

Numerical simulation of industrial gas turbine combustion chamber using FGM method

Taha Zavarian¹ , Masoud Eidi Attarzade² , Mohammad Javad Shahriari³

¹ Master's student, Aerospace Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: taha.zavarian@ut.ac.ir

² **Corresponding author**, Assistant Professor, Aerospace Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: eiattar@ut.ac.ir

³ PhD Student, Aerospace Engineering, Persian Gulf Turbine Company, Tehran, Iran. Email: mj.Shahriari@pgturbine.com

ARTICLE INFO

Article type

Research Article

Article history

Received 2026.04.24

Received in revised form 2026.06.15

Accepted 2026.06.15

Available online 2026.06.17

Keywords

Numerical simulation of combustion chamber
Gas turbine
FGM model

ABSTRACT

In this paper, a numerical simulation of an industrial gas turbine combustor has been performed using two combustion models, FGM (Flamelet Generated Manifold) and EBU (Eddy Break-Up) along with a k- ϵ turbulence model. The main objective is to investigate the effect of the combustion model selection on the average stagnation temperature and the outlet temperature profile of the combustor, which are important from the perspective of performance and turbine component life. The simulations have been performed using Simcenter STAR-CCM+ software and a 3D meshing including fluid and solid domains. The numerical results have been compared with the reference data of the turbine manufacturer. Also, the effect of two turbulence sub-models, k- ϵ Realizable and k- ϵ Standard, on the simulation accuracy has been investigated. The findings show that the FGM model predicts the outlet temperature cooler and closer to the reference distribution with less error than the EBU. Also, the combination of the Standard k- ϵ turbulence model with the FGM combustion model provides a better match with the reference data.

Introduction

The gas turbine combustor, as one of the critical components in a gas turbine, plays a decisive role in the overall performance, efficiency, and emissions of the system. The design and optimization of this section have always faced numerous challenges due to the complexities arising from the interaction of various phenomena such as turbulent flow, chemical reaction, heat transfer, and radiation. In the meantime, numerical simulation has been considered as a powerful tool for analyzing and better understanding these phenomena. In the field of combustion modeling, chemical simplification methods have been developed to reduce computational costs without losing accuracy. Evin et al. [1] introduced the flame-generated manifold (FGM) method, which allows for efficient simulation of premixed combustion by significantly reducing the computation time (up to 20 times) while maintaining high accuracy. This method was subsequently comprehensively reviewed and integrated by Evin et al. [2] and its ability to predict complex effects such as flame drag and pollutant emissions has been confirmed. Also, Swart et al. [3] investigated the preferential diffusion effects in methane-hydrogen mixtures using the FGM method in direct numerical simulation (DNS) and showed that the method is able to predict these effects with reasonable accuracy, while single-stage models are not able to do so. In a comparison of combustion models, Eagles and Brown [4] compared the performance of the FGM model with a two-stage global model and showed that although both models are able to predict combustion efficiency and temperature profiles, accurate prediction of recirculation zones still needs to be improved. Also, the study by de Souza et al. [5] evaluated the performance of the FGM model in RANS and LES frameworks and confirmed the stable results of the method in both frameworks.

The aim of this paper is to numerically simulate an industrial gas turbine combustor using two combustion models, EBU and FGM, and the turbulence models k- ϵ Realizable and k- ϵ Standard. In this paper, the effect of the choice of numerical combustion model and turbulence model on the mean and profile of the outlet temperature and the flow velocity field, which are very important from the performance and life of turbine components, has been investigated, and the results of four simulations with the mentioned models have been compared with the results of the gas turbine manufacturer [12].

Cite This Paper

Zavarian, Taha., Eidi Attarzade, Masoud., & Shahriari, Mohammad Javad. (2026). Numerical simulation of industrial gas turbine combustion chamber using FGM method. *Fuel and Combustion*, 19 (2), 39-57. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.588359.1461> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



Methodology

In this study, a sample combustion chamber of a 25 MW industrial gas turbine has been numerically simulated; the combustion chamber under study is of the can-annular type and consists of 16 cans as liners, and in order to reduce the computational cost, only one liner out of 16 liners and also a sector of one-sixteenth of the annular circumference around the liner have been considered. The fuel used in this gas turbine is methane gas and therefore does not pose a challenge from the perspective of injector modeling or fuel injection simulation.

Due to the geometric complexity of the combustion chamber, STAR-CCM+ software was used for high-quality mesh generation and numerical convergence. The $k-\varepsilon$ turbulence model was selected over $k-\omega$ SST for its greater accuracy in predicting flame location, and the paper aims to compare the Realizable and Standard sub-models. For combustion simulation, the EBU and FGM methods were applied. FGM reduces computational cost by creating a database from one-dimensional laminar flames and accurately models complex effects such as flame drag and preferential diffusion. In contrast, the EBU model assumes mixing rate as the limiting factor without considering chemical kinetics, making it faster and less expensive than advanced methods like FGM or EDC.

