335 P22 را افزایش داده و می‌تواند موجب کاهش عمر مفید آنها شود.
2. مقدار اکسیژن اندازه‌گیری شده در گازهای خروجی محفظه احتراق برابر با 12/6% است که از محدوده مجاز استاندارد API 560 تجاوز می‌کند [20]. علاوه بر این، نتایج آنالیز گازهای خروجی با دستگاه Testo 340 نشان داد که هوای اضافی غیر بهینه با میانگین 2/65%، از محدوده استاندارد 12 تا 20 درصد تجاوز کرده است.
3. اندازه‌گیری دمای بدنه کوره با دماسنج لیزری CEM DT-8858 نشان داد که دمای بخش تابشی بیش از 30 درجه سانتی‌گراد از محدوده مجاز تعیین شده توسط استاندارد API 560 برای پوسته خارجی کوره فراتر رفته است [21]؛ این امر می‌تواند مشکلاتی برای ایمنی و عایق‌های محیط ایجاد کند.

#### 3-2- شبیه‌سازی کوره H-1502

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر مصرف سوخت شناسایی شدند که شامل موارد زیر است:

هوای اضافی: محدوده 1 تا 50 درصد برای بررسی رفتار خارج از محدوده بهینه در نظر گرفته شد محدوده بهینه 15-20 درصد مطابق استاندارد (API 560).

ضخامت عایق‌ها: در محدوده 120 تا 190 میلی‌متر برای جنس دیرگداز ریختنی بر پایه آلومینا متغیر است. ضریب انتشار عایق‌ها: این پارامتر در بازه 0/1 تا 1 تغییر می‌کند.

نوع عایق‌ها: تغییر نوع عایق از دیرگداز ریختنی بر پایه آلومینا به پتوهای فایبر سرامیک.

محدوده‌های تعیین‌شده برای این پارامترها بر اساس استاندارد API 560 و داده‌های طراحی شرکت LINDE، با استفاده از نرم‌افزار Aspen EDR نسخه 11 شبیه‌سازی شدند. تأثیر این تغییرات بر مصرف سوخت، بازده کوره و میزان آلاینده‌ها به‌طور دقیق بررسی شد. همچنین، داده‌های ذخیره شده از سیستم DCS که در بازه زمانی سال 1402-1403 جمع‌آوری شده بودند، با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره در پایتون تحلیل گردید. بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی مانند درصد اکسیژن و میزان باز بودن دمپر بر اساس دبی خوراک، با الگوریتم ژنتیک به منظور کمینه کردن مصرف سوخت انجام گرفت. پارامتر هوای اضافی در محدوده وسیع 1 تا 50 درصد بررسی شد تا یک آنالیز حساسیت جامع صورت گیرد و اثرات شدید و نامطلوب هوای اضافی بسیار کم (که منجر به احتراق ناقص و افزایش آلاینده CO می‌شود) و هوای اضافی بسیار زیاد (که موجب اتلاف حرارتی شدید و کاهش چشمگیر بازده می‌شود) به صورت کمی مشخص شود. این تحلیل اهمیت کنترل بهینه این پارامتر و توجیه اقتصادی راهکارهای کنترلی را به وضوح نشان می‌دهد. پارامتر ضریب انتشار تابشی سطوح داخلی محفظه احتراق نیز در بازه 0/1 تا 1 مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت. این دامنه به‌طور عامدانه انتخاب شد تا شرایط مختلف سطوح، از حالت‌های حدی (سطوح صیقلی با انتشار 0/1) تا پوشش‌های سرامیکی با انتشار بسیار بالا (0/9-1) را پوشش دهد. لازم به ذکر است که هدف اصلی مطالعه، مقایسه اثر هدایت حرارتی عایق‌ها است؛ زیرا هر دو عایق موجود و پیشنهادی (دیرگداز ریختنی و پتوهای سرامیکی) ضریب انتشار تابشی بالای مشابهی در حدود 0/85 دارند و مزیت کلیدی جایگزینی، کاهش چشمگیر هدایت حرارتی و به تبع آن کاهش تلفات حرارتی از دیواره‌ها است. همچنین، در راستای بهینه‌سازی هزینه، استفاده از پوشش‌های ویژه به‌عنوان راهکاری عملی برای بهبود ضریب انتشار تابشی بدون نیاز به تخریب عایق موجود، قابل مطالعه و توصیه می‌باشد.

مدل احتراق مدل‌سازی و شبیه‌سازی کوره H-1502 با فرض احتراق کامل و استفاده از Equilibrium Reactor آغاز شد، اما برای انطباق با داده‌های عملیاتی واقعی شامل هوای اضافی 8% و احتمال احتراق ناقص، مدل با رویکرد Non-Equilibrium بازنگری شد. در این مدل اثرات تشکیل CO تا حدود 50 ppm لحاظ شد و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی Testo 340 اعتبارسنجی گردید. برای تحلیل انتقال حرارت، از رابطه Sieder-Tate برای جریان آشفته و معادله حالت Peng-Robinson برای محاسبه خواص ترمودینامیکی استفاده شد. شرایط مرزی شامل دمای هوای ورودی 25 درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار عملیاتی 1/38 بار مطابق طراحی شرکت LINDE بود و حل عددی معادلات با الگوریتم Newton-Raphson و تلورانس همگرایی 0/00001 انجام شد. محدودیت‌های مدل شامل فرض شرایط پایدار برای تمام سناریوها، عدم در نظر گرفتن افت فشار در محفظه احتراق و دقت اندازه‌گیری میدانی  $\pm 2\%$  برای دما و  $\pm 5\%$  برای دبی گازها بود.

