



Numerical Study of the Flat Flame Burner Power Effect on the Producing Uniform Temperature Distribution in Cracking Furnaces

M. Mirbagheri¹, K. Mazaheri^{1*}, E. Ebrahimi Fordoei¹, A. Alipoor²

¹Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

²Mechanical Engineering Department, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

ABSTRACT: In the present study, with the help of numerical study, the study of the uniform heat flux formation on process tubes as the main parameter in cracking furnaces has been investigated using flat flame burners with different thermal powers. Due to the lack of experimental data for solver validation, two problems of swirl burner and channel with conjugate heat transfer of combustion gases and solid surface have been used. To carry out simulations, the chtMultiRegionReactingFoam solver in OpenFOAM software has been developed by adding the conjugate heat transfer capability to the reactingFoam solver. In simulations, k- ω shear stress transport turbulence model has been used for turbulence modeling. The results of the simulations show that the use of a flat flame burner in cracking furnaces allows for the uniform temperature distribution in the furnace with the low maximum combustion temperature. Also, to create the appropriate heat flux around the pipes so that the proper temperature distribution for cracking reactions is provided, the minimum heat flux of the flat flame burners is required, which in less than that, the appropriate temperature distribution does not occur on the pipes.

Review History:

Received: 10 Feb. 2018

Revised: 23 May 2018

Accepted: 24 Jun. 2018

Available Online: 3 Jul. 2018

Keywords:

Cracking furnace

Flat flame burner

Benchmark problem

Heat flux

Combustion simulation.

1- Introduction

The use of combustion furnaces for the production of olefin is widely used in the petrochemical industry. The furnace consists of a radiation section (firebox), convection section and Transfer Line Exchangers (TLE). The growing demand for olefin products, saving energy and control of emissions of pollutants is a strong incentive for further researches in the field of olefin producing technologies. In accordance with existing rules for reducing pollution, Gasser Hassan [1] developed a three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) model to simulate the turbulent diffusion flame on the fire-side of the radiation section of a thermal cracking test furnace coupled with a non-premixed low NO_x floor burner. Different combustion models are used to simulate the turbulence-chemistry interactions for this flame.

One of the primary challenges in cracking furnaces is non uniform temperature distribution in firebox and producing hot spots on reactor tubes and increasing coke formation rate. Flat

flame burner has a high ability to create a uniform temperature distribution in combustion chamber and in present study have been simulated a section of firebox equipped with flat flame burners to optimize furnace operation.

2- Geometry and Boundary Condition of Benchmarks and Cracking Furnace

Due to the lack of experimental results for the flat flame burners for solver validation, appropriate benchmark problems with experiment results have been used. In first a swirl burner [2] has been studied that is turbulence, non-premixed and with axial and tangential flame. Then for investigating conjugate heat transfer, a flow through the laboratory channel [3] has been choose and finally the cracking furnace was simulated. A schematic of the swirl burner used in this study is shown in Fig. 1.

The geometry of the burner is given in Table 1.

Velocity boundary condition in fuel and primary air follow equation 1 that different values for n , δ and \bar{U} are presented in

Table 1. Burner dimensions

parameter	Dimension (mm)	parameter	Dimension (mm)
D_1	3.6	D_4	65
D_2	50	D_5	160.4
D_3	60		

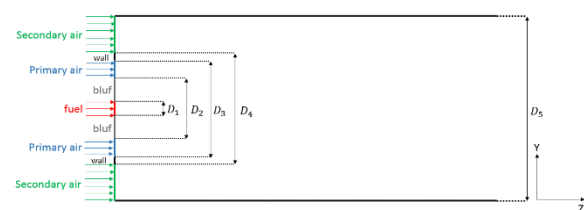


Fig. 1. Schematic of swirl burner

*Corresponding author's email: kiumars@modares.ac.ir



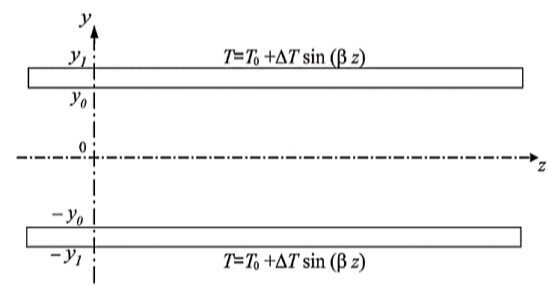


Fig. 2. Schematic of channel

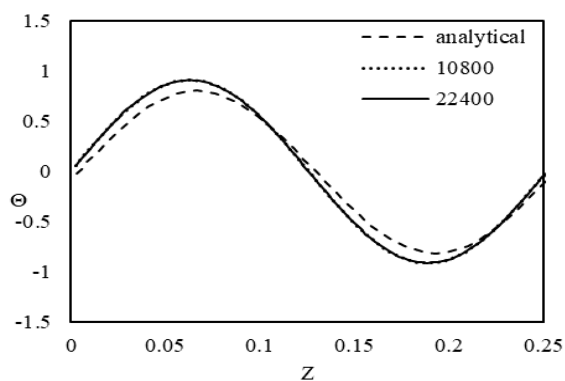


Fig. 5. Comparison numerical and analytical data

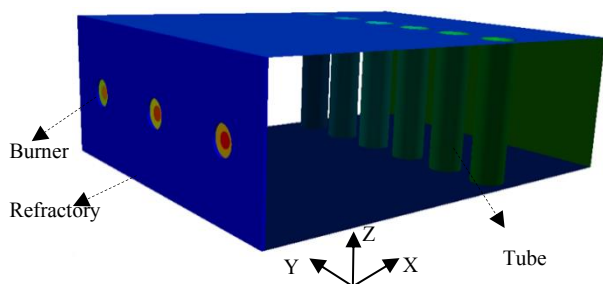


Fig. 3. Schematic of cracking furnace

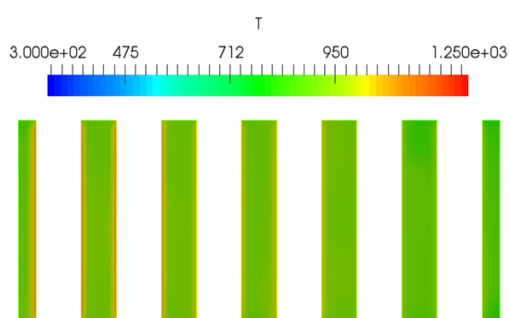


Fig. 6. Temperature distribution around the reactor tubes

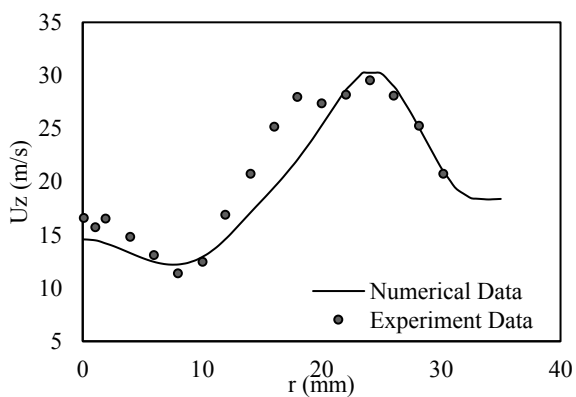


Fig. 4. Comparison numerical and experiment data

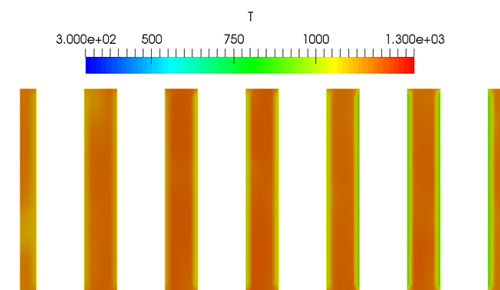


Fig. 7. Temperature distribution around the reactor tubes after increase burner power

Table 2 . Furnace dimensions

parameter	dimension (m)	parameter	dimension (m)
Height(z)	0.5	Tubes length	0.5
Length(x)	1.5	Diameter of tubes	0.12
Width(y)	1.2		

Table 3 . Burner boundary condition

Velocity (m/s)	burner		power burner	
	Fuel inlet	Air inlet	Fuel inlet	Air inlet
Axial	5	10	8	20
Tangential	2	4	4	8
Radial	5	20	20	30

the reference [4].

$$U = 1.218\bar{U}\left(1 - \frac{|y|}{\delta}\right)^n \quad (1)$$

Schematic of simulated laboratory channel for validating conjugate heat transfer is shown in fig. 2. Channel input is presented in reference [5].

$$U_y = \frac{3U_0}{2}\left(1 - \left(\frac{y}{y_0}\right)^2\right) \quad (2)$$

Firebox of simulated cracking furnace is shown in Fig. 3. The dimensions of this furnace are described in detail in Table 2. Three flat flame burners at a distance of 0.4 (m) located on the walls of furnace refractory.

3- Governing Equations and Numerical Solution

The governing equations include mass, momentum, energy and species conservation. Present simulation done with reactingFoam solver in OpenFOAM software.

4- Results and Discussion

For swirl burner, the numerical results are compared with the experimental data at the ($z=60$ mm) section, as shown

In channel, to validate the results, the non-dimensional number θ defined in Eq. (3) is compared with the analytical results in the intersection ($y=20$ mm). As shown in Fig. 5, good agreement between analytical and numerical results is obtained

The results obtained from the simulation of the cracking furnace show uniformity of the temperature around the reactor tubes in Fig. 6, whereby temperatures 950 (K) around the tubes are observed. While ideal value for most cracking furnaces, it should be about 1200 to 1300 (K).

Average temperature was lower of average temperature in the optimal operation of the furnace. So with increasing fuel flow, the heat power of the burners increased. Table 3 shows boundary condition after increase power burner. In Fig. 7, the distribution of temperature around the tube after the increase in the power of the burners is presented that shows the uniformity and ideal of the temperature around all reactor tubes.

5- Conclusions

In order to simulate the cracking furnace, swirl flame and conjugate heat transfer phenomena have been studied, the results are compared in both issues with experiment data and there was a good match. Then the numerical simulation of cracking furnace was done. According to the results, the temperature uniformity of the reactor tubes was obtained first, but the challenge caused by the low temperature in comparison with the ideal temperature in the cracking furnace, which was followed by increasing the momentum at the burners.

References

- [1] G. Hassan, M. Pourkashanian, D. Ingham, L. Ma, P. Newman, A. Odedra, Predictions of CO and NO x emissions from steam cracking furnaces using GRI2. 11 detailed reaction mechanism—A CFD investigation, *Computers & Chemical Engineering*, 58 (2013) 68-83.
- [2] E.J.F. Flame, Flame interaction and rollover solutions in ethylene cracking furnaces, *Gas*, (2013) 1.
- [3] A. Masri, S. Pope, B. Dally, Probability density function computations of a strongly swirling nonpremixed flame stabilized on a new burner, *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(1) (2000) 123-131.
- [4] A. Barletta, E.R. di Schio, G. Comini, P. D'Agaro, Conjugate forced convection heat transfer in a plane channel: Longitudinally periodic regime, *International Journal of Thermal Sciences*, 47(1) (2008) 43-51.



مطالعه عددی تاثیر توان مشعل شعله تخت بر ایجاد توزیع دمای یکنواخت در کوره‌های کراکینگ

مهران میرباقری^۱، کیومرث مظاهری^{۱*}، اسماعیل ابراهیمی فردویی^۱، علی‌رضا علی‌پور^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۱

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۰۲

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۴/۱۲

کلمات کلیدی:

کوره کراکینگ

مشعل شعله مسطح

مسئله معیار

شار حرارتی

شبیه‌سازی احتراق

خلاصه: در مطالعه حاضر با کمک مطالعه عددی به بررسی ایجاد توزیع دمای یکنواخت بر روی لوله‌های فرآیندی به عنوان پارامتر اصلی در کوره‌های کراکینگ با استفاده از مشعل‌های شعله تخت با توان‌های حرارتی مختلف پرداخته شده است. با توجه به فقدان داده‌های تجربی جهت انجام اعتبارسنجی حلگر از دو مسئله معیار مشعل چرخشی و کانال با انتقال حرارت همزمان میان گازهای داغ احتراقی و سطح جامد استفاده شده است. جهت انجام بررسی‌ها با حلگر احتراقی ReactingFOAM، با افزودن قابلیت انتقال حرارت همزمان، به حلگر chtMultiRegionReactingFOAM ارتقا پیدا کرده و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از آن در نرم‌افزار این فوم انجام شده است. همچنین در شبیه‌سازی‌ها از مدل توربولانسی k- ω SST جهت مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان دهنده آن است که استفاده از مشعل شعله تخت در کوره‌های کراکینگ امکان ایجاد توزیع حرارت یکنواخت درون کوره با بیشینه دمای احتراقی پایین را فراهم می‌نماید. همچنین جهت ایجاد شار حرارتی مناسب در اطراف لوله‌ها به گونه‌ای که توزیع دمای مناسب جهت انجام واکنش‌های کراکینگ فراهم آید به حداقل توانی از مشعل‌های شعله تخت نیاز است که در مقادیر کمتر از آن توزیع دمای مناسب بر روی لوله‌ها ایجاد نمی‌شود.