Results and Discussion

Different combustion models, depending on their operation and the degree of simplification of the chemical reaction, can have different results in terms of flame temperature, flame location, or even flame stability; therefore, in this article, the simulation results with the two EBU and FGM models are examined. The EBU method simulates combustion in an equilibrium manner and does not consider the effect of reaction kinetics; as a result, it is predicted that the flame temperature in the EBU model will be simulated higher than in the FGM model because, as mentioned, the FGM model, while considering the effect of chemical kinetics, uses chemical mechanisms to consider all intermediate reaction species and radicals in the simulation process, which reduces the flame temperature because the formation and consumption of intermediate reaction species consume the energy of the process and reduce the flame temperature. The error of the average stagnation temperature of the chamber in the simulation with the FGM model is less than that of the EBU model. To read the distribution of the outlet stagnation temperature in the radial direction, five probes are created from the bottom to the top of the outlet plane. The results of the FGM model are generally cooler and closer to the reference distribution, but due to the flame being further forward in the FGM model, the temperature of the gases exiting the chamber in the FGM model is higher than that of the EBU model in the middle of the outlet plane. In addition to the combustion model, other factors such as the turbulence model can also have a significant impact on the simulation accuracy. The effect of the turbulence model in simulating the combustion chamber has been investigated with the same combustion model, which, due to the lower error of the FGM model, has been considered as the default model for comparing the effects of turbulence models.

Different turbulence models can have different results depending on their operation and the way the Navier-Stokes equations are discretized, especially near the wall; in numerical simulation of the combustion chamber, the difference in turbulence models can have different results in simulating vortices inside the chamber, mixing of fuel and air, mixing of hot flow inside the liner with cool air flow around the liner that enters the liner in each part of the chamber, and pressure drop due to flow passing through the swirler and liner holes. Therefore, in this article, the simulation results with two $k-\varepsilon$ Realizable and $k-\varepsilon$ Standard models have been examined. The results of the simulations performed show that in the $k-\varepsilon$ Standard model, vortices and consequently the mixing of cold and hot flows as well as the mixing of fuel and air are simulated better than in the $k-\varepsilon$ Realizable model. The accuracy and ability of the turbulence model in simulating vortices has a direct impact on the temperature distribution along the liner because the flow velocity field indicates the mixing of fuel and air, as well as the mixing of the cold flow of the main holes and cooling on the liner with the hot flow inside the liner, both of which have a direct impact on the location of the flame and the hot temperature spots inside the liner. Given the better simulation of the mixing of hot and cold flows in the $k-\varepsilon$ Standard model, it can be expected that the temperature distribution inside the liner and also at the outlet surface of the liner will have a lower temperature than the simulation with the $k-\varepsilon$ Realizable model. The temperature distribution in the simulation with the $k-\varepsilon$ Standard model is more uniform and the overall temperature inside the liner is cooler. The outlet temperature profile simulated by the $k-\varepsilon$ Standard model is cooler

and closer to the profile provided by the reference. Also, the average liner outlet stagnation temperature in the simulation with the k- ϵ Standard has about four percent less error than the k- ϵ Realizable model.

Considering all the results presented, such as temperature and velocity at different sections, it can be said that the combination of the k- ϵ Standard turbulence model with the FGM combustion model can simulate the operating conditions of the gas turbine combustor with appropriate accuracy.

Conclusions

In this study, numerical simulation of the combustion chamber of an industrial gas turbine was performed with two combustion models, FGM and EBU, and the k- ϵ turbulence model. The results showed that the FGM model is more accurate in predicting the average outlet stagnation temperature than the EBU. Also, the outlet temperature profile obtained from the FGM model is closer to the reference distribution and provides a cooler temperature.

In examining the effect of the turbulence model, it was found that the k- ϵ Standard model has a better ability to simulate eddies, mixing of cold and hot flows, and a more uniform temperature distribution than the k- ϵ Realizable model. The average outlet stagnation temperature in the k- ϵ Standard model was calculated to be 1557.2 Kelvin (1% error) and in the k- ϵ Realizable model to be 1656.2 Kelvin (5.26% error), indicating the superiority of the k- ϵ Standard model.

Examination of the outlet chemical species showed that the most produced pollutant was NO, which is due to the high temperature of the combustion chamber. Also, the temperature distribution on the liner wall showed that the flame concentration occurs near the wall and before the first row of holes in the first zone of the chamber, which can reduce the liner life. Finally, it is suggested that by modifying the swirler and improving the DLE process, the flame will move away from the wall and the NO production rate will be reduced.

In summary, the combination of the k- ϵ Standard turbulence model with the FGM combustion model is considered a suitable option for accurate simulation of industrial gas turbine combustion chambers.

CRedit Author Statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of Interest

Authors declare no conflict of interest.