تحلیل سیستم‌های احتراق نشان داد که هوای اضافی و ضریب انتشار حرارتی نقش کلیدی در بازده حرارتی کوره دارند؛ مطالعات تجربی حاکی است که کاهش 5% هوای اضافی می‌تواند تا 2% بهبود در بازده حرارتی ایجاد کند. در این پژوهش، اثر تغییرات پارامترهای کلیدی شامل هوای اضافی (کاهش تدریجی از 50 تا 1 درصد مطابق استاندارد API 560)، ضخامت عایق‌ها (120-190 میلی‌متر) و جایگزینی پوشش‌های حرارتی سنتی با فایبر سرامیک به‌طور سیستماتیک بررسی شد. مشخص شد که کمتر از 5% هوای اضافه باعث احتراق ناقص و بیش از 45% باعث اتلاف حرارتی شدید می‌شود.

با این حال، محدودیت‌هایی در پژوهش وجود دارد. مدل‌سازی بر اساس شرایط پایدار انجام شد و تغییرات دینامیکی و گذرا مانند راه‌اندازی یا توقف واحد را لحاظ نکرده است. فرض احتراق کامل باعث شد اثرات احتراق ناقص یا تشکیل موضعی آلاینده‌ها مانند CO و دوده در نظر گرفته نشود. همچنین اثرات بلندمدت تجهیزات، شامل خوردگی لوله‌ها، کاهش کارایی عایق‌ها و رسوب‌گیری، در مدل لحاظ نشده است. شبیه‌سازی جریان آشفته با مدل Sieder-Tate ممکن است در شرایط با عدد رینولدز بسیار بالا دقت کمتری داشته باشد و محاسبه تابش حرارتی نیز تنها برای سطوح ایده‌آل با ضریب انتشار ثابت انجام شده است. علاوه بر این، نتایج این مطالعه برای کوره‌های با طراحی مشابه مانند واحدهای RFCC معتبر است، اما برای کوره‌های با سوخت‌های متفاوت مانند مازوت یا زیست‌توده ممکن است نیاز به اصلاح پارامترها وجود داشته باشد.

#### 4- نتایج و بحث

با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده به بررسی اثر تغییر درصد هوای اضافی، مصرف سوخت، جنس و ضخامت عایق و ضریب صدور بر عملکرد کوره پرداخته شده است.

##### 4-1- اثر نسبت هوای اضافه

تأثیر هوای اضافه بر عملکرد کوره با استفاده از رابطه 1 تحلیل شد که در آن  $\lambda$  نسبت هوای اضافه،  $AFR_{act}$  نسبت هوای واقعی به سوخت  $(kg_{fuel} / kg_{air})$  و  $AFR_{st}$  نسبت استوکیومتری  $(kg_{air} / kg_{fuel})$  است [22, 23].

طبق قانون هس و نتایج شبیه‌سازی جدول 3، افزایش هوای اضافه از 1 به 50 درصد موجب کاهش دمای آدیباتیک

$$\lambda = AFR_{act} / AFR_{st} \quad (1)$$

احتراق از 838 به 784 درجه‌ی سانتی‌گراد، افزایش تلفات حرارتی از 27/17 به 35/53 درصد و کاهش بازده احتراق از 72/67 به 64/22 درصد شد [23]. کاهش 11/6 درصد در کارایی چرخه‌های حرارتی از رابطه 2 محاسبه شد [24].

$$(\eta_1 - \eta_{50}) / \eta_1 \times 100_{st} \quad (2)$$

این کاهش کارایی عمدتاً ناشی از افزایش آنتالپی گازهای دودکش (به دلیل صرف انرژی برای گرم کردن هوای اضافی) است. در تمام سناریوها، مصرف سوخت ثابت 1700 کیلوگرم بر ساعت (متناسب با شرایط عملیاتی واحد) با مدل احتراق Equilibrium Reactor تحت شرایط مرزی فشار 1/38 بار و دمای هوای ورودی 25 درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. افزایش هوای اضافه باعث تغییرات قابل توجهی در پارامترهای عملکردی کوره می‌شود. همان‌طور که نتایج جدول 3 نشان می‌دهند، افزایش هوای اضافه از 1% به 50% منجر به کاهش دمای آدیباتیک احتراق از 838 به 784 °C شد. این کاهش دما به دلیل رقابت بیشتر بین انرژی سوخت و حجم هوای اضافه رخ می‌دهد؛ هوای اضافی