۱- مقدمه

کراکینگ را ایجاد می‌کند؛ از طرف دیگر کوره‌های کراکینگ دارای ابعاد نسبتاً بزرگ و قسمت‌های مختلفی از جمله مشعل‌ها، کویل‌های تابشی، قسمت تشعشی و محافظ بخش جابجایی کوره بوده که مطالعه تجربی و آزمایشگاهی آن‌ها بسیار دشوار است. اندازه‌گیری پارامترهایی مانند دما و سرعت جریان داخل کوره بسیار سخت بوده و در صورت امکان اندازه‌گیری، با توجه به دشواری‌های موجود، دقت اندازه‌گیری‌ها پایین می‌باشد. همچنین آزمایش مشعل‌های جدید و یا بررسی شرایط جدید برای عملیاتی کردن کوره بسیار هزینه‌بر بوده و صرفه اقتصادی ندارند. بنابراین شبیه‌سازی عددی آن‌ها در طول تاریخ بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲]. هیندریکس [۳] به شبیه‌سازی مدل سه بعدی کوره کراکینگ نفتا پرداخته و میدان سرعت و شار حرارتی ایجاد شده توسط مشعل‌های شعله بلند در کوره را بدست آورد. سپس شار حرارتی منتقل شده به لوله‌های راکتور و در نهایت کیفیت انجام واکنش کراکینگ حرارتی داخل راکتور را بررسی نمود. او با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی توربولانس از مدل k- ϵ استاندارد استفاده نمود و سوخت مصرفی کوره ترکیب گاز طبیعی و

استفاده از کوره‌های احتراقی جهت تولید محصولات الفینی کاربرد فراوانی در صنایع پتروشیمی دارد. در این کوره‌ها از سه بخش جابجایی، تشعشی و خطوط انتقال مبدل به منظور انجام انتقال حرارت استفاده می‌شود. بخش تشعشی یا محفظه‌ی احتراق کوره محل انجام فرآیندهای مهمی همچون احتراق و کراکینگ سیال عامل می‌باشد. مکانیزم غالب انتقال حرارت در این بخش تشعشع بوسیله جریان گازهای داغ حاصل از احتراق و دیواره‌های کوره به لوله‌های راکتوری است که در مرکز محفظه احتراق معلق می‌باشند و این شار حرارتی باعث گرم شدن لوله‌های راکتور می‌شود. گرمایش لوله‌های راکتور منجر به آغاز فرآیند کراکینگ درون کوره‌ها شده و در نهایت منجر به تولید محصول مورد نظر می‌شود [۱].

افزایش تقاضای محصولات الفینی و بهبود کیفیت آن‌ها، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و همچنین کنترل انتشار آلاینده‌ها به منظور بهبود کارایی کوره‌ها، عواملی هستند که همواره نیاز به مطالعه و تحقیق روی کوره‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Kiumars@modares.ac.ir



مورد توجه قرار گرفته است. حسن قاصر [۶] به بررسی و پیش‌بینی مقدار آلاینده‌های ناکس و کربن مونوکسید تولید شده در کوره کراکینگ پرداخت. برای شبیه‌سازی این کوره از مشعل‌های ناکس پایین استفاده شده است که احتراق آن غیرپیش‌آمیخته و توان حرارتی آن‌ها ۶ مگاوات بوده است. با توجه به ماهیت توربولانسی جریان، مدل $k-\epsilon$ realizable و برای در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی مدل جهات گسسته اعمال شد. او برای مدل کردن احتراق از روش‌های مختلفی برای مقایسه استفاده کرد. این مدل‌ها عبارتند از: مدل تعادلی تابع چگالی احتمال^۶، مدل فلیملت پایا^۷، مدل فلیملت ناپایا^۸ و مدل مفهوم اتلاف گردابه‌ای^۹. او برای این کار از مکانیزم تفصیلی ۲/۱۱ موسسه تحقیقات گاز^{۱۰} شامل ۲۷۷ واکنش و ۴۹ گونه استفاده کرد. او در کار خود نشان داد که مدل مفهوم اتلاف گردابه‌ای نسبت به سایر مدل‌های بکار برده شده، مدل دقیق‌تری برای پیش‌بینی بیشینه دما و آلاینده‌ها در خروجی کوره کراکینگ است. همچنین مدل‌های فلیملت به دلیل صرف‌نظر کردن از اثر اتلاف حرارتی گونه‌ها، در محاسبه مقدار حرارت آزاد شده حاصل از احتراق ضعیف بوده و معمولاً مقدار آن را بیشتر پیش‌بینی می‌کند. پیلوا [۷] در سال ۲۰۱۶ به شبیه‌سازی محفظه احتراق یک کوره کراکینگ نفتا در مقیاس صنعتی پرداخت. او در این کار با توجه به هندسه تکرارشونده در این کوره‌ها، با استفاده از شرط مرزی تناوبی، توانست با شبیه‌سازی ۱/۲ متر از طول ۱۲ متری کوره، نتایج را به کل کوره تعمیم دهد. همچنین او جزئیات فرآیند شیمیایی درون رآکتور را نیز ساده‌سازی و به جای آن یک شرط مرزی دمایی اعمال نمود. او برای شبیه‌سازی از دو مشعل شعله بلند در کف کوره استفاده نمود و پس از بدست آوردن نتایج اولیه و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی، به منظور بهبود توزیع دمایی داخل کوره، بررسی پارامتری را برای آن انجام داد. او ابتدا با افزایش مومنتوم ورودی مشعل‌ها، دمای متوسط کوره را به حالت ایده‌آل نزدیک کرد و همچنین تاثیر بازچرخش گازهای دودکش را نیز بررسی نمود و نتیجه گرفت که این اقدام در یکنواخت‌سازی دمای داخل محفظه احتراق که امری مطلوب است موثر می‌باشد.

توزیع دمایی غیر یکنواخت داخل کوره و اطراف لوله‌های رآکتور و ایجاد نقاط داغ موضعی روی لوله‌های رآکتور یکی از معضله‌های اساسی در کوره‌های کراکینگ است که منجر به تشکیل کک می‌شود. کک از انجام واکنش‌های ثانویه کراکینگ تولید شده و افت فشار داخل لوله، کاهش

هیدروژن بود که برای احتراق آن از مکانیزم دو مرحله‌ای وستبروک-درایر و برای مدل‌سازی برهمکنش احتراق و آشفستگی از مدل ای‌بی‌یو^۱ استفاده کرد. او در نتیجه علاوه بر شبیه‌سازی جفت شده‌ی کوره به همراه رآکتور، توانست پروفیل دمایی داخل کوره و اطراف لوله‌های رآکتور، بازده حرارتی کوره، دمای سیال خروجی از رآکتور و همچنین نرخ تولید تشکیل کک را بدست آورد. لن و همکارانش [۴] با در نظر گرفتن فرآیندهای واکنشی و انتقالی پیچیده‌ای که در کوره‌ی کراکینگ رخ می‌دهد، یک مدل جامع عددی را با استفاده از دینامک سیالات محاسباتی بر اساس معادلات انتقال هیدرودینامیک توسعه دادند. مطالعه‌ی پارامتری آن‌ها بررسی کمی تاثیر قطر و فاصله بین لوله‌های رآکتور در عملکرد کوره‌های کراکینگ می‌باشد. برای مدل‌سازی جریان مغشوش از مدل $k-\epsilon$ استاندارد و برای انتقال حرارت تشعشی از مدل دی‌اوام^۲ استفاده نمودند. همچنین برای احتراق توربولانسی، از مدل تابع چگالی احتمال جهت کاهش زمان محاسبات استفاده کردند. آن‌ها با تغییر قطر لوله‌ها و فاصله بین آن‌ها دریافت که با افزایش این فاصله، اثر سایه^۳ کاهش و همچنین افزایش قطر لوله با ثابت ماندن فاصله بین لوله‌ها، شار حرارتی اطراف لوله را کاهش می‌دهد.

ون گیم و همکارانش [۵] کوره کراکینگ نفتا را جهت تعیین بازده تولید محصولات الفینی و نرخ تولید کک در لوله‌های رآکتور شبیه‌سازی نمودند. مشعل‌های شعله بلند در کف کوره و مشعل‌های تشعشی روی دیواره کوره، وظیفه تامین شار حرارتی مورد نیاز در این کوره را به عهده داشتند. برای شبیه‌سازی فرآیند کراکینگ نفتا در رآکتور از مدل سینتیک کومار^۴ شامل ۲۲ واکنش و ۱۸ گونه شیمیایی استفاده شد. در این کار برای مدل کردن جریان اغتشاشی از $k-\epsilon$ استاندارد و جهت در نظر گرفتن اثرات متقابل شیمی توربولانس از مدل نرخ محدود اتلاف گردابه‌ای^۵ استفاده شد. شبیه‌سازی این نوع از کوره‌ها برای اولین بار انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که گرادیان دمایی و غلظت گونه‌ها در رآکتور هم ناشی از نوع طراحی رآکتور و هم شار حرارتی است که از مشعل‌های نصب شده روی دیوار به سمت رآکتور ساطع می‌شود و استفاده ترکیبی از مشعل‌ها در کف و روی دیوار کوره باعث افزایش نرخ تولید کک در وسط رآکتور و در انتهای آن می‌شود.

با توجه به قوانین موجود برای کاهش نرخ آلاینده‌گی در کوره‌های پتروشیمی دستیابی به احتراق با بازدهی بالا و تولید آلاینده ناچیز بسیار

6 Probability Density Function (PDF)
7 Steady Flamelet Model
8 Unsteady Flamelet Model
9 Eddy Dissipation Concept Model
10 Gas Research Institute (GRI)

1 Eddy Break-Up (EBU) Model
2 Discrete Ordinates Model (DOM)
3 Shadow Effect
4 Kumar Chemical Kinetics Model
5 Finite Rate/Eddy Dissipation

اصلی پرداخته شده است. مطالعه عددی هر یک از مسئله‌های اشاره شده با نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم انجام شده است. برای حل عددی این مسئله‌ها از حلگر احتراقی reactingFoam استفاده شده است و برای در نظر گرفتن انتقال حرارت توامان در جریان احتراقی، حلگر احتراقی reactingFoam به حلگر chtMultiRegionReactingFoam که قادر به حل عددی چند ناحیه واکنشی توربولانسی و جامد به طور همزمان می‌باشد، توسعه داده شده است.

۳- هندسه و شرایط مرزی مسائل معیار و کوره کراکینگ

در ابتدا هندسه حاکم بر دو مسئله معیار شامل مشعل چرخشی و کانال تحت شرایط انتقال حرارت توامان میان جسم جامد و گازهای حاصل از احتراق توضیح داده شده است. سپس به بیان هندسه کوره کراکینگ همراه با مشعل‌های شعله تخت نصب شده بر روی آن و شرایط مرزی حاکم بر آن پرداخته شده است.

۳-۱- هندسه و شرایط مرزی مشعل چرخشی

هندسه مشعل چرخشی که در سال ۲۰۰۰ توسط دالی و همکارانش [۱۲] تست شد، در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱ مشعل از چند لوله متحدالمرکز داخل یک محفظه مکعب مستطیلی، با مقطع مربعی به طول ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۲ متر تشکیل شده است که از نازل مرکزی سوخت تزریق شده و در اطراف آن از بلاف‌بادی به منظور پایداری شعله و سپس هوای اولیه احتراق به صورت چرخشی و محوری و در نهایت هوای ثانویه به صورت محوری در جریان می‌باشد. ابعاد میدان محاسباتی هندسه مشعل چرخشی با توجه به پارامترهای شکل ۱ در جدول ۱ آورده شده است. شرایط مرزی سرعت در ورودی‌های سوخت و هوای اولیه از رابطه (۱) بدست می‌آید.