References

- [1] J. A. Van Oijen, F. A. Lammers, and L. P. H. De Goey, "Modeling of complex premixed burner systems by using flamelet-generated manifolds," *Combustion and Flame*, vol. 127, no. 3, pp. 2124-2134, 2001.
- [2] J. A. Van Oijen, A. Donini, R. J. M. Bastiaans, J. H. M. ten Thijs Boonkcamp, and L. P. H. De Goey, "State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 57, pp. 30-74, 2016.
- [3] J. A. M. De Swart, R. J. M. Bastiaans, J. A. Van Oijen, L. P. H. De Goey, and R. S. Cant, "Inclusion of preferential diffusion in simulations of premixed combustion of hydrogen/methane mixtures with flamelet generated manifolds," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 85, no. 3, pp. 473-511, 2010.
- [4] R. L. G. M. Eggels and C. T. Brown, "Comparison of numerical and experimental results of a premixed DLE gas turbine combustor," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 78514, p. V002T02A032, 2001.
- [5] T. Cardoso de Souza, R. J. M. Bastiaans, B. J. Geurts, and L. P. H. De Goey, "LES and RANS of premixed combustion in a gas-turbine like combustor using the flamelet generated manifold approach," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 54624, pp. 1119-1127, 2011.
- [6] H. Mongia, "Gas turbine combustor liner wall temperature calculation methodology," in *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, p. 3267, 2001.
- [7] F. L. G. Dias, M. A. R. do Nascimento, and L. de O. Rodrigues, "Reference area investigation in a gas turbine combustion chamber using CFD," *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 73-82, 2014.
- [8] N. Rasooli, S. Besharat Shafiei, and H. Khaledi, "Combination of 1D code and CFD for performance analysis of a silo type gas turbine combustor," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 43970, pp. 1015-1023, 2010.
- [9] V. Rajabi and E. Amani, "A computational study of swirl number effects on entropy generation in gas turbine combustors," *Heat Transfer Engineering*, vol. 40, no. 3-4, pp. 346-361, 2019.
- [10] C. Zong, Y. Lyu, D. Guo, C. Li, and T. Zhu, "Experimental and numerical study on emission characteristics of the double annular swirler under different pilot fuel ratios," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 51067, p. V04BT04A001, 2018.
- [11] S. Karuppanan, B. Mehul, G. Sivaramakrishna, R. D. Navindgi, and N. Muthuveerappan, "CFD analyses of flow in a gas turbine combustor swirl cup," in *Gas Turbine India Conference*, vol. 58509, p. V001T04A009, 2017.
- [12] "Gas turbine unit GTD25HU80.09 engine DU80 combustion chamber characteristics," *State Gas Turbine Research & Production Complex "ZORYA"-"MASHPROEKT"*, 89995IIP3C-1-2-3.



شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز صنعتی به روش FGM

طاها زواریان^۱، مسعود عیدی عطارزاده^۲، محمد جواد شهریاری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، تهران، tahazavarian@ut.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، تهران، eidiattar@ut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، شرکت توربین خلیج فارس، تهران، mj.Shahriari@pgturbine.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله	در این مقاله، شبیه‌سازی عددی یک محفظه احتراق توربین گاز صنعتی با استفاده از دو مدل احتراقی
مقاله پژوهشی	FGM (Flamelet Generated Manifold) و EBU (Eddy Break-Up) همراه با مدل توربولانسی $k-\epsilon$ انجام
تاریخچه مقاله	شده است. هدف اصلی، بررسی تأثیر انتخاب مدل احتراقی بر میانگین دمای سکون و پروفیل دمای خروجی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۴	محفظه احتراق است که از دیدگاه عملکردی و عمر قطعات توربین حائز اهمیت است. شبیه‌سازی‌ها با
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵	استفاده از نرم‌افزار Simcenter STAR-CCM+ و شبکه‌بندی سه‌بعدی شامل دامنه سیال و جامد انجام شده
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵	است. نتایج عددی با داده‌های مرجع شرکت سازنده توربین مقایسه شده است. همچنین، اثر دو زیرمدل
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷	توربولانسی $k-\epsilon$ Realizable و $k-\epsilon$ Standard بر دقت شبیه‌سازی بررسی شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد
کلیدواژه‌ها:	که مدل FGM با خطای کمتر نسبت به EBU، دمای خروجی را خنک‌تر و نزدیک‌تر به توزیع مرجع پیش‌بینی
شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق	می‌کند. همچنین، ترکیب مدل توربولانسی $k-\epsilon$ Standard با مدل احتراقی FGM تطابق بهتری با داده‌های
توربین گاز	مرجع دارد.
مدل FGM	

مقدمه

محفظه احتراق توربین گاز به عنوان یکی از اجزای حیاتی در توربین گاز، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد کلی، بازده و آلایندگی سیستم ایفا می‌کند. طراحی و بهینه‌سازی این بخش به دلیل پیچیدگی‌های ناشی از برهم‌کنش پدیده‌های مختلفی از جمله جریان آشفته، احتراق شیمیایی، انتقال حرارت و تشعشع، همواره با چالش‌های متعددی روبرو بوده است. در این میان، شبیه‌سازی عددی به عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل و درک بهتر این پدیده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در حوزه مدل‌سازی احتراق، روش‌های ساده‌سازی شیمیایی به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی بدون از دست دادن دقت، توسعه یافته‌اند. اوین و همکاران [۱] روش مانفیولد تولیدشده توسط شعله^۱ (FGM) را معرفی کردند که با کاهش چشمگیر زمان محاسبات (تا ۲۰ برابر) و حفظ دقت بالا، امکان شبیه‌سازی کارآمد احتراق پیش‌آمیخته را فراهم می‌سازد. این روش در ادامه توسط اوین و همکاران [۲] به صورت جامع مرور و یکپارچه‌سازی شد و توانایی آن در پیش‌بینی اثرات پیچیده‌ای مانند کشش شعله و انتشار آلاینده‌ها تأیید شده است. همچنین، سوارت و همکاران [۳] با استفاده از روش FGM در شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)، اثرات انتشار ترجیحی^۲ در مخلوط‌های متان-هیدروژن را بررسی کردند و نشان دادند که این روش قادر است با دقت مناسبی این اثرات را