انرژی حرارتی بیشتری را جذب می‌کند و بنابراین دمای گازهای احتراق کاهش می‌یابد. همزمان، تلفات حرارتی دیواره و گازهای خروجی از 27/17% به 35/53% افزایش یافته است. این امر ناشی از افزایش جریان حرارت همراه با گازهای خنک‌تر و حجم هوای بیشتر است که باعث می‌شود انرژی بیشتری به محیط اطراف و دودکش منتقل شود. در نتیجه، بازده احتراق از 72/67% به 64/22% کاهش یافته و کاهش 11/6% در بازده کلی چرخه‌های حرارتی مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهند که مصرف بیش از حد هوا نه تنها باعث اتلاف انرژی می‌شود بلکه اثر معکوس بر راندمان کوره دارد. از طرف دیگر، درصد هوای کم نیز می‌تواند منجر به احتراق ناقص شود که بازده حرارتی را کاهش می‌دهد. بنابراین، کنترل دقیق نسبت هوای اضافه، با توجه به شرایط عملیاتی و طراحی کوره، برای بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش تلفات حرارتی ضروری است. همچنین، ثابت نگه داشتن مصرف سوخت 1700 کیلوگرم بر ساعت در تمام سناریوها نشان می‌دهد که تغییرات بازده و دما تنها ناشی از نسبت هوای اضافه بوده و سایر پارامترها تحت کنترل بوده‌اند. این تحلیل نشان‌دهنده اهمیت تنظیم دقیق هوای اضافه و بهره‌گیری از ابزارهای کنترل پیشرفته برای افزایش بازده کوره‌های صنعتی است.

**جدول 3- تغییرات هوای اضافه**

هوای اضافه (%)	بازده سوخت (%)	بازده کلی (%)	دمای گاز در قسمت پل <sup>10</sup> (°C)	دمای خروجی گاز دودکش (°C)
1	72/67	72/83	838	221
10	71/11	71/29	828	227
15	70/25	70/44	822	230
20	69/38	69/58	816	233
40	65/93	66/17	795	243
50	64/22	64/47	784	246

#### 4-2 اثر تغییر دبی جریان سوخت

برای آگاهی از میزان تغییرات مصرف سوخت بر اساس هوای اضافه‌بار بر عملکرد سیستم بررسی و نتایج در جدول 4 نشان داده شد. تغییرات دبی جرمی سوخت<sup>1</sup> با افزایش هوای اضافه از 1 به 50 درصد دبی سوخت از 2064 کیلوگرم بر ساعت به 2428 کیلوگرم بر ساعت افزایش یافته است. افزایش 17/6 درصد نشان‌دهنده کاهش بازده احتراق است، زیرا سیستم برای حفظ ظرفیت<sup>2</sup> ثابت نیاز به سوخت بیشتری دارد.

$$LHV = \text{Heat from Combustion} / \text{Fuel Flowrate} \approx 12.36 \text{ kg} / \text{MJ} \quad (3)$$

$$LHV = 25.513 \text{ MW} / 2064 \text{ kg} / \text{h} \times 3600 \approx 44.5 \text{ kg} / \text{MJ} \quad (4)$$

بر اساس رابطه 3 از مقدار ثابت 44/5 کیلوگرم بر مگا ژول به‌ازای هر 1 درصد هوای اضافی محاسبه شده است. این مقدار ثابت نشان‌دهنده آن است که کیفیت سوخت در تمام سطوح مختلف هوای اضافی یکسان باقی می‌ماند و همچنین رابطه خطی بین افزایش هوای اضافی و کاهش ارزش حرارتی سوخت (LHV) برقرار است [22]. تحلیل

<sup>1</sup> Bridgewall gas Temperature

0

<sup>1</sup> Fuel Flowrate

1

<sup>1</sup> Duty

2

داده‌های عملکردی کوره نشان می‌دهد که با افزایش هوای اضافه، بازده کلی کوره کاهش می‌یابد، گرمای حاصل از احتراق افزایش می‌یابد و دمای خروجی گاز دودکش بالا می‌رود. این تغییرات نشان می‌دهند که افزایش هوای اضافه باعث کاهش کارایی احتراق و افزایش مصرف سوخت می‌شود و بنابراین تنظیم دقیق نسبت هوای اضافه و دبی جریان سوخت برای دستیابی به شرایط بهینه عملکرد و کاهش تلفات حرارتی ضروری است.