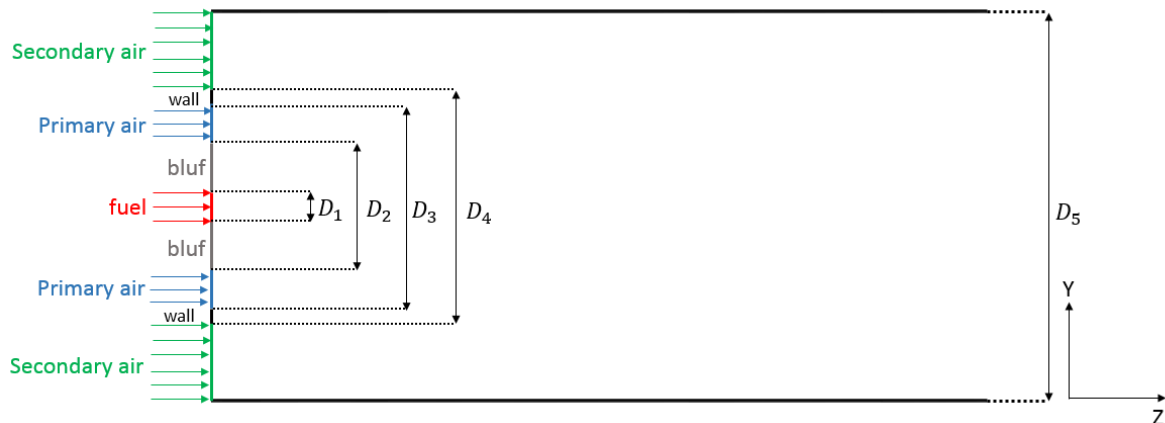
$$U = 1.218U_j \left(1 - \frac{|y|}{\delta}\right)^n \quad (1)$$

در رابطه (۱) مقدار n ثابت و برابر $\frac{1}{4}$ بوده و مقدار y در ورودی سوخت برابر فاصله شعاعی از خط مرکزی جریان و برای هوای اولیه، فاصله شعاعی از خطی که ضخامت حلقه را نصف می‌کند، می‌باشد. δ نیز برای ورودی سوخت برابر $\frac{1}{0.1}$ برابر شعاع ورودی سوخت و برای هوای اولیه، $\frac{1}{0.1}$ برابر نصف ضخامت حلقه می‌باشد و U_j نیز سرعت بالک موجود در جدول ۲ است.

حجم رآکتور، کاهش تولید محصول، کاهش بازده حرارتی کوره و تخریب رآکتور را به همراه خواهد داشت. در حالت کلی تشکیل کک به دلیل سرعت بالای واکنش کراکینگ یک فرآیند اجتناب‌ناپذیر در رآکتور است ولی با یکنواخت‌سازی توزیع دما اطراف لوله‌های رآکتور می‌توان سرعت تشکیل آن را کاهش داد [۸ و ۹]. مشعل‌های شعله تخت، قابلیت بالایی در ایجاد توزیع دمایی یکنواخت در محفظه داشته و نحوه کار آن‌ها به این صورت است که شار حرارتی جریان احتراقی صرف گرم کردن سطح جسم نسوزی که در معرض برخورد با شعله مشعل می‌باشد، شده و این سطح جسم نسوز است که به مرور زمان تا دمایی بالایی داغ شده و حرارت خود را به وسیله تابش به لوله‌های رآکتور منتقل می‌کند. علاوه بر این در این مشعل‌ها به علت دمایی بیشینه احتراقی پایین میزان انتشار آلاینده‌ها به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. از طرفی با توجه به شرایط عملکردی بهینه احتراقی در این مشعل‌ها بازدهی به صورت قابل توجهی بالا بوده و در نتیجه مصرف سوخت پایینی دارند [۱۰ و ۱۱]. در مطالعه حاضر با بررسی شرایط عملکردی مختلف در کوره کراکینگ نفتا همراه با مشعل شعله تخت به بررسی شرایط مختلف شار حرارتی بهینه ایجاد شده بر روی لوله‌های فرآیندی داخل کوره پرداخته شده است.

۲- مراحل مطالعه عددی

به دلیل فقدان نتایج تجربی در مورد مشعل‌های شعله تخت برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی کار حاضر، با در نظر گرفتن شباهت‌های فیزیکی و هندسی، مسائل معیاری که دارای نتایج تجربی برای راستی آزمایشی بوده مورد استفاده قرار گرفته است. در گام اول با توجه به این موضوع که در مشعل شعله مسطح مدنظر برای تجهیز محفظه احتراق کوره کراکینگ، جریان احتراقی به واسطه ورودی‌های زاویه دار مشعل، علاوه بر سرعت محوری دارای مولفه‌های مماسی و شعاعی نیز می‌باشد، ابتدا برای بررسی پدیده‌های توربولانس، تشعشع از گازهای احتراقی و احتراق غیر پیش‌آمیخته در این‌گونه جریان‌ها، از یک مساله معیار مشعل چرخشی استفاده شده است. سپس در قدم بعدی با توجه به اینکه در مشعل‌های شعله مسطح، انرژی جریان احتراقی چرخشی صرف گرم کردن جسم نسوز شده و سپس شار حرارتی به صورت تشعشع یکنواخت از سطح جسم نسوز به لوله‌های رآکتور منتقل می‌شود، برای صحت‌سنجی انتقال حرارت توامان و تشعشع از سطح جسم جامد از یک مساله معیار جریان عبوری از کانال آزمایشگاهی استفاده شده است و در نهایت به شبیه‌سازی مسئله



شکل ۱: طرحواره مشعل و ورودی‌های آن

Fig. 1. Burner figure and its inlets

Table 1. Computational domain dimensions

جدول ۱: ابعاد میدان محاسباتی

اندازه (mm)	پارامتر
$D_1 = 3/6$	ورودی سوخت
$D_2 = 50$	بلاف بادی
$D_3 = 60$	ورودی هوای اولیه
$D_4 = 65$	دیواره مشعل
$D_5 = 150$	ورودی هوای ثانویه

جریان هوای ثانویه نیز با سرعت محوری و ثابت ۲۰ متر بر ثانیه و با دمای ۳۰۰ کلوین در جریان است.

۳-۲- هندسه معیار در نظر گرفته شده جهت اعتبارسنجی حل توامان انتقال حرارت بین جامد و سیال

با توجه به اینکه حلگر reactingFOAM انتقال حرارت توامان میان گازهای احتراقی و ناحیه جامد را در نظر نمی‌گیرد لازم است اصلاحاتی در آن اعمال گردد. در نتیجه حلگر reactingFoam به حلگر

chtMultiRegionReactingFoam بهبود یافته و در راستای صحت سنجی این حلگر شبیه‌سازی یک کانال دو بعدی، متشکل از دو جامد موازی انجام شده است. حل عددی این مساله جهت راست‌آزمایی انتقال حرارت توامان می‌باشد که بارلتا و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۸ حل تحلیلی آن را انجام داده‌اند. در این مساله جریان آرام سیال وارد یک کانال که در روی سطوح خارجی آن یک توزیع سینوسی دما برقرار است، شده و از طریق یک حل تحلیلی، توزیع دما در فصل مشترک فازهای جامد و سیال بدست آمده است. هندسه این مساله که به منظور صحت‌سنجی حلگر احتراق توامان مورد بررسی قرار گرفته است، در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این کانال، هوا در دمای ۳۰۰ کلوین وارد کانال شده و پروفیل سرعت محوری در ورودی مطابق رابطه (۲) می‌باشد. مقدار دمای T و ΔT نیز به ترتیب برابر ۳۰۰ و ۵۰ کلوین است. پارامترهای $\beta = 25$ و $U_y = 0.095$ (m/s) می‌باشند.

$$U_y = \frac{3U_0}{2} [1 - (y/y_0)^2] \quad (2)$$

ابعاد کانال با توجه به هندسه در نظر گرفته شده به منظور انجام

Table 2. Swirl burner inlet conditions

جدول ۲: شرایط ورودی مشعل چرخشی

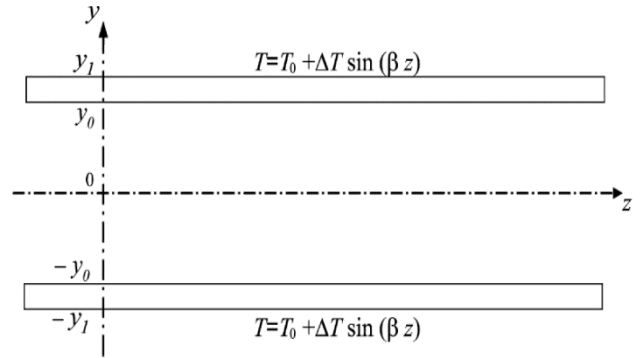
ورودی هوای اولیه	ورودی سوخت	پارامتر
۳۳/۲	۶۰	U_z سرعت بالک محوری (m/s)
۱۵/۴	۰	U_θ سرعت بالک مماسی (m/s)
۲/۵	۱/۸	Y_{max} (mm)
۳۰۰	۳۰۰	دما (کلوین)

Table 3. Dimensions of channel computational field with convective heat transfer

جدول ۳: ابعاد میدان محاسباتی کانال با انتقال حرارت توامان

اندازه (mm)	پارامتر
۴۰	ورودی کانال ($2y_0$)
۴	ضخامت جامد ($y_1 - y_0$)
۲۵۱/۲	طول کانال (z)

احتراقی با مومنتوم بالا در امتداد دیواره کوره بالا رفته و انتقال حرارت به لوله‌های رآکتور صورت می‌گیرد، چینش مشعل‌های شعله تخت به این صورت است که در مقابل رآکتور و به صورت ردیفی با تعداد بیشتری نسبت به مشعل شعله بلند روی دیواره کوره قرار گرفته و انرژی گرمایی را به دیواره نسوز کوره منتقل می‌کنند. با توجه به اینکه در مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی، شار حرارتی غالب به صورت مستقیم منتقل می‌شود، در این جا نیز هر کدام از لوله‌های رآکتور بیشترین حرارت را از دیوار نسوز مقابل خود دریافت می‌کنند، از این رو می‌توان با ضریب دقت بالایی ابعاد کوره را کوچک و نتایج شبیه‌سازی را به کل کوره تعمیم داد. البته سعی شده که پارامترهای هندسی نظیر قطر و تعداد لوله رآکتور و فاصله دیواره کوره تا رآکتور در شبیه‌سازی حاضر به نمونه کوره‌های کراکینگ در مقیاس صنعتی نزدیک باشد [۱۴]، در شکل ۳ میدان محاسباتی حاضر که به شکل مکعب مستطیل بوده و در آن لوله‌های رآکتور با سطح مقطع دایره‌ای به طور آویزان قرار دارند، مشخص شده است. محل دقیق قرار گرفتن مشعل، رآکتور و خروجی در شکل نشان داده شده است.



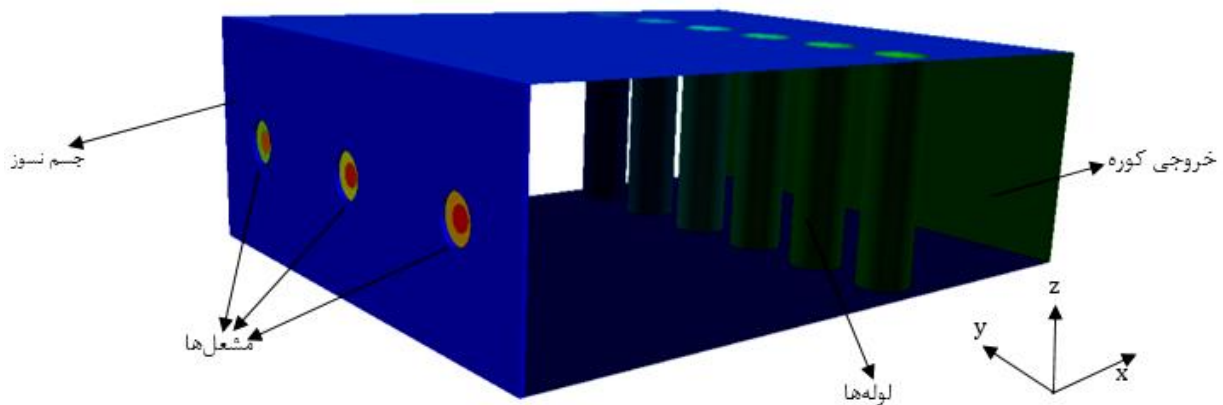
شکل ۲: هندسه کانال آزمایشگاهی

Fig. 2. Experimental channel geometry

شبیه‌سازی‌های عددی در جدول ۳ آمده است.