^۱ Flamelet Generated Manifold^۲ Preferential Diffusion Effects

Cite This Paper

Zavarian, Taha., Eidi Attarzade, Masoud., & Shahriari, Mohammad Javad. (2026). Numerical simulation of industrial gas turbine combustion chamber using FGM method. Fuel and Combustion, 19 (2), 39-57. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.588359.1461> (In Persian)

ارجاع‌دهی به این مقاله



پیش‌بینی نماید، در حالی که مدل‌های تک مرحله‌ای قادر به چنین کاری نیستند. در مقایسه مدل‌های احتراقی، ایگلز و براون [۴] عملکرد مدل FGM را با مدل جهانی دو مرحله‌ای مقایسه کردند و نشان دادند که اگرچه هر دو مدل قادر به پیش‌بینی راندمان احتراق و پروفیل دما هستند، اما پیش‌بینی دقیق نواحی بازچرخش همچنان نیاز به بهبود دارد. همچنین، پژوهش دو سوزا و همکاران [۵] عملکرد مدل FGM را در چارچوب‌های RANS و LES مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج پایدار این روش را در هر دو چارچوب تأیید نمودند.

در زمینه مدل‌سازی عددی احتراق، مدل‌های مبتنی بر آشفتگی نظیر Eddy Dissipation (ED) و Eddy Break-Up (EBU) به‌طور گسترده‌ای در پژوهش‌های مختلف به کار رفته‌اند. برای نمونه، مونگیا [۶] و دیاس و همکاران [۷] از مدل ED برای شبیه‌سازی احتراق غیرپیش‌آمیخته بهره برده‌اند که در آن نرخ واکنش توسط فرآیندهای اختلاط آشفته کنترل می‌شود. به‌طور مشابه، رسولی و همکاران [۸] نیز در تحلیل عملکرد یک محفظه احتراق سیلویی از مدل EBU استفاده نموده‌اند که بر پایه اصول مشابهی استوار است. در مطالعاتی نظیر پژوهش رجبی و امانی [۹]، این مدل برای بررسی تأثیر عدد چرخش بر تولید آنتروپی در محفظه احتراق به کار گرفته شد. همچنین، زونگ و همکاران [۱۰] با استفاده از یک مدل ترکیبی از نرخ محدود و ED، اثر نسبت سوخت پایلوت بر احتراق و انتشار آلاینده‌ها را مورد مطالعه قرار دادند که نشان‌دهنده قابلیت این دسته از مدل‌ها در پدیده‌های پیچیده احتراقی در شرایط عملیاتی مختلف است. این مدل‌ها به دلیل پایداری و هزینه محاسباتی نسبتاً پایین، همچنان به عنوان گزینه‌ای رایج در شبیه‌سازی‌های مهندسی محفظه‌های احتراق صنعتی مورد توجه هستند.

کاروپانان و همکاران [۱۱] به بررسی عددی میدان جریان در یک سویپرل محفظه احتراق توربین گاز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌پردازند. پژوهش مذکور با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent و مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ Realizable به تحلیل شش پیکربندی مختلف سویپرل می‌پردازد که در آن‌ها نسبت دبی جرمی سویپرلر اولیه به ثانویه و نسبت سطح ورودی به گلوگاه ونتوری تغییر یافته است. نتایج نشان می‌دهد که این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر میدان سرعت (محوری، مماسی و شعاعی) و همچنین اندازه و شکل ناحیه بازچرخانی مرکزی (CTRZ) دارند. همچنین مشخص شد که ناحیه نزدیک به خروجی سویپرل تحت تأثیر سویپرلر اولیه است، در حالی که جریان در محفظه احتراق عمدتاً توسط سویپرلر ثانویه کنترل می‌شود. این مطالعه داده‌های طراحی ارزشمندی برای بهینه‌سازی سویپرلر در کاربردهای توربین گاز فراهم می‌کند.

هدف این مقاله، شبیه‌سازی عددی یک نمونه محفظه احتراق توربین گاز صنعتی با استفاده از دو مدل احتراقی EBU و FGM و مدل‌های توربولانسی $k-\varepsilon$ Realizable و $k-\varepsilon$ Standard است. در این مقاله، تأثیر انتخاب مدل عددی احتراق و مدل توربولانسی بر میانگین و پروفیل دمای خروجی و میدان سرعت جریان که از جنبه عملکردی و عمر قطعات توربین بسیار حائز اهمیت است بررسی شده است و نتایج چهار شبیه‌سازی با مدل‌های ذکرشده نسبت به نتایج شرکت سازنده [۱۲] توربین گاز مقایسه شده است.