**جدول 4- نسبت تغییرات سوخت به تغییرات هوای اضافه**

هوای اضافه (%)	ظرفیت کوره (MW)	بازده کل (%)	دبی سوخت (h/kg)	گرمای حاصل از احتراق (MW)	دمای خروجی گاز دودکش (°C)
1	18/433	72/41	2064	25/513	252
15	18/431	69/54	2150	26/575	272
20	18/443	68/48	2185	27/011	279
40	18/448	64/04	2339	28/909	305
50	18/446	61/71	2428	30/007	317

### 3-4 اثر ضخامت عایق

عوامل انتقال حرارت در کوره‌ها، به‌ویژه تلفات حرارتی از دیواره‌های کوره، تأثیر قابل توجهی بر مصرف سوخت دارند. میزان تلفات حرارتی دیواره به پارامترهایی شامل ضریب انتشار سطحی، رسانایی گرمایی عایق و ضخامت دیواره بستگی دارد. تغییرات ضخامت عایق در محدوده مجاز استاندارد (190-120 میلی‌متر) مورد بررسی قرار گرفته است [25]. (نتایج شبیه‌سازی در جدول 5)

**جدول 5- تأثیر ضخامت عایق دیواره محفظه احتراق بر بازده کوره**

ضخامت دیواره محفظه احتراق (mm)	دبی سوخت (h/kg)	ظرفیت کوره (MW)	بازدهی محفظه احتراق (%)	بازده کلی (%)
120	2162	18/432	48/82	69/15
138	2150	18/431	49/17	69/54
170	2132	18/441	49/72	70/15
190	2122	18/441	50/03	70/49

بر اساس نتایج جدول 5، افزایش ضخامت عایق دیرگداز از 120 به 190 میلی‌متر، تنها موجب بهبود 34/1 درصدی (از 15/69% به 49/70%) در بازده کلی کوره شده است. این بهبود ناچیز در بازده، در مقابل هزینه‌های قابل توجه مربوط به تخریب عایق قدیمی، خرید مواد اولیه و اجرای عایق جدید با ضخامت بیشتر، توجیه اقتصادی ندارد. بنابراین، استفاده از راهکار افزایش ضخامت برای عایق‌های دیرگداز ریختنی به عنوان یک استراتژی مقرون‌به‌صرفه بهینه‌سازی توصیه نمی‌شود. با توجه به این نتایج، تمرکز بر جایگزینی جنس عایق با مواد سبک‌تر و با هدایت حرارتی کمتر، مانند پوشش‌های الیاف سرامیکی، اولویت بالاتری دارد. این راهکار می‌تواند بهبود قابل توجه‌تر بازده کوره و کاهش مصرف

سوخت را با هزینه منطقی تر فراهم کند و گزینه‌ای عملی برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی کوره‌های صنعتی محسوب می‌شود.

#### 4-4 اثر ضریب انتشار دیواره

پارامترهای انتقال حرارت تابشی در کوره‌ها، به‌ویژه ضریب انتشار دیواره (ε)، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارند. در این بخش، تأثیر تغییرات ضریب انتشار در محدوده 0/1 تا 0/9 بر پارامترهای عمل کردی کوره شامل دبی سوخت، راندمان کلی، راندمان محفظه احتراق و راندمان احتراق مورد بررسی قرار گرفته است (جدول 6). اساس این تحلیل قانون استفان-بولتزمن رابطه 5 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) است که رابطه بین شار حرارتی تابشی و ضریب انتشار را بیان می‌کند [26]:

$$q = \varepsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

جدول 6- تأثیر تغییرات انتشار نسبت به فاکتورهای مؤثر

ضریب انتشار دیواره	دبی سوخت (kg/h)	بازده کلی (%)	بازدهی محفظه احتراق (%)	بازده سوخت (%)
0/1	1953	76/55	57/36	76/34
0/2	1953	76/55	57/36	76/34
0/3	1952	76/6	57/55	76/4
0/8	1946	76/82	58/23	76/62
0/9	1945	76/86	58/33	76/65

همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود، تغییر ضریب انتشار از 0/1 به 0/9 تأثیر محدودی (کمتر از 0/5 درصد) بر بازده کلی کوره داشته است. این موضوع بیانگر آن است که مدیریت انتقال حرارت تابشی درون محفظه، در مقایسه با سایر پارامترها مانند هوای اضافه یا هدایت حرارتی عایق دیواره‌ها، سهم کمتری در بهبود بازده دارد. بنابراین، برای بهینه‌سازی عملکرد کوره، تمرکز بر کنترل دقیق هوای احتراق و بهبود عایق کاری حرارتی دیواره‌ها از اولویت بالاتری برخوردار است، در حالی که تغییر ضریب انتشار دیواره اثر قابل توجهی بر بازده کلی ندارد.

#### 4-5 اثر تغییر جنس عایق

بهبود انتقال حرارت تابشی از طریق ارتقا ضریب انتشار سطوح داخلی کوره با استفاده از پوشش‌های سرامیکی نانو ساختار (0/9 تا 0/95) می‌تواند تا 28/5 درصد انتقال حرارت تابشی را بهبود بخشد [27]. جدول 7 نتایج شبیه‌سازی کوره 1502 را با عایق حال حاضر یعنی بتن سبک‌وزن<sup>13</sup> و عایق پیشنهادی سرامیکی<sup>14</sup> نشان می‌دهد. افزایش بازدهی کل برآمده از بهبود انتقال حرارت با عایق کاری سرامیکی و کاهش تلفات حرارتی است.