۳-۳- هندسه کوره کراکینگ همراه با مشعل شعله تخت و شرایط مرزی حاکم بر آن

با توجه به ابعاد بسیار بزرگ کوره‌های کراکینگ، برای کاهش هزینه محاسباتی، ناحیه‌ای از بخش تشعشعی کوره شبیه‌سازی شده است. نکته حائز اهمیت در مورد مشعل‌های شعله تخت این است که انتقال حرارت تنها از طریق تابش از دیواره نسوز اطراف مشعل صورت می‌گیرد و مومنتوم جریان خروجی از مشعل در مقایسه با مشعل‌های شعله بلندی که در کوره‌های کراکینگ استفاده می‌شود خیلی کمتر می‌باشد. در کوره کراکینگ با مشعل شعله تخت بر خلاف مشعل‌های شعله بلند که در کف قرار گرفته و جریان



شکل ۳: کوره کراکینگ شبیه‌سازی شده، مجهز به مشعل شعله مسطح

Fig. 3. Simulated cracking furnace equipped with a flat flame burner

Table 4. Dimensions of simulated section of naphtha cracking furnace

جدول ۴: ابعاد بخش شبیه‌سازی شده از کوره کراکینگ نفتا

اندازه (m)	پارامتر	نواحی میدان محاسباتی
۰/۵	ارتفاع (z)	محفظه احتراق
۱/۵	طول (x)	
۱/۲	عرض (y)	
۰/۱	قطر مشعل‌ها	رآکتور
۰/۵	طول هر لوله	
۰/۱۲	قطر لوله‌ی رآکتور	

Table 5. Boundary conditions applied to the Naphtha cracking furnace problem

جدول ۵: شرایط مرزی اعمال شده در مساله کوره کراکینگ نفتا

ورودی هوا	ورودی سوخت	پارامتر
۱۰	۵	U_z محوری (m/s)
۴	۲	U_θ مماسی (m/s)
۲۰	۵	U_r شعاعی (m/s)
۳۰۰	۳۰۰	دما (کلوین)

در عوض به جای آن، شرط مرزی دمایی فرآیند کراکینگ نفتا برای درون رآکتور اعمال شده است. این شرط دمایی از نتایج کار مارین [۱۵] گرفته شده است و رابطه شرط مرزی دمایی برای رآکتور به صورت رابطه (۳) است.

$$T = 5.946(z) + 880k \quad 0 \leq z \leq 38.68 \quad (3)$$

در رابطه بالا z طول کلی لوله‌های رآکتور می‌باشد که با توجه به این طول، دمای ۸۸۰ کلوین در ورودی (خروجی بخش جابجایی) به صورت خطی افزایش می‌یابد. شرایط مرزی مربوط به جسم نسوز با ضخامت ۱ سانتی‌متر که به عنوان ناحیه جامد بوده و انتقال حرارت توامان روی آن بررسی می‌شود و در شکل ۳ نیز مشخص شده است، به این صورت است که، سطح داخلی جسم نسوز که داخل کوره قرار می‌گیرد و حرارت را به رآکتور می‌تاباند، برای آن که انتقال حرارت میان شعله و سطح جسم نسوز به درستی صورت گیرد، نوع دیوار به صورت mappedWall انتخاب شده است. این شرط مرزی در شرایطی استفاده می‌شود که دو ناحیه حل مجزا داشته باشیم (در مسئله حاضر سطح جامد و قسمتی که در آن سیال جریان دارد، دو ناحیه مجزا هستند). در این حالت دیواره‌ای بین جسم جامد و سیال مجاور آن وجود دارد. تحت این شرایط معادلات انرژی درون جسم سیال و جسم

ابعاد این ناحیه از کوره با جزئیات آن در جدول ۴ آمده است. برای این قسمت از کوره، سه مشعل در فاصله ۰/۴ متری یکدیگر روی دیواره جسم نسوز کوره با ضخامت ۱ سانتی‌متر قرار گرفته‌اند. قطر مشعل‌ها ۱۰ سانتی‌متر بوده که ورودی دایروی به قطر ۵ سانتی‌متر در وسط آن، محل تزریق هوا و زوا اطراف آن سوخت وارد کوره می‌شود، تعداد لوله‌های رآکتور نیز ۶ عدد می‌باشد.

مختصات نقاط مرکزی رآکتورها، در طول ۱ متری و در عرض‌های ۰/۱ ، ۰/۳ ، ۰/۵ ، ۰/۷ ، ۰/۹ و ۱/۱ متری قرار گرفته و لوله‌ها از کف تا سقف کوره قرار گرفته‌اند.

در ورودی مشعل‌ها دما و سرعت به صورت جدول ۵ اعمال شده است. با توجه به ثابت بودن فشار در بخش تابشی کوره، برای مرز خروجی شرط فشار ثابت و ۱ اتمسفر و برای باقی پارامترها شرط گرادیان صفر انتخاب شده است. روی دیواره کوره نیز برای سرعت و دما به ترتیب شرط $u = 0$ و شرط گرادیان صفر برای شرایط عدم لغزش و عایق حرارتی در نظر گرفته شده است.

همچنین به جهت آن که سیال درون رآکتور مخلوط هیدروکربنی نفتا می‌باشد و به جهت پیچیدگی فرآیند کراکینگ این مخلوط و همچنین کاهش هزینه محاسباتی، از شبیه‌سازی جریان داخل رآکتور صرف نظر شده است.

Table 6. Physical properties of refractory object

جدول ۶: خواص فیزیکی جسم نسوز

اندازه	پارامتر
۰/۰۱	ضخامت (m)
۴۰	(W/m.K) k
۰/۹	ϵ

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_i "u_j"] \quad (۶)$$

معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_s = \bar{\omega}_T + \frac{D\bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \bar{\rho} u_i "h_s" \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \sum_{k,i} h_{s,k}) + S_{rad} \quad (۷)$$

معادله بقای گونه‌ها

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{y}_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{y}_k = -\frac{\partial}{\partial x_i} \overline{V_{k,i} Y_k} + \bar{\rho} u_i "y_k" + \bar{\omega}_k \quad (۸)$$

در روابط ارائه شده ρ چگالی، u بردار سرعت و P فشار می‌باشد. $\bar{\tau}_{ij}$ تانسور لزجت و ترم $\bar{\rho} u_i "u_j"$ نشانگر تنش رینولدز بوده که با مدل توربولانسی مدل می‌شود. $\bar{\omega}_k$ نرخ تولید یا مصرف گونه k ام است که از مدل احتراقی برآورد می‌گردد و ترم $\overline{V_{k,i} Y_k}$ شار نفوذی آرام و ترم $\bar{\rho} u_i "y_k"$ شار توربولانسی مربوط به گونه‌هاست. در رابطه (۶) $\bar{\omega}_T$ حرارت آزاد شده از احتراق است.

ترم $\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}$ شار نفوذ حرارتی آرام برای آنتالپی و عبارت $\bar{\rho} u_i "h_s"$ شار مغشوش آنتالپی می‌باشد، ترم چشمه ناشی از لزجت حرارتی و ترم $\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \sum_{k,i} h_{s,k})$ ناشی از نفوذ گونه‌ها با آنتالپی‌های متفاوت و در نهایت S_{rad} ترم مربوط به چشمه تشعشی است که می‌بایست مدل گردد.

۴-۱- مدل‌سازی توربولانس

معادلات ناویراستوکس، یک مدل کامل ریاضی برای جریان سیالات ارائه می‌دهد، ولی به دلیل پیچیده بودن این معادلات، حل تحلیلی آن‌ها در حال حاضر غیر ممکن است. روش‌های عددی به کمک رایانه می‌تواند برای حل این معادلات تا دقت قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرد. پرکاربردترین

جامد حل گردیده و محل پیوند این معادلات در شرط مرزی اعمال شده بین آن‌ها می‌باشد. این شرط مرزی معادلاتی به صورت زیر دارد:

$$\text{interface boundary condition} \rightarrow T_f = T_s \quad (۴)$$

$$J_f = J_s, \quad J_f = k_f \left(\frac{dT}{dn} \right)_f, \quad J_s = k_s \left(\frac{dT}{dn} \right)_s$$

در این روش شار حرارتی از ناحیه‌ی سیال به دلیل دمای بالاتر به ناحیه‌ی جامد منتقل می‌شود و دمای جامد از طریق سطح مشترک به سیال بازگشت داده می‌شود [۱۶].

با توجه به کار مایر، جنس دیواره نسوز دارای ضریب تابندگی (ε) بالایی برای تابش هرچه بهتر شار حرارتی و ضریب رسانشی آن نیز در حدودی است که شار حرارت روی سطح جامد به طور یکنواخت پخش شده و حرارت از سطح گسترده‌تری به سمت داخل کوره تابیده شود. خواص فیزیکی اعمال شده برای جسم نسوز در مطالعه حاضر در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

۴-۲ معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله شامل معادله بقای جرم، معادله بقای مومنتوم، معادله بقای انرژی و معادله بقای گونه‌هاست. در مجموعه معادلات ارائه شده علامت $\bar{\rho}$ نشان دهنده متوسط‌گیری رینولدز و علامت \sim نشان دهنده متوسط‌گیری جرمی است [۱۷].

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i = 0 \quad (۵)$$

معادله بقای مومنتوم

از ناحیه واکنشی که از رابطه (۱۱) محاسبه شده و κ^* کسر جرمی مخلوط واکنشی است.

$$C_1 = \kappa^* C + 1 - \kappa^* C_0 \quad (11)$$

به طور کلی انتخاب τ_{mix} وابستگی زیادی به جریان دارد. رابطه (۱۲) برای محاسبه آن است که μ_{eff} لزجت موثر و C_{mix} ضریبی ثابتی است که می‌تواند $0/001-0/3$ باشد.

$$\tau_{mix} = C_{mix} \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\rho \varepsilon}} \quad (12)$$

۴-۳- مدل سازی تشعشع

در سیستم‌های احتراقی بواسطه واکنش‌های شیمیایی، دمای کاری بالا بوده و بر این اساس در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشعی در شبیه‌سازی مسائل احتراقی برای پیش‌بینی دما، امری ضروری است. شدت کل تشعشعی G به سادگی قابل محاسبه نبوده و روش‌های مختلفی جهت مدل‌سازی آن ارائه شده است. در تحقیق حاضر از مدل تشعشعی P_1 استفاده شده است که مزیت اصلی آن تبدیل معادله حاکم به معادلات همراه با مشتقات جزئی به نسبت ساده می‌باشد و دارای دقت قابل قبول و هزینه محاسباتی پایینی می‌باشد.

ترم چشمه معادله انرژی بر اساس تلفات حرارتی تشعشعی به صورت رابطه (۱۳) است.

$$S_{rad} = -\nabla \cdot q = \kappa G - 4\kappa \sigma T^4 \quad (13)$$

در رابطه فوق، σ ثابت استفان بولتزمن و κ ضریب جذب می‌باشد. در تقریب P_1 معادله انتقال حرارت تشعشعی برای محیط خاکستری و بدون پراکندگی به صورت زیر ساده می‌شود.

$$q = -\frac{1}{3\kappa_\lambda} \nabla G \quad (14)$$

مدل دو معادله‌ای برای مدل کردن ترم‌های اغتشاشی، مدل $k-\varepsilon$ استاندارد می‌باشد، البته این مدل برای جریان‌های پیچیده، شامل وجود گرادیان شدید فشار، جدایش و انحنای شدید خطوط جریان، کارکرد ضعیفی دارد که برای رفع این مشکل، مدل $k-\varepsilon$ با تعریف فرکانس اغتشاش به صورت $\omega = \varepsilon/k$ ، رابطه جایگزینی برای ε توسط ویلکاکس [۱۸] معرفی شد. این متغیر مقیاس مناسبی برای زمان اغتشاشی، مخصوصاً در نزدیک دیوار جامد بوده و ایرادهای مدل $k-\varepsilon$ مانند ضعف در پیش‌بینی جریان‌هایی با لزجت اغتشاشی زیاد و عدم کارایی در جریان‌های با چرخش زیاد را رفع کرده است. اما این مدل نیز به مقدار ω روی مرز ورودی جریان بسیار وابسته بوده و نمی‌تواند گرادیان فشار معکوس و جدایش جریان را به خوبی نشان دهد. برای رفع این مشکل نیز مدل $k-\omega$ SST ارائه شده است که در نزدیکی مرز جامد مدل $k-\omega$ را اعمال و در نواحی دور از مرز جامد، مدل $k-\varepsilon$ را در نظر می‌گیرد [۱۹]. در کار حاضر نیز به دلیل مدل‌سازی جریان‌های چرخشی و برای افزایش دقت محاسبات از مدل توربولانسی $k-\omega$ SST استفاده شده است.