مشخصات محفظه احتراق

در این پژوهش، یک نمونه محفظه احتراق توربین گاز صنعتی ۲۵ مگاوات به روش عددی مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است؛ محفظه احتراق مورد بررسی از نوع قوطی-حلقوی^۱ بوده و شامل ۱۶ قوطی به عنوان لاینر است که به جهت کاهش هزینه محاسباتی فقط یک لاینر از ۱۶ لاینر و همچنین یک قطاع یک شانزدهم از محیط حلقوی اطراف لاینر در نظر گرفته شده

^۱ Can-Annular

است؛ جنس این لاینرها، آلیاژ Hynes 230 است و ضخامت ورق آن ۱/۵ میلی متر است. در جدول ۱ مشخصات عملکردی محفظه احتراق که توسط شرکت سازنده منتشر شده است، مشاهده می شود. سوخت مورد استفاده در این توربین گاز، گاز متان بوده و به همین جهت چالشی از منظر مدل سازی انژکتور یا شبیه سازی پاشش سوخت ندارد. با توجه به مشخصات عملکردی محفظه احتراق، مطابق جدول ۲، شرایط مرزی ورودی و خروجی برای شبیه سازی عددی روی دامنه های محاسباتی لحاظ شده اند؛ برای دیواره ها شرط بدون لغزش در نظر گرفته شده است و در این مقاله از پدیده تشعشع صرف نظر شده است. برای به دست آوردن میزان آلاینده های این محفظه احتراق، از مدل NOx حرارتی^۱ نیز استفاده شده است. اما به دلیل ماهیت سوخت مورد استفاده در این محفظه احتراق (گاز متان) از سایر مدل های NOx استفاده نشده است چرا که NOx ناشی از سوخت^۲ برای شرایطی است که در سوخت اتم نیتروژن حضور داشته باشد.

جدول ۱- شرایط عملکردی محفظه احتراق

Table 1-The functional conditions of the combustion chamber

Quantity	Value	Unit
Inlet stagnation temperature	743.5	K
Inlet stagnation pressure	2.15	MPa
Outlet gas stagnation temperature	1573.5	K
Outlet stagnation pressure	2.06	MPa
Outlet mass flow rate	67.4	kg/s
Fuel pressure at nominal power	2.85	MPa

جدول ۲- شرایط مرزی

Table 2-Boundary conditions

Title	Type of boundary condition	Parameter	Value	unit
Air inlet	Mass flow inlet	Mass flow	4.11875	kg/s
		Total temperature	743.5	K
Fuel inlet	Mass flow inlet	Mass flow	0.0955	kg/s
		Total temperature	300	K
Outlet	Pressure outlet	Pressure	20.45	bar

مدلسازی عددی

با توجه به پیچیدگی های هندسی این محفظه احتراق بخصوص، از نرم افزار Simcenter STAR-CCM+ استفاده شد که در زمینه تولید شبکه محاسباتی و کیفیت سلول ها و همچنین در زمینه همگرایی روند حل عددی جزء نرم افزارهای تجاری مدرن و بسیار توانمند محسوب می شود.

با توجه به نتایج پژوهش های پیشین صورت گرفته بر روی محفظه احتراق، مدل توربولانسی k-ε مدل مناسبی برای شبیه سازی آشفتگی در محفظه احتراق محسوب می شود هر چند که در میان مقالات بررسی شده سایر مدل های توربولانسی نظیر k-ω SST نیز مورد استفاده قرار گرفته اند اما با بررسی های صورت گرفته، مدل k-ε نتایج مناسب تری نسبت به مدل k-ω SST از منظر پیشبینی محل شعله دارد؛ یکی از اهداف این مقاله، مقایسه تفاوت و نتایج دو زیر مجموعه مدل k-ε که در مقالات مختلف بررسی شده اند، یعنی دو مدل k-ε Standard و k-ε Realizable است.