<sup>1</sup> LW Concreat

3

<sup>1</sup> Ceramic Fiber Blanket

4

**جدول 7- نتایج تغییر عایق برای کوره 1502**

پتو الیاف سرامیکی	بتن سبک وزن	کوره H-1502
1995	2150	دبی سوخت (kg/h)
74/73	69/35	بازدهی سوخت (%)
74/3	69/54	بازدهی کلی (%)
56/34	49/17	بازدهی محفظه احتراق (%)
3/67	7/64	تلفات حرارتی دیواره

جایگزینی عایق بتن سبک با پتوهای سرامیکی منجر به کاهش دبی سوخت از 2150 به 1995 کیلوگرم بر ساعت و افزایش بازده سوخت از 69/35% به 74/73% شد. همچنین بازده کلی کوره از 69/54% به 74/3% و بازده محفظه احتراق از 49/17% به 56/34% افزایش یافت. تلفات حرارتی دیواره نیز کاهش یافت که نشان دهنده کاهش اتلاف انرژی و بهبود انتقال حرارت به داخل محفظه است. این بهبودها معادل صرفه جویی 155 کیلوگرم سوخت در ساعت و افزایش 5/4 درصدی بازده کلی کوره می باشد. با توجه به صرفه جویی سالیانه قابل توجه، استفاده از پوشش های الیاف سرامیکی به عنوان جایگزین اقتصادی و عملی برای بهینه سازی عملکرد کوره های صنعتی توصیه می شود.

**4-6- مقایسه نتایج**

نتایج شبیه سازی در نرم افزار Aspen EDR تغییرات ترکیب گازهای دودکش را تحت تأثیر هوای اضافه به خوبی نشان می دهد. همان طور که در جدول 8 مشاهده می شود، با افزایش هوای اضافه از 1 درصد به 50 درصد، کسر جرمی اکسیژن ( $O_2$ ) افزایش 3132 درصدی، کسر جرمی دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) کاهش 34 درصدی و کسر جرمی نیتروژن ( $N_2$ ) کاهش 2/5 درصدی را تجربه می کند. این تغییرات ترکیبی نشان دهنده رقیق شدن گازهای حاصل از احتراق با هوای اضافی است که منجر به کاهش بازده حرارتی کوره می شود.

**جدول 8- تغییرات ترکیبات گاز دودکش نسبت به هوای اضافه (گاز خشک)**

کسر جرمی دی اکسید کربن	کسر جرمی آرگون	کسر جرمی نیتروژن	کسر جرمی اکسیژن	هوای اضافه (درصد)
0/17	0/0134	0/8142	0/0025	1
0/1553	0/0133	0/809	0/0224	10
0/1416	0/0132	0/8043	0/0409	20
0/1205	0/0131	0/7969	0/0695	40
0/1121	0/0131	0/7940	0/0808	50

مقایسه نتایج این مطالعه با یافته های مقاله مرجع Digital Refining [28] نشان دهنده همخوانی قابل توجه است. طبق مقاله مرجع، محدوده بهینه هوای اضافه 10 تا 20 درصد پیشنهاد شده است. نتایج شبیه سازی این پژوهش نشان می دهد که در 15% هوای اضافه، بازده کلی کوره تنها 3% کمتر از حالت بهینه (54/69%)، درصد اکسیژن گاز خروجی 2/84% و دی اکسید کربن 13/11% است که در محدوده سالم قرار دارند. همچنین، مقاله مرجع هشدار داده است که هوای اضافه بیش از 25% می تواند منجر به افزایش اکسیژن خروجی به بیش از 5%، کاهش بیش از 30% دی اکسید کربن و افت بازده بیش از 7% شود. این اثرات در داده های این پژوهش در 50% هوای اضافه نیز مشاهده شد؛ به طوری که اکسیژن خروجی 35/7%، کاهش دی اکسید کربن 31/2% و افت بازده 10/7% ثبت گردید. از سوی

دیگر، کاهش 6/95 درجه‌ای نقطه شبنم (از 67/62 به 55/72 درجه سانتی‌گراد) با افزایش هوای اضافه، با مکانیسم کاهش خطر میعان در هوای اضافی بالا که در مقاله مرجع توضیح داده شده است، همسو است. علاوه بر این، نسبت  $O_2/CO_2$  به عنوان شاخص کیفیت احتراق، در هوای اضافه 15% مقدار 0/22 و در هوای اضافه 50% مقدار 0/72 محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت بالای اندازه‌گیری‌ها و صحت شبیه‌سازی‌ها است.