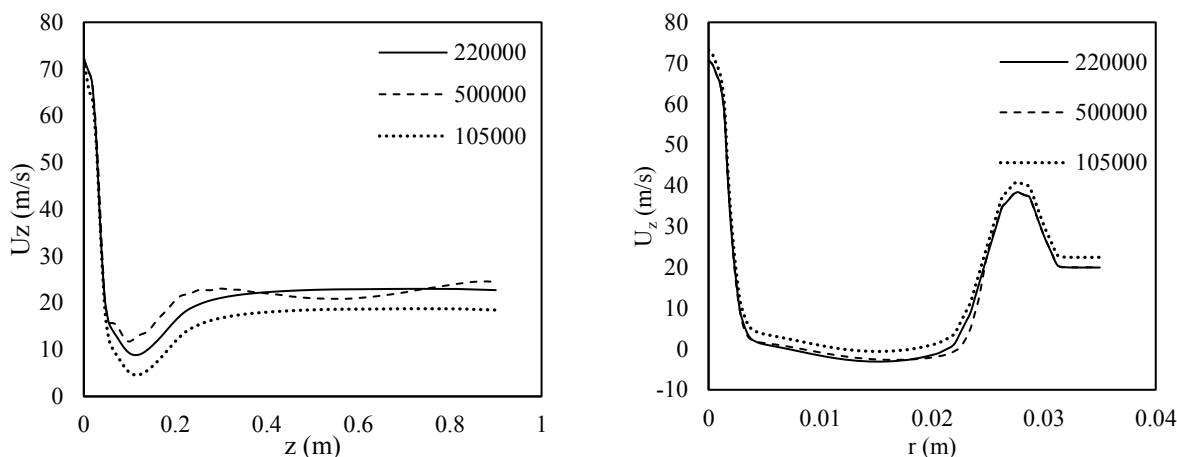
۴-۲- مدل سازی احتراق

در شبیه‌سازی کار حاضر از مدل احتراقی واکنشگاه نیمه مخلوط که توسط چمیاک [۲۰] برای احتراق غیر پیش‌آمیخته توسعه داده شد، استفاده شده است. با توجه به اینکه کوپلینگ بین توربولانس و احتراق در مواردی که شامل برهم‌کنش شیمی-توربولانس باشد، ضروری است، در این مدل تاثیر هر دو پارامتر اختلاطی و سینتیک‌های شیمیایی در فرآیند احتراق اعمال می‌گردد و هر سلول واکنشی به دو ناحیه یکنواخت واکنشی و غیرواکنشی تقسیم می‌شود. نرخ متوسط واکنش گونه k ام در معادله بقای گونه‌ها از رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$\frac{c_k^1 - c_k^0}{dt} = \dot{\omega}_k = \kappa^* \dot{\omega}_k \quad (9)$$

$$\kappa^* = \frac{\tau_{ch}}{\tau_{mix} + \tau_{ch}} \quad (10)$$

در روابط بالا τ_{ch} زمان واکنش شیمیایی و τ_{mix} زمان شکست گردابه را نشان می‌دهد. c_k^0 غلظت متوسط ورودی به سلول و c غلظت در ناحیه واکنشی در زیرسلول بوده که نامشخص است و c_k^1 غلظت متوسط خروجی



شکل ۴: نمودار استقلال از شبکه، توزیع سرعت محوری روی خط تقارن (راست)، روی مقطع عرضی در $Z = 5 \text{ mm}$ (چپ)

Fig. 4. Grid independence graph, axial velocity distribution on the symmetry line (right), on the cross section at $z = 5 \text{ mm}$ (left)

۵-۱- نتایج مشعل چرخشی

برای بررسی عدم وابستگی نتایج به اندازه شبکه، نمودار نتایج سرعت محوری در یک مقطع طولی در خط تقارن و یک مقطع عرضی بر حسب شعاع برای سه شبکه محاسباتی با تعداد ۱۰۵۰۰۰، ۲۲۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی در شکل ۴ مقایسه شده اند و با توجه به تطابق تقریبی نتایج دو شبکه ۲۲۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰۰، شبکه ۲۲۰۰۰۰ به عنوان حالت مستقل از شبکه انتخاب شده است.

پس از یافتن شبکه محاسباتی مناسب، نتایج حل عددی با داده‌های تجربی در دو مقطع عرضی، مطابق شکل ۵ مقایسه شده‌اند و مشاهده می‌شود که تطابق خوبی میان نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی حاصل شده است. مقدار خطای نسبی نتایج ۴/۵۷ درصد محاسبه شده است و بر اساس آن می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده برای مشعل مناسب بوده است. همچنین بیشینه دمای ایجاد شده در کوره ۲۰۱۰ کلوین بوده و در مقایسه با بیشینه دمای ۱۹۲۰ کلوین گزارش شده توسط دالی خطای ۴/۷ درصدی را نشان می‌دهد.

۵-۲- نتایج مربوط به جریان داخل کانال به منظور اعتبارسنجی حلگر انتقال حرارت توامان

برای بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، دو شبکه با تعداد سلول محاسباتی ۱۰۸۰۰ و ۲۲۴۰۰ ایجاد و نتایج حل روی هر یک از آن‌ها بررسی و مقایسه شده است. کانتور دمای کانال مورد بررسی به صورت شکل ۶ است. با توجه به کانتور بدست آمده، ابتدا دما در سطح

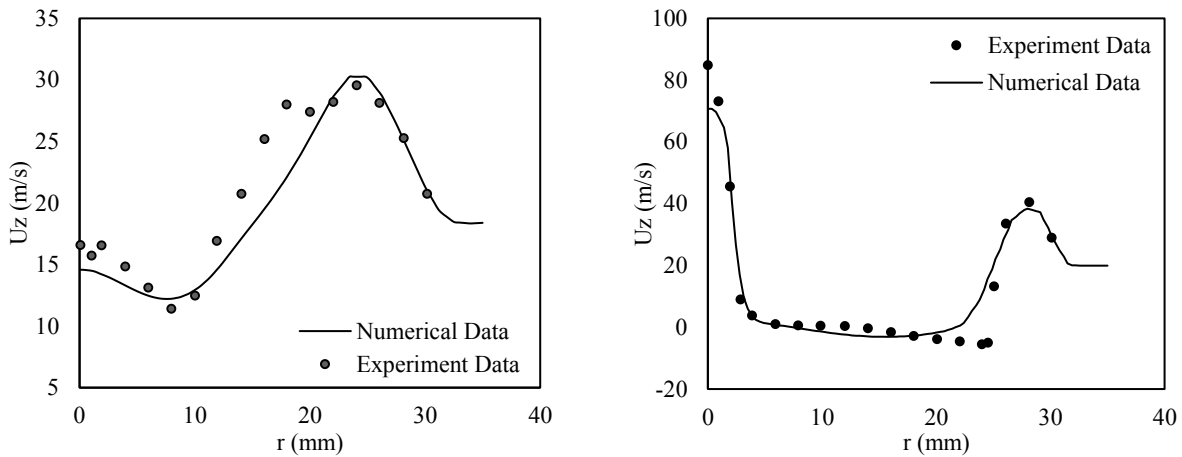
$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{3\kappa_\lambda} \nabla G \right) = \kappa G - 4\kappa\sigma T^4 \quad (15)$$

۴-۴- سینتیک شیمیایی

انتخاب سینتیک، به شدت بر روی دقت نتایج عددی تاثیرگذار است. در سال‌های اخیر تعداد زیادی سینتیک شیمیایی کاهش یافته ارائه شده است که کارکرد آن‌ها در پیش‌بینی توزیع دما و گونه‌ها متفاوت است. در کار حاضر از سینتیک ۴ مرحله‌ای جانز لیستند [۲۱] اصلاح شده که در سال ۲۰۱۳ توسط گوئساب ارائه گردید، استفاده شده است که با توجه به داشتن گونه‌های بیشتر در مقایسه با سینتیک‌های تک و دو مرحله‌ای پیشین انتظار می‌رود نتایج دقیق‌تری ارائه دهد.

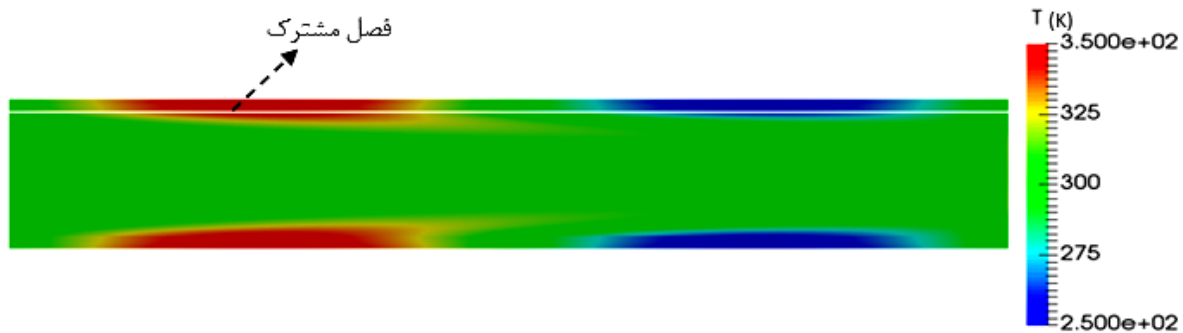
۵- نتایج

در کار حاضر برای شبیه‌سازی مسئله معیار برای کوپلینگ بین فشار و سرعت در آن، الگوریتم تصحیح فشار پیزو استفاده شده است. مدل احتراقی به کار رفته در این حلگر، واکنشگاه نیمه مخلوط می‌باشد. در کار حاضر برای گسسته‌سازی ترم‌های جابجایی در معادلات بقای مومنتوم، انرژی و گونه‌ها از روش ترکیبی تفاضل مرکزی و آپویند مرتبه دوم استفاده شده است. گسسته‌سازی کلیه ترم‌های زمانی با روش اولر مرتبه یک و کلیه میانجی‌ها به صورت خطی انجام شده است.