¹ Thermal NOx

² Fuel NOx

برای شبیه‌سازی احتراقی، از دو روش EBU و FGM بهره گرفته شده است. مانفیولد تولیدشده توسط شعله یا FGM که توسط گروه فناوری احتراق دانشگاه آیندهوون [۲] توسعه یافته، راه‌حلی کارآمد و دقیق برای مدل‌سازی احتراق پیش‌آمیخته و تا حدی پیش‌آمیخته است. ایده اصلی FGM ترکیب مزایای روش‌های کاهش شیمیایی و مدل‌های شعله آرام است که با ایجاد یک مانفیولد چندبعدی از پیش محاسبه‌شده از طریق حل مجموعه‌ای از شعله‌های آرام یک بعدی صورت می‌گیرد. این مانفیولد حالت‌های ترموشیمیایی مانند دما، گونه‌های شیمیایی و نرخ واکنش را به عنوان توابعی از چند متغیر کنترل کننده مانند متغیر پیشرفت، آنتالپی و کسر جرمی عناصر ذخیره می‌کند. در حین شبیه‌سازی عددی، تنها معادلات انتقال برای این متغیرهای کنترل کننده حل می‌شوند و سایر مقادیر لازم مستقیماً از پایگاه داده FGM استخراج می‌شوند که این امر باعث کاهش چشمگیر هزینه محاسباتی می‌شود. پژوهش‌های صورت گرفته روی این روش نشان می‌دهند که FGM با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی اثرات پیچیده‌ای مانند کشش و انحنای شعله است. در غیاب انتشار ترجیحی، اثر مستقیم کشش بر نرخ واکنش شیمیایی ناچیز است. همچنین انتشار ترجیحی که با تغییر در آنتالپی و ترکیب عنصری در لایه پیش‌گرمایش، نرخ سوختن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، با افزودن ابعاد بیشتر به مانفیولد مدل می‌شود. این روش همچنین اتلافات حرارتی را با افزودن آنتالپی به عنوان متغیر کنترل کننده و احتراق تا حدی پیش‌آمیخته را با افزودن کسر مخلوط به عنوان متغیر کنترل کننده پوشش می‌دهد. این روش با موفقیت در شبیه‌سازی‌های مستقیم عددی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل‌های RANS برای شعله‌های آشفته به کار رفته و عملکرد دقیق و کارآمدی را در پیش‌بینی ساختار شعله، سرعت سوختن و انتشار آلاینده‌ها نشان داده است [۲]. مدل EBU یک مدل احتراقی است که با در نظر گرفتن سرعت بسیار زیاد سینتیک واکنش نسبت به سرعت اختلاط جریان، عامل محدود کننده فرایند شبیه‌سازی احتراق را سرعت اختلاط می‌داند و در نتیجه بدون در نظر گرفتن سرعت سینتیک واکنش شیمیایی بین سوخت و اکسنده، فرایند احتراق را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل به دلیل عدم نیاز به جدول اولیه یا مکانیزم احتراق نسبت به روش‌هایی نظیر FGM و Flamelet سریع‌تر و آسان‌تر بوده و نسبت به روش‌های مستقیم شبیه‌سازی احتراق نظیر EDC نیز بسیار سریع و کم هزینه‌تر عمل می‌کند چرا که عملاً از حل معادلات پیچیده سینتیک شیمیایی صرف نظر کرده و احتراق را صرفاً به صورت تعادلی شبیه‌سازی می‌کند.

شبکه محاسباتی

برای تحلیل عددی محفظه احتراق مورد بررسی، یک شبکه محاسباتی بی‌سازمان از نوع پلی‌هدرال^۱ روی دامنه حل ایجاد شده است و به جهت مدل‌سازی لایه مرزی، تعداد ۱۲ لایه سلول باسازمان روی دیواره‌های محفظه احتراق ایجاد شد و مطابق شکل ۱، با توجه به روند استقلال حل از شبکه محاسباتی، تعداد کل سلول‌های محاسباتی در حدود ۱۱/۶ میلیون سلول و پارامتر y^+ به میزان ۱/۸ انتخاب شد. شکل ۲ نشان دهنده مقطعی از شبکه محاسباتی تولید شده است.