#### جدول 9- تغییرات ترکیبات گاز دودکش نسبت به هوای اضافه (گاز خشک)

پارامتر	شیب	داده‌های نرم‌افزار EDR (درصد)	داده‌های اروین پلاتووت <sup>1</sup> (درصد)	سطح تطابق (درصد)
$CO_2$	کاهشی	از 14/8 به 10/2	از 12 به 6	75
$H_2O$	کاهشی	از 12/9 به 9/1	از 16 به 8	-
$O_2$	افزایشی	از 0/2 به 7/35	از 2 به 18	50
$O_2/CO_2$		0/05 → 0/72	0/17 → 3	کیفی (روند مشابه)

#### 7-4- بهینه‌سازی

پیاده‌سازی سیستم کنترل حلقه بسته برای تنظیم خودکار دمپرها بر اساس آنالیز پیوسته گازهای خروجی و یکپارچه‌سازی با سیستم DCS موجود، امکان کنترل بهینه شرایط احتراق را فراهم می‌آورد [22]. این مطالعه با هدف تحلیل تأثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد کوره H-1502 انجام شد. داده‌های عملیاتی شامل سه پارامتر ورودی اصلی (درصد اکسیژن، درصد مکش و نرخ جریان خوراک) و چهار پارامتر خروجی (دبی گاز سوختی، نرخ تولید بخار، درصد بهره‌وری و دمای عملیاتی) جمع‌آوری و ساختاردهی شدند. تحلیل با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره نشان داد که افزایش درصد اکسیژن موجب افزایش مصرف سوخت و کاهش تولید بخار می‌شود، در حالی که افزایش مکش تأثیر مثبت همزمان بر تولید بخار و بازدهی دارد. دبی خوراک بیشترین اثر را بر تولید بخار نشان داد.

#### 8-4 نتایج اجرای مدل بهینه‌سازی در شرایط عملیاتی

بهینه‌سازی با استفاده از کتابخانه‌های Python شامل Pandas، NumPy و Scikit-learn پیاده‌سازی شد و خطای آن‌ها ( $MSE=4/6332$ ) در محدوده قابل قبول برای سیستم‌های صنعتی قرار داشت. برای یافتن مقادیر بهینه، الگوریتم ژنتیک با پارامترهای مشخص به کار گرفته شد و نتایج نشان داد که مقادیر بهینه شامل درصد اکسیژن 5/84 درصد، میزان باز بودن دمپر 60% و دبی خوراک 450 مترمکعب بر ساعت است. این ترکیب پارامترها منجر به کاهش 18% مصرف سوخت، افزایش 1/7% بازدهی و بهبود پایداری حرارتی سیستم گردید و دقت پیش‌بینی‌های مدل در شرایط عملیاتی تأیید شد. در تاریخ 5 شهریور 1403 ساعت 19:39، مقادیر بهینه‌شده حاصل از مدل رگرسیون با دمای محیط 31/86 درجه سانتی‌گراد و دبی خوراک 450 مترمکعب بر ساعت به سیستم اعمال شد. طی بازه زمانی 1 ساعت و 47 دقیقه پس از اجرا، تغییرات قابل توجهی مشاهده گردید: بازدهی کوره از 83 درصد به 84/5 درصد افزایش یافت که بالاترین مقدار ثبت‌شده در این دوره بود، مصرف سوخت به  $1158 \text{ Nm}^3/\text{h}$  کاهش یافت که معادل بهبود  $20 \text{ Nm}^3/\text{h}$  نسبت به شرایط قبلی بود و در بخش تولید، افزایش حدود 1700 کیلوگرم بر ساعت در تولید بخار مشاهده شد که مقدار نهایی به 120600 کیلوگرم بر ساعت رسید.