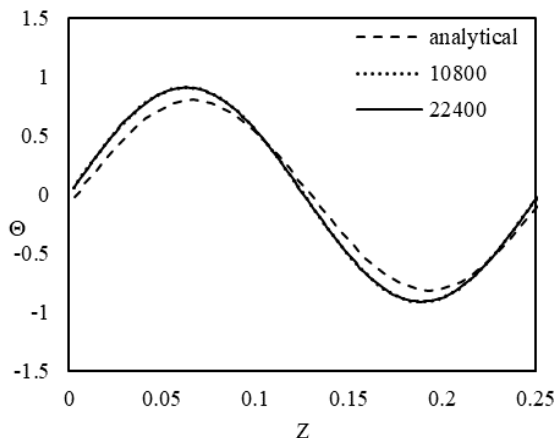
شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی سرعت محوری در دو مقطع عرضی $Z = 60$ mm و $Z = 5$ mm

Fig. 5. Comparison of the experimental and numerical results of axial velocity at two $z = 5$ mm and $z = 60$ mm cross sections



شکل ۶: کانتور دمای کانال شبیه‌سازی شده

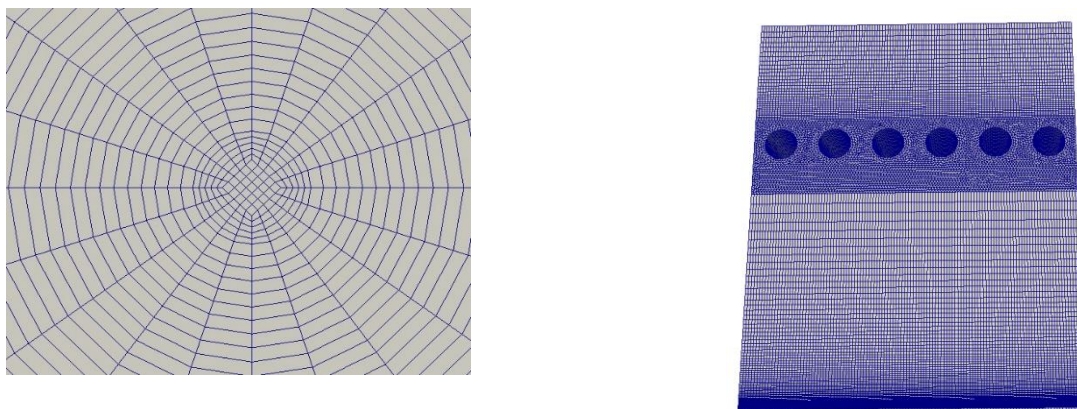
Fig. 6. Simulated channel temperature contour



شکل ۷: نمودار θ برای حل تحلیلی و حل عددی در دو شبکه ۱۰۸۰۰ و ۲۲۴۰۰

Fig. 7. The graph of θ for analytical and numerical solution in the 10800 and 22400 grids

جسم جامد با توجه به شرط مرزی سینوسی اعمال شده بر آن به تدریج تا دمای ۳۵۰ کلوین افزایش و سپس تا دمای ۲۵۰ کلوین با توجه به شرط مرزی حاکم بر آن کاهش یافته است؛ هدایت حرارتی در جسم جامد دمای فاز سیال را نیز تحت تاثیر قرار داده و دمای سیال با توجه به تغییرات ایجاد شده درون جسم جامد تغییر پیدا کرده است. همان‌طور که انتظار می‌رود مطابق با شکل ۶، دمای سیال در مجاورت جسم جامد تاثیر بیشتری از آن می‌پذیرد و با نزدیک شدن به نواحی میان کانال از تاثیر آن کاسته می‌شود. برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، عدد بی‌بعد θ که در رابطه (۱۶) تعریف شده است با نتایج تحلیلی در فصل مشترک مقایسه شده است.



شکل ۸: شبکه‌بندی کوره کراکینگ شبیه‌سازی شده

Fig. 8. Simulated cracking furnace mesh

محاسباتی از مکانیزم کاهش یافته جانزلینستد استفاده شد. واکنش‌های این مکانیزم در مساله معیار مشعل چرخشی نیز به کار رفت. شبکه‌بندی محاسباتی مساله، همان‌طور که در شکل ۸ (راست) مشخص است، از نوع سلول‌های ساختاریافته مستطیلی^۲ و در برخی نواحی به صورت مثلثی^۳ بوده و در هنگام ایجاد شبکه، ریزتر بودن سلول‌ها اطراف لوله‌های رآکتور و ورودی‌های مشعل‌ها و روی سطح جسم نسوز به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر مدنظر قرار گرفته است. همچنین در ورودی مشعل‌ها نیز با ایجاد شبکه به صورت شکل ۸ (چپ) در ورودی‌ها از شبکه ریزتر برای بهبود دقت استفاده شده است.

برای بررسی عدم وابستگی حل عددی به شبکه محاسباتی، دو شبکه با تعداد سلول ۲۱۰,۰۰۰ و ۵۰۰,۰۰۰ انتخاب و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل ۹ توزیع دما بر حسب طول کوره در خط مرکزی مشعل وسط و در شکل ۱۰ توزیع دما در امتداد لوله چهارم ($y=0/7$) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حل در دو شبکه تفاوت چندانی با هم ندارند و از این‌رو می‌توان تعداد سلول ۲۱۰,۰۰۰ را به عنوان شبکه استقلال یافته از حل عددی دانست.

نمودار شکل ۹ دمای یکنواختی در حدود ۱۰۰۰ کلوین را در سراسر طول کوره نشان می‌دهد که علت آن شار حرارتی تشعشی یکنواختی است که از جسم نسوز منتشر شده است، علت افت جزئی دما را می‌توان کاهش اثر حرارتی جریان احتراقی مشعل‌ها دانست.

نمودار شکل ۱۰ نیز یک پروفیل دمایی کاملاً یکنواخت ۹۵۰ کلوینی را

$$\theta = \frac{T - T_0}{\Delta T} \quad (16)$$

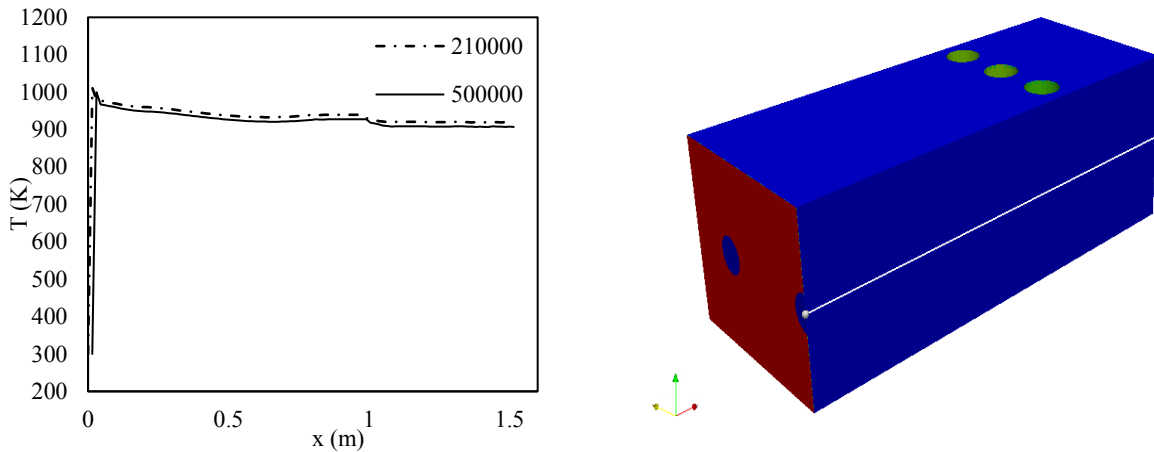
همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است نتایج دو شبکه مختلف، به‌طور کامل منطبق بوده و می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حل عددی از شبکه مستقل می‌باشد و مشاهده می‌شود تطابق خوبی میان نتایج تحلیلی و نتایج عددی حاصل شده است و با خطای نسبی ۳/۵ درصدی می‌توان گفت که حلگر chtMultiRegionReactingFoam به خوبی انتقال حرارت توامان را مدل‌سازی کرده است.

۵-۳- نتایج و بحث کوره کراکینگ همراه با مشعل شعله تخت

شبیه‌سازی این مساله با استفاده از حلگر توسعه داده شده reactingFoam تحت عنوان chtMultiRegionReactingFoam در نرم‌افزار متن‌باز این فوم صورت گرفته است. برای این هندسه پدیده‌هایی چون جریان توربولانسی، احتراق غیر پیش‌آمیخته، انتقال حرارت توامان بین جسم نسوز و محفظه احتراق کوره و همچنین تشعشع گازهای حاصل از احتراق در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی توربولانس با استفاده از مدل $k-\omega$ SST و برای در نظر گرفتن اثرات متقابل بین شیمی-توربولانس، مدل واکنشگاه نیمه‌مخلوط (PaSR) اعمال گردید. برای تشعشع گازهای احتراقی در انتقال حرارت محفظه احتراق به رآکتورها، از مدل P1 استفاده شده است، همچنین برای مدل‌سازی تشعشع از سطح جامد جسم نسوز نیز از مدل سطح مات^۱ استفاده شده است. برای شبیه‌سازی کار حاضر، در جهت کاهش هزینه

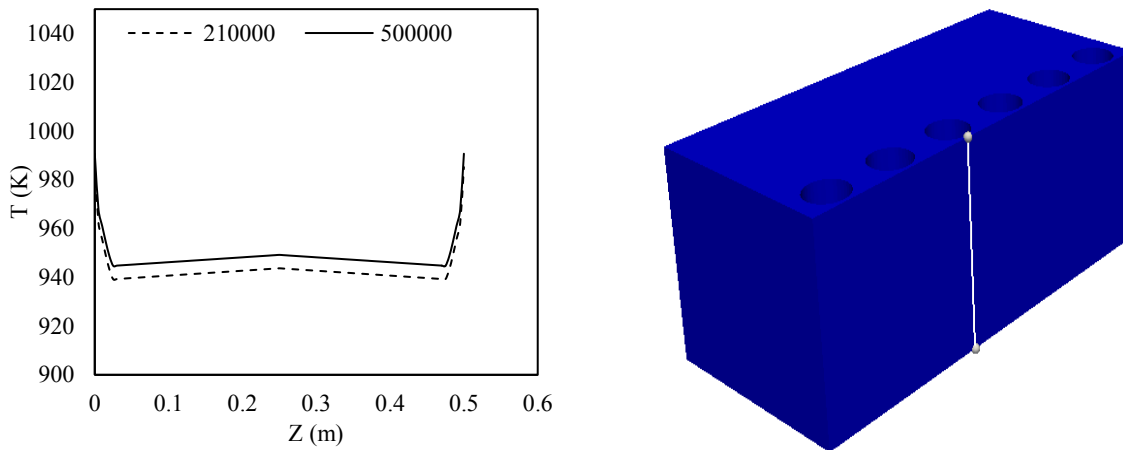
2 Structure Hexahedral
3 Prism

1 opaque



شکل ۹: نمودار دما بر حسب طول کوره برای حل عددی در دو شبکه ۲۱۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰۰

Fig. 9. Temperature distribution in furnace length for numerical solution in two grids with 210000 and 500000 cells



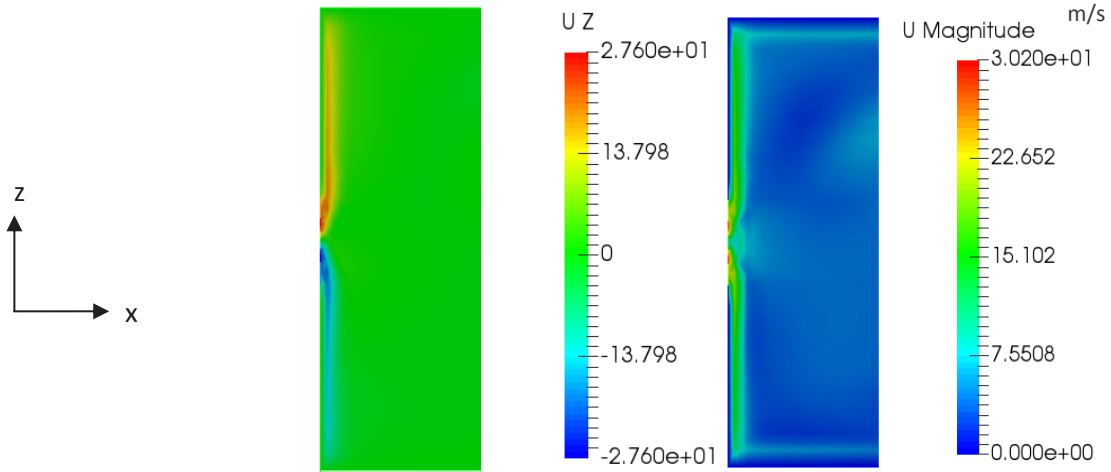
شکل ۱۰: نمودار دما بر حسب طول لوله برای حل عددی در دو شبکه ۲۱۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰۰

Fig. 10. Temperature distribution in terms of pipe length for numerical solution in two mesh with 210000 and 500000 cells

به همراه داشته باشد. پارامترهای اساسی سیال عامل داخل رآکتور که برای کنترل میدان دمایی آن حائز اهمیت هستند، میدان جریان و دمای اولیه سیال عامل در لحظه ورود به بخش تشعشعی کوره و همچنین شار حرارتی منتقل شده به لوله‌ها از جانب جریان احتراقی می‌باشد. پارامترهای دما، سرعت و فشار اولیه را می‌توان در بخش جابجایی کوره کنترل کرد و برای شارحرارتی داخل کوره، یکنواختی دما عامل مهمی است که می‌تواند مقدار شار حرارتی در هر مختصاتی از لوله را مشخص و با کنترل این پارامترها می‌توان پروفیل دمایی ایده‌آل برای انجام واکنش کراکینگ داخل رآکتور را پیش‌بینی نمود، از این‌رو دمای یکنواخت در محفظه احتراقی کوره، تاثیر بسزایی در افزایش بازده عملکرد این کوره‌ها خواهد داشت.