^۱ Polyhedral

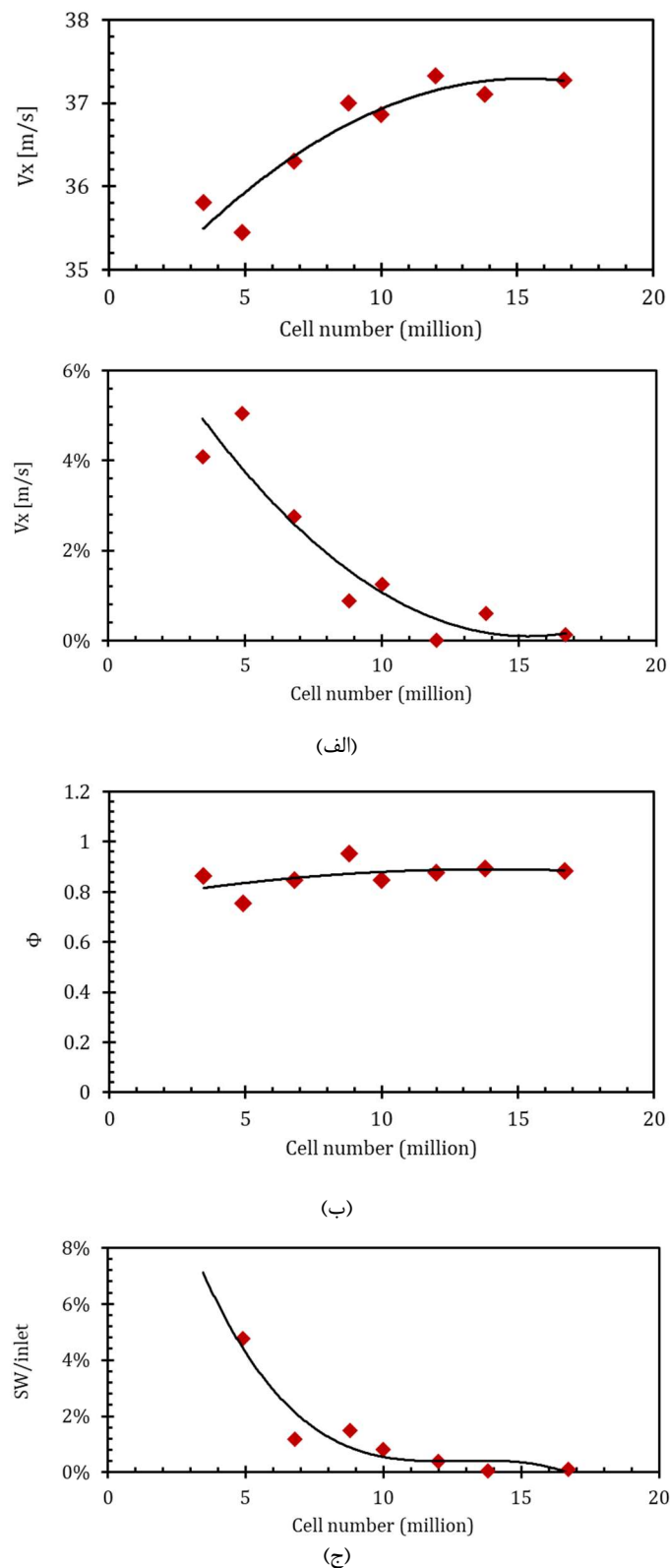


Figure 1- The effect of increasing the number of computational grid cells on (a): axial flow velocity, (b): equivalence ratio in the recirculation zone, (c): ratio of the flow rate passing through the swirler to the total flow rate of the chamber.

شکل ۱- تأثیر افزایش تعداد سلول شبکه محاسباتی بر (الف): سرعت محوری جریان (ب): نسبت هم ارزی در ناحیه بازچرخش (ج): نسبت دبی عبوری از سویپرلر به دبی کل محفظه

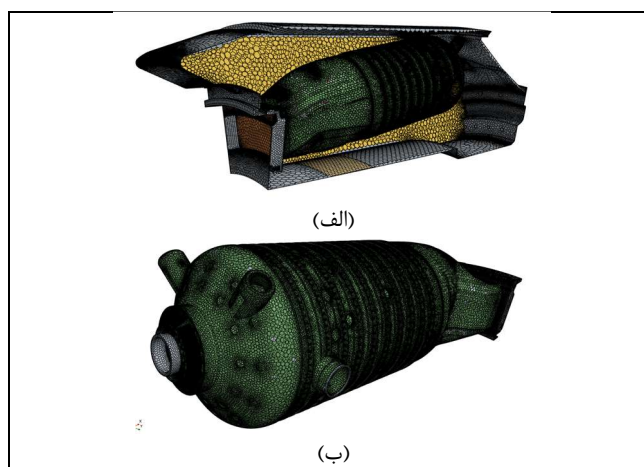


Figure 2- Three-dimensional computational grid generated for the fluid domain b: Three-dimensional computational grid generated for the solid domain

شکل ۲- الف: شبکه محاسباتی سه بعدی تولید شده برای دامنه سیال ب: شبکه محاسباتی سه بعدی تولید شده برای دامنه جامد

نتایج

هدف از این پژوهش، بررسی اثر مدل احتراقی و مدل توربولانسی و همچنین مقایسه بین دو مدل احتراقی و دو مدل توربولانسی بوده است، از این رو، نتایج دو مدل احتراقی FGM و EBU (با مدل توربولانسی ثابت) و همچنین دو مدل $k-\varepsilon$ Realizable و $k-\varepsilon$ Standard (با مدل احتراقی ثابت) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

برای بررسی تاثیر مدل احتراقی و مدل توربولانسی بر نتایج از جمله دما و میدان سرعت جریان، چهار شبیه‌سازی به صورتی که در جدول ۳ قابل مشاهده است انجام شده. Case1 و Case2 با هدف مقایسه اثر تغییر مدل احتراقی (با فرض ثابت بودن سایر پارامترها از جمله شرایط مرزی و مدل توربولانسی) و Case3 و Case4 با هدف مقایسه اثر مدل توربولانسی بر توزیع دما و میدان سرعت جریان (با فرض ثابت بودن شرایط مرزی و مدل احتراقی) شبیه‌سازی شده‌اند.