<sup>1</sup> Platvoet

از نظر پارامترهای حرارتی، بیشترین دمای ثبت شده در محفظه احتراق  $621^{\circ}\text{C}$  و در پوسته لوله‌های کوره  $390/6$  بود، دمای گازهای خروجی از دودکش به  $270/6^{\circ}\text{C}$  کاهش یافت و مقدار مکش به  $0/998$  میلی‌بار رسید. با توجه به کاهش دمای محیط به  $27/85^{\circ}\text{C}$  در ساعت  $21:26$ ، اندازه‌گیری‌ها متوقف شد، زیرا تغییرات بیش از 5% در بازدهی کوره نشان‌دهنده حساسیت سیستم به شرایط محیطی بود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی کوره H-1502 می‌تواند منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد سیستم گردد. یافته‌های کلیدی حاکی از آن است که مطالعه حاضر با رویکردی نوآورانه، تلفیق سیستم‌های شبیه‌سازی مهندسی (Aspen EDR) و تحلیل داده‌های عملیاتی (DCS) را برای بهینه‌سازی کوره H-1502 ارائه می‌دهد. در مرحله اول، آنالیز حساسیت پارامترهای کلیدی نشان داد که کاهش هوای اضافی از 50 به 15 درصد موجب کاهش  $17/6$  درصدی مصرف سوخت، از  $2428$  به  $2064$  کیلوگرم بر ساعت، و کاهش دمای گازهای خروجی از  $317$  به  $272$  درجه سانتی‌گراد می‌شود. در گام دوم، ارزیابی سیستم عایق‌کاری نشان داد که جایگزینی عایق‌های سنتی با پوشش سرامیکی نانو ساختار به ضخامت  $100$  میلی‌متر و ضریب انتشار  $0/9$  موجب کاهش  $48$  درصدی تلفات حرارتی دیواره‌ها، کاهش دمای سطح خارجی به میزان  $39$  درصد و صرفه‌جویی سالانه حدود  $1350$  تن سوخت می‌شود. نوآوری اصلی پژوهش در بخش بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک است که با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی، نقطه کار بهینه را برای دبی خوراک  $450$  مترمکعب بر ساعت شناسایی کرد: غلظت اکسیژن  $5/84$  درصد  $\pm 0/2$  درصد و وضعیت دمپر  $60$  درصد  $\pm 5$  درصد. مقایسه با مطالعات مشابه برمن<sup>16</sup> سال 2019 [29] نشان می‌دهد که این روش حدود 15 درصد دقیق‌تر از مدل‌های مرسوم است. همچنین، سیستم پیشنهادی قابلیت یکپارچه‌سازی با سیستم‌های کنترلی موجود را دارد که مزیت عملیاتی مهمی محسوب می‌شود. این یافته‌ها از دو جنبه نوآورانه هستند: اول، تلفیق سه روش شبیه‌سازی، تحلیل داده و بهینه‌سازی هوشمند در یک مطالعه کاربردی و دوم ارائه راهکارهای عملی و قابل پیاده‌سازی برای بهبود بهره‌وری انرژی کوره‌های صنعتی. نتایج این مطالعه برای کوره‌های با طراحی مشابه، مانند واحدهای RFCC معتبر است، اما برای کوره‌های با سوخت‌های متفاوت (مثلاً مازوت یا زیست‌توده) ممکن است نیاز به اصلاح پارامترها وجود داشته باشد. اگرچه هزینه اولیه اجرای این طرح‌ها قابل توجه است (40-35 درصد بیشتر از سیستم‌های متعارف)، دوره بازگشت سرمایه در محدوده 18 تا 22 ماه پیش‌بینی می‌شود. مزایای جانبی شامل افزایش 25-30 درصدی عمر مفید تجهیزات و کاهش 15 درصدی هزینه‌های تعمیر و نگهداری است. توصیه می‌شود پیش از اجرای کامل طرح، یک فاز آزمایشی بر 15-20 درصد از سطح کوره به مدت 6-8 هفته انجام شود و در طول این مدت، پارامترهای کلیدی با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز (با دقت  $\pm 2$  درجه سانتی‌گراد) پایش گردد.

## 5- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی و بهینه‌سازی عملکرد کوره H-1502 واحد RFCC پالایشگاه امام خمینی شازند پرداخته و با استفاده از تلفیق شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Aspen EDR، تحلیل داده‌های عملیاتی سیستم کنترل توزیع شده (DCS) و بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک، راهکارهای عملی و قابل اجرا برای بهبود بهره‌وری انرژی ارائه داده است. یافته‌های کلیدی عبارتند از:

<sup>1</sup> Borman

- کاهش هوای اضافی از 50% به 15% باعث کاهش 17/6% در مصرف سوخت و کاهش دمای گازهای خروجی از 317 به 272 درجه سانتی گراد شد.
- جایگزینی عایق سنتی با پوشش سرامیکی نانو ساختار (ضخامت 100 میلی متر،  $\varepsilon = 0/9$ ) موجب کاهش تلفات حرارتی دیواره‌ها، کاهش دمای سطح خارجی به میزان 39% و صرفه‌جویی سالانه حدود 1350 تن سوخت شد.
- بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک نقطه کار بهینه با دبی خوراک 450 مترمکعب بر ساعت، غلظت اکسیژن 5/84% و میزان باز بودن دمپر 60% را تعیین کرد که منجر به کاهش 18% مصرف سوخت و افزایش 1/7 درصدی بازدهی گردید.
- پیاده‌سازی مدل بهینه در شرایط عملیاتی واقعی، افزایش بازدهی کوره، کاهش مصرف سوخت و افزایش تولید بخار را تأیید کرد.

این مطالعه نوآوری خود را در ترکیب شبیه‌سازی مهندسی، تحلیل داده‌های عملیاتی و بهینه‌سازی هوشمند نشان می‌دهد و قابلیت یکپارچه‌سازی با سیستم‌های کنترلی موجود را دارد. محدودیت‌های پژوهش شامل امکان تعمیم نتایج به کوره‌های با سوخت متفاوت و نیاز به ارزیابی اقتصادی اولیه است. با توجه به یافته‌ها، اجرای یک فاز آزمایشی بر 15-20 درصد سطح کوره به مدت 6-8 هفته با پایش دقیق پارامترهای کلیدی توصیه می‌شود تا پیش از اجرای کامل، اثرات بهینه‌سازی بر عملکرد سیستم تأیید گردد.

در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی و ارتقای سیستم عایق کاری می‌تواند به طور قابل توجهی مصرف سوخت را کاهش داده و بازده حرارتی کوره‌های صنعتی را بهبود بخشد.

## 6- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از جناب آقایان دکتر بابک عیدی، مهندس جواد مؤمنی و سرکار خانم دکتر هلاکویی، مدیریت و پرسنل محترم شرکت پالایش نفت امام خمینی (ره) اعلام می‌دارند.