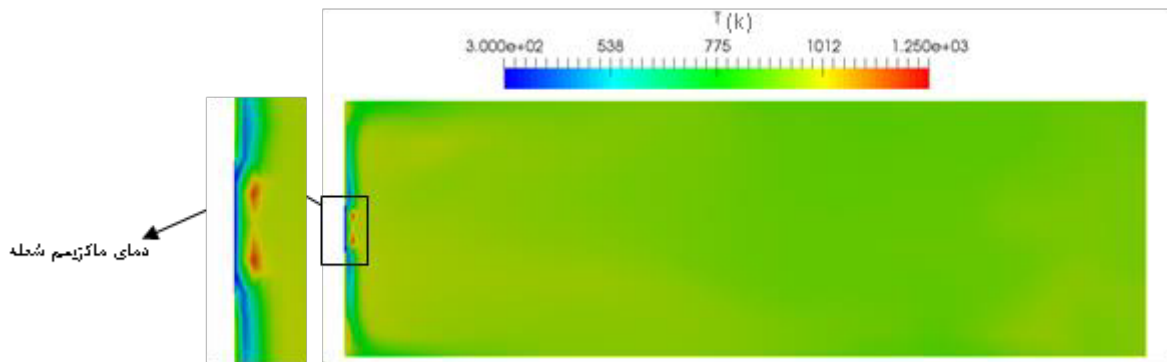
اطراف لوله رآکتور نشان داده است که علت آن یکنواختی انتقال حرارت در مکانیزم تشعشعی می‌باشد.

اهمیت یکنواختی دما در کوره‌های کراکینگ را این‌گونه می‌توان توجیه نمود که رآکتورهایی که در این کوره‌ها هستند، بسته به نوع هندسه رآکتور و نوع سیال عامل داخل لوله‌های رآکتور دارای پروفیل دمایی خاصی بوده و هرچه قدر شار حرارتی که از جریان احتراقی داخل کوره به این لوله‌ها منتقل می‌شوند به این پروفیل دمایی نزدیک‌تر باشد، علاوه بر جلوگیری از تشکیل کک و معضلات آن، کیفیت محصولات الفینی تولیدی نیز بهتر خواهد بود و همچنین استفاده از مشعل‌های شعله بلند در این کوره‌ها می‌تواند به ایجاد نقاط داغ در رآکتور و در نتیجه ایجاد مشکل در انجام واکنش کراکینگ را



شکل ۱۱: توزیع مقدار سرعت (راست) و سرعت شعاعی Uz (چپ) در مقطع $y = 0.6$ (m) و $0 < x < 0.2$ (m)

Fig. 11. Distribution of velocity (right) and radial velocity Uz (left) at the intersection of $y = 0.6$ (m) and $0 < x < 0.2$ (m)



شکل ۱۲: توزیع دما در مقطع $y = 0.6$ (m) و $0 < x < 1.5$ (m)

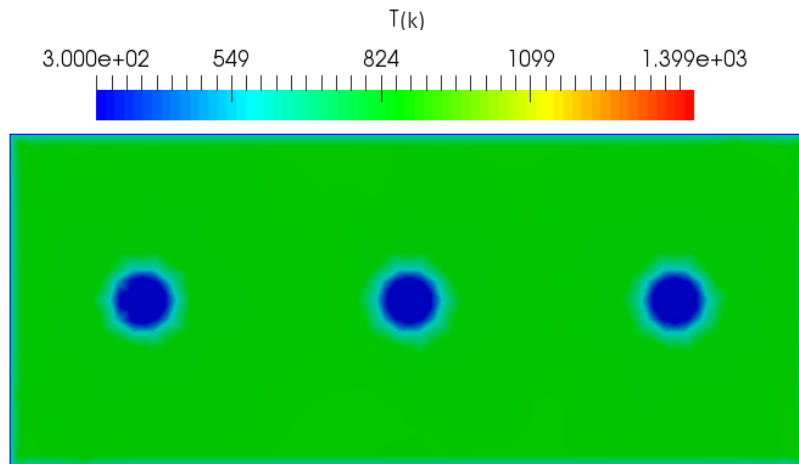
Fig. 12. Distribution of temperature at $y = 0.6$ (m) and $0 < x < 1.5$ (m)

شکل ۱۲ مشخص است که در طول کوره مقداری افت دما به وجود آمده است که دلیل آن این است که در پایین دست کوره علاوه بر تاثیر شار حرارتی ساطع شده از جسم نسوز، شار حرارتی جریان احتراقی نیز وجود داشته و بیشتر بودن دما در آن ناحیه به همین دلیل است.

شکل ۱۳ نیز توزیع دما روی سطح جسم نسوز را نشان می دهد، در این شکل مشخص است که جسم نسوز به علت ضریب رسانندگی بالایی که دارد، به خوبی حرارت شعله که مطابق شکل ۱۴ دمایی در حدود ۱۱۵۰ کلوین تا ۹۰۰ کلوین دارد را در تمام سطح خود منتقل کرده و دمای سطح در حدود ۸۵۰ کلوین و به صورت یکنواخت درآمده است. این یکنواختی دما روی سطح جسم نسوز، بدان جهت حائز اهمیت است که موجب یکنواختی

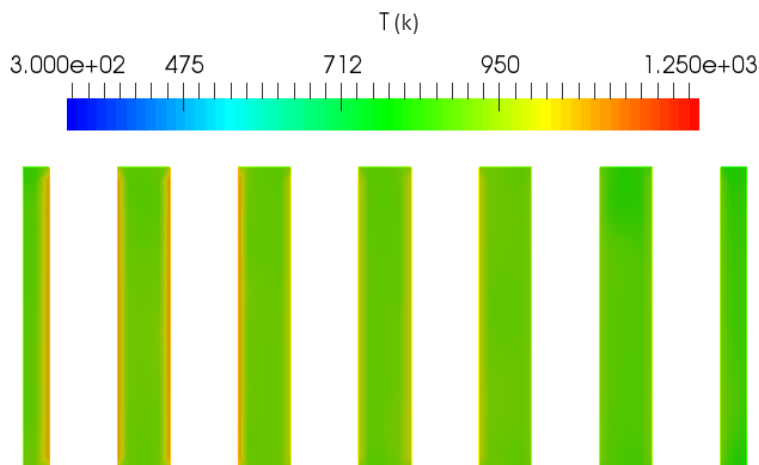
شکل ۱۱ توزیع سرعت در راستای طولی کوره روی خط تقارن مشعل ها را نشان می دهد که به وضوح جریان احتراقی که در امتداد شعاعی روی جسم نسوز حرکت کرده و انتقال حرارت را صورت می دهد، قابل مشاهده است.

در شکل ۱۲ نیز توزیع دما در مقطع ذکر شده، نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، در نزدیکی مشعل هم از نظر آن که مقدار سرعت جریان بیشتر و هم به دلیل وجود جریان چرخشی، اختلاط بهتر صورت گرفته و دمای شعله نسبت به سایر مناطق مقدار بیشتری داشته و تا ۱۱۵۰ کلوین افزایش یافته است. در امتداد خطوط شعاعی نیز دمای شعله به تدریج تا ۹۰۰ کلوین کاهش یافته است که این موضوع به علت کاهش میزان سوخت در دسترس با فاصله گرفتن از قسمت میانی می باشد. در شکل



شکل ۱۳: توزیع دما روی سطح جسم نسوز

Fig. 13. Temperature distribution on the surface of the refractory object



شکل ۱۴: توزیع دما در اطراف لوله‌های رآکتور

Fig. 14. Temperature distribution around the reactor pipes

ایده‌آل ۱۳۰۰ کلوین است، درحالی‌که در کار حاضر متوسط دمایی داخل کوره ۹۰۰ کلوین و پایین‌تر از حالت ایده‌آل است. به دلیل نبود نتایج تجربی در کار حاضر برای مقایسه، نتایج را می‌توان با پارامترهای ایده‌آل کوره‌های کراکینگ که در منابع ذکر شده‌اند، مقایسه نمود. در جدول ۷ این مقایسه انجام شده است. همان‌طور که یکنواخت بودن دما در محفظه احتراق کوره، موجب بهبود عملکرد کوره کراکینگ خواهد شد، میزان این دما نیز نباید از یک حدی کمتر یا بیشتر باشد. پیش‌تر اشاره شد که بیشتر بودن آن مشکلات عدیده‌ای را به‌وجود خواهد آورد ولی کمتر بودن آن نیز باعث عدم کارکرد مناسب کوره

دما در داخل کوره خواهد شد. یکنواختی دما اطراف لوله‌های رآکتور نیز در شکل ۱۴ مشخص می‌باشد که به موجب آن دمایی در حدود ۹۵۰ کلوین در اطراف لوله‌ها را شاهد هستیم. همان‌طور که مشخص است، طبق شکل ۱۴، دمای سطح لوله‌ها حدود ۹۵۰ کلوین است (این موضوع با توجه به توان مشعل‌های شعله تخت مورد استفاده می‌باشد)، درحالی‌که این مقدار برای حالت ایده‌آل در اکثر کوره‌های کراکینگ باید حدود ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ کلوین باشد. هم‌چنین با توجه به محدود بودن دما در اطراف لوله‌های رآکتور، می‌توان نتیجه گرفت که متوسط دمای محفظه احتراق نباید از حدی بیشتر باشد که این مقدار در حالت

جدول ۷: مقایسه پارامترهای دمایی حل حاضر با مراجع

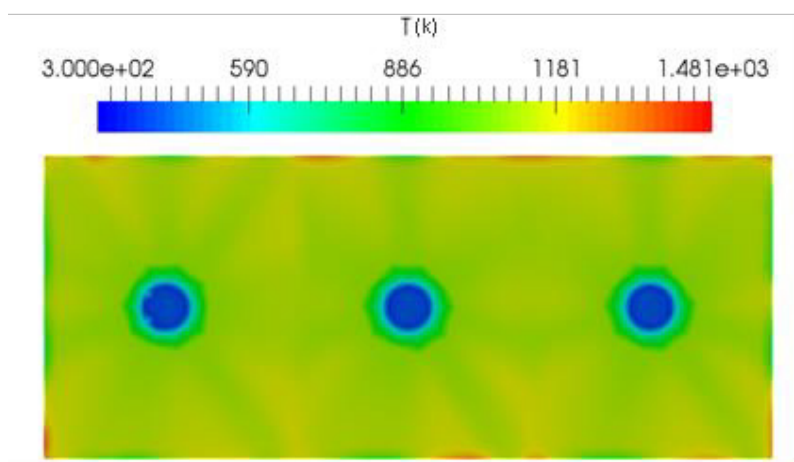
Table 7. Compares the temperature parameters with reference solution

پارامتر	دمای متوسط محفظه‌ی احتراق (K)	دمای سطح لوله‌های رآکتور (K)
شرایط ایده‌آل [۱۵]	۱۳۰۰	۹۵۰
حل عددی حاضر	۹۰۰	۱۲۰۰-۱۳۰۰

جدول ۸: مقایسه سرعت‌های ورودی هوا - سوخت در حالت اولیه و حالت افزایش توان مشعل

Table 8. Comparison of primary inlet-fuel velocities and increasing power of burner

پارامتر	ورودی سوخت حالت اولیه - حالت افزایش توان	ورودی هوا حالت اولیه - حالت افزایش توان
U_z محوری (m/s)	۸ - ۵	۲۰ - ۱۰
U_θ مماسی (m/s)	۴ - ۲	۸ - ۴
U_r شعاعی (m/s)	۲۰ - ۵	۳۰ - ۲۰



شکل ۱۵: توزیع دما در مقطع $y = 0/6$ (m) و $0 < x < 1/5$ (m)

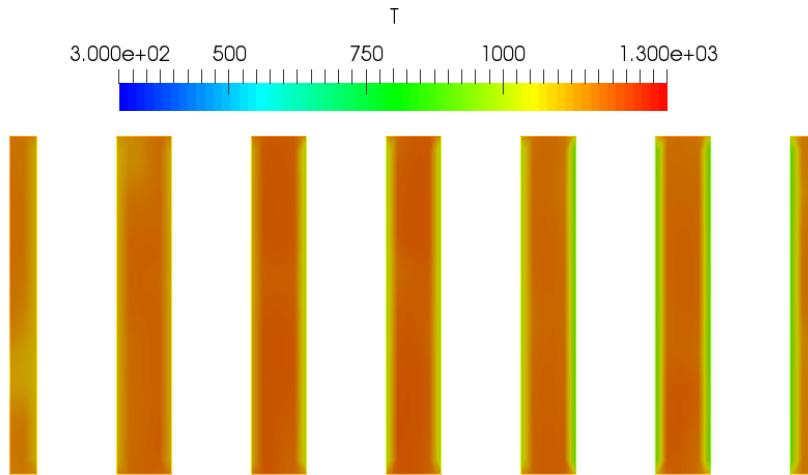
Fig. 15. Distribution of temperature on the surface of the refractory body after increasing the power

افزایش دما طبق مراجع می‌تواند تا ۱۶۰۰-۱۵۰۰ کلوین برای جسم نسوز واقع‌پذیر باشد. ایده مدنظر برای افزایش دمای سطح جسم نسوز، افزایش حرارت پخش شده روی سطح آن با افزایش شار حرارتی مشعل‌ها از طریق افزایش توان حرارتی مشعل است. با توجه به آن‌که برای افزایش توان مشعل‌ها افزایش دبی جریان سوخت مطرح است، با افزایش سرعت جریان سوخت توان حرارتی مشعل‌ها را بالا برده و به منظور انجام احتراق مناسب سرعت هوا را نیز با یک نسبت معین زیاد می‌کنیم. در جدول ۸ مقادیر سرعت در حالت اولیه و در حالت افزایش توان مشعل‌ها مقایسه شده‌اند. شکل ۱۵ توزیع دما روی سطح جسم نسوز را نشان می‌دهد که مطابق

شود. بنابراین با توجه به موارد اشاره شده، در ادامه کار حاضر به مطالعه پارامتری جهت بهبود توزیع دمای داخل کوره پرداخته خواهد شد.

افزایش توان مشعل‌ها با افزایش دبی ورودی:

همان‌طور که در قبل مشاهده شد، انتقال حرارت از سطح جسم نسوز به صورت تشعشعی، فاکتور یکنواختی توزیع دما داخل کوره را به همراه داشته اما جدول ۷ نشان می‌دهد که پارامترهای دمایی با حالت ایده‌آل فاصله داشته و لازم است متوسط دمایی داخل کوره بیشتر شود، از آنجا که شار حرارتی داخل کوره از سطح جسم نسوز، مطابق شکل ۱۵ در دمای متوسط ۸۵۰ کلوین رخ داده است، لازم است دمای سطح جسم نسوز افزایش یابد. این



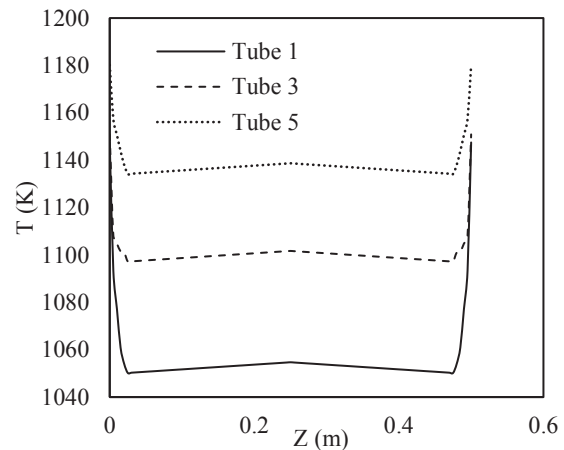
شکل ۱۶: توزیع دما در مقطع $y = 0.6$ (m) و $0 < x < 1.5$ (m)

Fig. 16. Distribution of temperature at $x = 1$ (m) and $0 < y < 1.2$ (m)

در نمودار شکل ۱۷ توزیع دمای اطراف لوله اول ($y = 0.1$ m)، لوله سوم ($y = 0.5$ m) و لوله پنجم ($y = 0.9$ m) در راستای طول لوله‌ها در حالت بعد از افزایش توان مشعل‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از شکل فوق مشخص است دما در اطراف هر سه لوله تقریباً یکنواخت و به دمای ایده‌آل ۱۲۰۰ کلوین نزدیک است. با توجه به آنکه به منظور ساده‌سازی واکنش کراکینگ، از شرط مرزی دمایی روی سطح لوله‌ها استفاده شده است، مشاهده می‌شود که در لوله اول که دمای مرزی آن نسبت به لوله‌های دیگر کمتر بوده، دمای سطح لوله نیز نسبت به سایر لوله‌ها کمتر می‌باشد و همین‌طور برای لوله سوم از لوله پنجم کمتر است. علت آن این است که دماهای مرزی همانند یک چاه حرارتی عمل می‌کنند و هرچه دما کمتر باشد، شار حرارتی بیشتری را جذب و افت دمای بیشتری نیز حاصل می‌شود. هم‌چنین در تمام نمودارها دما در طول لوله تا ارتفاع وسط ($z = 0.25$ m) افزایش و سپس کاهش می‌یابد و دلیل آن این است که مشعل‌ها در وسط جسم‌نوسوز و ارتفاع ۰/۲۵ متری قرار دارند و بدیهی است شار حرارتی در این ارتفاع ماکزیمم باشد.

۶- جمع‌بندی

به منظور شبیه‌سازی کوره کراکینگ، در ابتدا جهت صحت‌سنجی حلگر ایجاد شده به بررسی مسئله‌های معیار پرداخته شد. جهت بررسی پدیده‌هایی همچون انتقال حرارت توام از جریان هوا در یک کانال آزمایشگاهی و برای فرآیند احتراق غیر پیش‌آمیخته توربولانسی به همراه تشعشع گازها از مشعل



شکل ۱۷: توزیع دما در راستای طولی لوله‌ی اول، سوم و پنجم

Fig. 17. Temperature distribution along the first, third and fifth tubes

انتظار مشاهده می‌شود که شار حرارتی بیشتری به سطح جسم‌نوسوز منتقل شده که این موضوع سبب شده تا توزیع دمایی به نسبت یکنواخت با متوسط ۱۱۵۰ کلوین بر روی جسم‌نوسوز ایجاد شود که نسبت به حالت قبل ۲۰۰ کلوین افزایش دما را نشان می‌دهد که این موضوع به علت افزایش توان کوره‌ها در نتیجه افزایش میزان سوخت ورودی به مشعل‌ها می‌باشد. در شکل ۱۶ نیز توزیع دما در صفحه تقارن لوله‌ها بعد از افزایش توان مشعل‌ها آمده است و نشان می‌دهد یکنواختی دما ذکر شده در اطراف تمام لوله‌های راکتور وجود دارد و با افزایش ۳۰۰ کلوینی نسبت به حالت قبل به حالت ایده‌آل نزدیک شده است.

Newman, A. Odedra, Predictions of CO and NO_x emissions from steam cracking furnaces using GRI2. 11 detailed reaction mechanism—A CFD investigation, *Computers & Chemical Engineering*, 58 (2013) 68-83.

[7] S. Pilva, "Simulation of combustion chamber in Cracking Furnace to considering conjugate heat transfer in walls reactor" A thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering for the degree of Master of Science, Iran, Tarbiat modares University, 2016 (In Persian).

[8] E.J.F. Flame, Flame interaction and rollover solutions in ethylene cracking furnaces, *Gas*, (2013) 1.

[9] A. Savu, G. Lazea, P.-S. Agachi, Optimization and advanced control for thermal cracking processes, 20th European symposium on computer aided process engineering—ESCAPE, 20 (2010) 109-128

[10] C.E. Baukal Jr, The john zink hamworthy combustion handbook: Volume 1-Fundamentals, CRC press, 2012.

[11] C.E. Baukal Jr, The john zink hamworthy combustion handbook: Volume 3-Fundamentals, CRC press, 2014

[12] A. Masri, S. Pope, B. Dally, Probability density function computations of a strongly swirling nonpremixed flame stabilized on a new burner, *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(1) (2000) 123-131.

[13] A. Barletta, E.R. di Schio, G. Comini, P. D'Agaro, Conjugate forced convection heat transfer in a plane channel: Longitudinally periodic regime, *International Journal of Thermal Sciences*, 47(1) (2008) 43-51.

[14] G.D. Stefanidis, B. Merci, G.J. Heynderickx, G.B. Marin, CFD simulations of steam cracking furnaces using detailed combustion mechanisms, *Computers & chemical engineering*, 30(4) (2006) 635-649.

[15] G. Stefanidis, K. Van Geem, G. Heynderickx, G. Marin,

چرخشی استفاده شد. نتایج در هر دو مسئله با داده‌های تجربی مقایسه شده و تطابق مناسبی بین نتایج حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی وجود داشت. در راستای کار اصلی، به شبیه‌سازی عددی کوره کراکینگ نفتا پرداخته شد. برای این کار از نرم‌افزار متن‌باز این‌فوم و توسط حلگر جدیدی که در آن توسعه داده شده بود، استفاده شد. طبق نتایج بدست‌آمده اولیه فاکتور مهم تغییرات یکنواخت شار حرارتی در طول لوله و در نتیجه یکنواختی دما در اطراف لوله‌های رآکتور حاصل گشت اما چالش ایجاد شده پایین بودن دما در مقایسه با پارامترهای دمایی ایده‌آل در کوره‌های کراکینگ نفتا طبق نتایج تجربی گزارش شده بود که در ادامه کار با افزایش مومنتوم در ورودی مشعل‌ها که افزایش توان حرارتی مشعل‌ها را به همراه داشت. شار حرارتی منتقل شده به سطح جسم نسوز افزایش یافت و در نتیجه دمای داخل کوره با حفظ یکنواختی متوسط بالاتری را ایجاد نمود و شرایط کارکرد مناسب برای کوره کراکینگ مجهز به مشعل شعله مسطح بدست آمد.

منابع

- [1] S. Sadrameli, Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins: A state-of-the-art review I: Thermal cracking review, *Fuel*, 140 (2015) 102-115.
- [2] M. Masoumi, S. Sadrameli, J. Towfighi, A. Niaei, Simulation, optimization and control of a thermal cracking furnace, *Energy*, 31(4) (2006) 516-527.
- [3] G.J. Heynderickx, A.J. Oprins, G.B. Marin, E. Dick, Three-dimensional flow patterns in cracking furnaces with long-flame burners, *Aiche journal*, 47(2) (2001) 388-400.
- [4] X. Lan, J. Gao, C. Xu, H. Zhang, Numerical simulation of transfer and reaction processes in ethylene furnaces, *Chemical Engineering Research and Design*, 85(12) (2007) 1565-1579.
- [5] K.M. Van Geem, M.F. Reyniers, G.B. Marin, Challenges of modeling steam cracking of heavy feedstocks, *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP*, 63(1) (2008) 79-94.
- [6] G. Hassan, M. Pourkashanian, D. Ingham, L. Ma, P.

- industries La Canada, CA, 1998
- [19] D.C. Wilcox, Simulation of transition with a two-equation turbulence model, AIAA journal, 32(2) (1994) 247-255
- [20] J. Chomiak, A. Karlsson, Flame liftoff in diesel sprays, in: Symposium (International) on Combustion, Elsevier, 1996, pp. Vol. 26, No. 26-72557-72564, 71996.
- [21] W. Jones, R. Lindstedt, Global reaction schemes for hydrocarbon combustion, Combustion and flame, 73(3) (1988) 233-249.
- Evaluation of high-emissivity coatings in steam cracking furnaces using a non-grey gas radiation model, Chemical Engineering Journal, 137(2) (2008) 411-421.
- [16] A. Oyelami, S. Adejuyigbe, M. Waheed, Performance Evaluation of Recuperative Heat Exchanger in Rotary Furnace, in: Proceedings of the World Congress on Engineering, 2012
- [17] T. Poinso, D. Veynante, Theoretical and numerical combustion, RT Edwards, Inc., 2005
- [18] D.C. Wilcox, Turbulence modeling for CFD, DCW