## 7- فهرست علائم

علائم یونانی	علائم انگلیسی
$\rho$ چگالی، $\text{kg/m}^3$	$LHV$ ارزش حرارتی پایین سوخت، $\text{kJ/kg}$
$\lambda$ نسبت هوای اضافه	$m$ دبی، $\text{kg/h}$
$\varepsilon$ ضریب انتشار سطحی (بین 0 تا 1)	$Q$ گرمای سیستم
$\rho$ چگالی، $\text{kg/m}^3$	$T$ دما، $C$ و $K$
$\lambda$ نسبت هوای اضافه	$t$ زمان، $s$
	$W$ توان، $w$

## 8- منابع

- [1] EPA Method 19: Determination of Sulfur Dioxide Removal Efficiency and Particulate Matter, Sulfur Dioxide and Nitrogen Oxide Emission Rates, U. S. E. P. A. (EPA), 2020.  
 [2] I. E. Agency, "Refinery of the Future: Energy efficiency and emissions reduction," 2021.

- [3] M. Mubashir, D. Shen, H. Kraiem, A. Flah, N. F. Alshammari, and M. M. Hanif, "Machine learning assisted CFD optimization of fuel-staging natural gas burners for enhanced combustion efficiency and reduced NOx emissions," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, pp. 23547, 2025.
- [4] E. M. Foundation. "Circular economy in energy systems."
- [5] D. o. Energy, "Energy Optimization in Refineries," U.S. Department of Energy, 2023.
- [6] I. R. o. I. Ministry of Oil, "Comprehensive report on replacing the naphtha purification reboiler refractory and the hydrogenation kerosene purification preheater during major repairs," Shiraz Oil Refining, Shiraz, 2017.
- [7] L. Xinfang, "Inquire into stack heat loss and setting heat losses of fired heater.," *Petroleum Refinery Engineering*, vol. 54, no. 4, pp. 16-19, 2024.
- [8] J. Zhang, X. Zhang, L. Wang, J. Zhang, R. Liu, Q. Sun, X. Ye, and X. Ma, "Fabrication and applications of ceramic-based nanofiber materials service in high-temperature harsh conditions—A review," *Gels*, vol. 9, no. 3, pp. 208, 2023.
- [9] R. Waibel, D. Price, P. Tish, and M. Halprin, "Advanced burner technology for stringent NOx regulations," in *American Petroleum Institute Midyear Refining Joint Meeting of the Subcommittee on Heat Transfer Equipment, Orlando, Florida*, 1990.
- [10] X. Wang, "Advanced thermal insulation materials for industrial applications," *Applied Energy*, vol. 330, 2023, Art no. 120345.
- [11] M. Fattahi, S. Ebrahimi, M. Rahimi, M. Gonbadi, S. H. Hosseini, and G. Ahmadi, "Analyzing Burner Performance and Combustion Phenomenon in an Olefin Plant's Industrial Furnace: A CFD Study," *ACS omega*, vol. 9, no. 12, pp. 14500-14519, 2024.
- [12] M. Johnson, *Refinery Operations Handbook*. Amsterdam: Elsevier, 2024.
- [13] A. A. K. Esrin Ghanbarian, Ali Akbar Pourfateh, Vahid Jalalavandi., "Numerical simulation of combustion in a fired heater and providing a solution to reduce the flue gases temperature," *Fuel and Combustion*, vol. 16, no. 3, pp. 85-94, 2024.
- [14] S. Kumar, "Multi-objective optimization of combustion parameters in refinery furnaces," *Fuel Processing Technology*, vol. 253, Art no. 108022, 2024.
- [15] W. L. Chen, H., "Real-time monitoring system for industrial furnace performance," *Journal of Process Control*, vol. 115, pp. 103-114, 2023.
- [16] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [17] *API Standard 560: Fired Heaters for General Refinery Service*, A. P. I. (API), 2021 (5th Edition).
- [18] LINDE, *VENDOR DATA BOOK H-1502 Shazand Arak Refinery*. Roma: LINDE IMPIANTI ITALIA, 2010.
- [19] *API Standard 560: Fired Heaters for General Refinery Service*, A. P. I. (API), 2021 (5th Edition).
- [20] *Fired Heaters for General Refinery Service*, A. S. 560, Washington, DC, July 2016.
- [21] *API 560: Fired Heaters for General Refinery Service*, 2016 (4th Edition).
- [22] S. R. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill, 2012.
- [23] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1988.
- [24] C. E. Baukal, "The John Zink Hamworthy Combustion Handbook," vol. 3, 2013.
- [25] *ISO 13705: Petroleum and natural gas industries - Fired heaters for general refinery service*, I. O. f. Standardization, 2012.
- [26] T. L. B. Frank P. Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 2002.
- [27] M. F. Modest, "Radiative Heat Transfer ", r. ed.), Ed., 2013. [Online].
- [28] E. PLATVOET, "When excess air becomes too much," *XRG Technologies*, Jul-2020.
- [29] G. L. Borman, *Combustion Engineering*. 2019.