جدول ۳- مشخصات شبیه‌سازی‌های انجام شده

Table 3- The specifications of the performed simulations

Row	Title	Turbulence Model	Combustion Model
1	Case 1	$k-\varepsilon$ Realizable	EBU
2	Case 2	$k-\varepsilon$ Realizable	FGM
3	Case 3	$k-\varepsilon$ Standard	FGM

برای مقایسه بهتر هر یک از زوج مدل‌ها، نتایج توزیع دمای خروجی در راستای شعاع، کانتور دما، کانتور سرعت و خطوط جریان در مقاطع مختلف لاینر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل ۳، هشت مقطع در طول لاینر و یک مقطع در صفحه خروجی لاینر ایجاد شده است؛ هشت مقطع ایجاد شده در طول لاینر به ترتیب: (۱) بلافاصله بعد از سوپرلر، (۲) بعد از دیفیوزر، (۳) قبل از اولین ردیف سوراخ‌های ناحیه اول، (۴) و (۵) روی ردیف اول و دوم سوراخ‌های ناحیه اولیه، (۶) قبل از سوراخ‌های ناحیه ثانویه^۱، (۷) روی سوراخ‌های ناحیه ثانویه و در نهایت (۸) روی سوراخ‌های ناحیه دیلوشن^۲ ایجاد شده‌اند. کانتورهای دما و سرعت روی هر کدام از این مقاطع در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

¹ Secondary zone

² Dilution zone

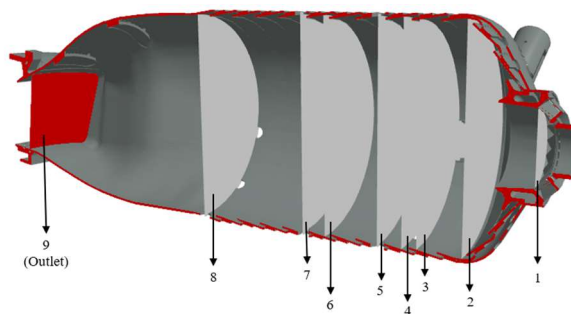


Figure 3- The location of different sections created on the liner

شکل ۳: محل قرارگیری مقاطع مختلف ایجاد شده روی لاینر

مقایسه مدل های احتراقی

در شبیه سازی محفظه احتراق توربین گاز، انتخاب مدل احتراقی نقش اساسی بر روی دقت و صحت شبیه سازی و نتایج آن ایفا می کند؛ مدل های احتراقی مختلف با توجه به نحوه عملکردشان و میزان ساده سازی واکنش شیمیایی می توانند نتایج متفاوتی از جهت دمای شعله، محل قرارگیری شعله یا حتی پایداری شعله داشته باشند، ازین رو در این مقاله نتایج شبیه سازی با دو مدل EBU و FGM مورد بررسی قرار گرفته اند. روش EBU احتراق را به صورت تعادلی شبیه سازی کرده و اثر سینتیک واکنش را در نظر نمی گیرد؛ در نتیجه دما شعله را بیشتر محاسبه کرده و شعله به سمت بالادست حرکت می کند، مدل FGM با استفاده از مکانیزم های شیمیایی، تاثیر سینتیک شیمیایی را در نظر می گیرد. قابل مشاهده است که در مقطع میانی از لاینر که در شکل ۴ قابل مشاهده است، شعله EBU داغ تر و جلوتر از شعله FGM است. علاوه بر این، در یک مقاطع دیگر که در شکل ۵ قابل مشاهده است، ردیف های مختلف سوراخ روی لاینر و اثر ورود جریان خنک و اختلاط آن با شعله مشاهده می شود که در این توزیع ها هم مجدد دمای بالاتر شعله EBU مشاهده می شود.

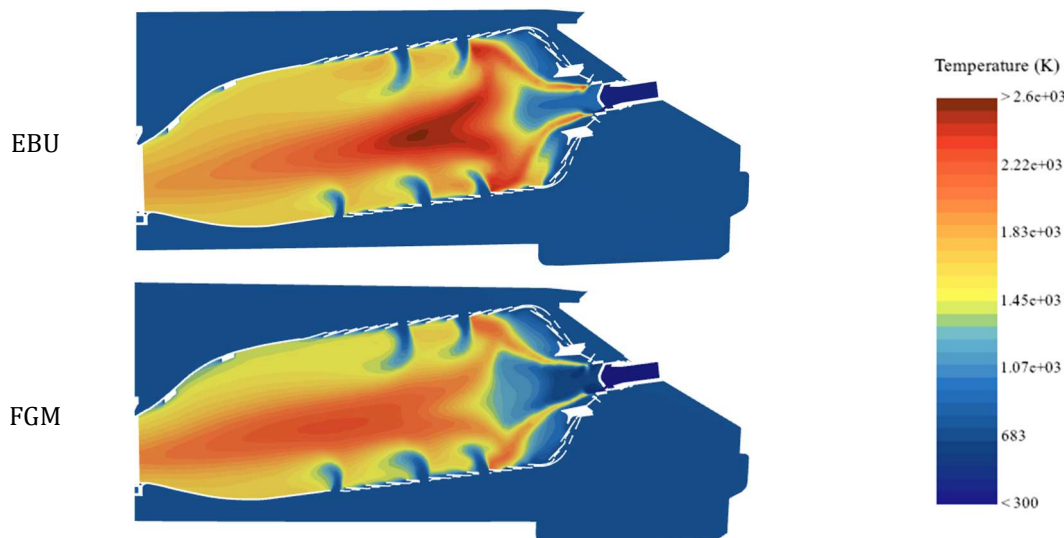


Figure 4- Temperature contour inside the combustion chamber in the mid-plane (a) EBU and (b) FGM

شکل ۴: کانتور دمای درون محفظه احتراق در صفحه میانی (الف) EBU و (ب) FGM

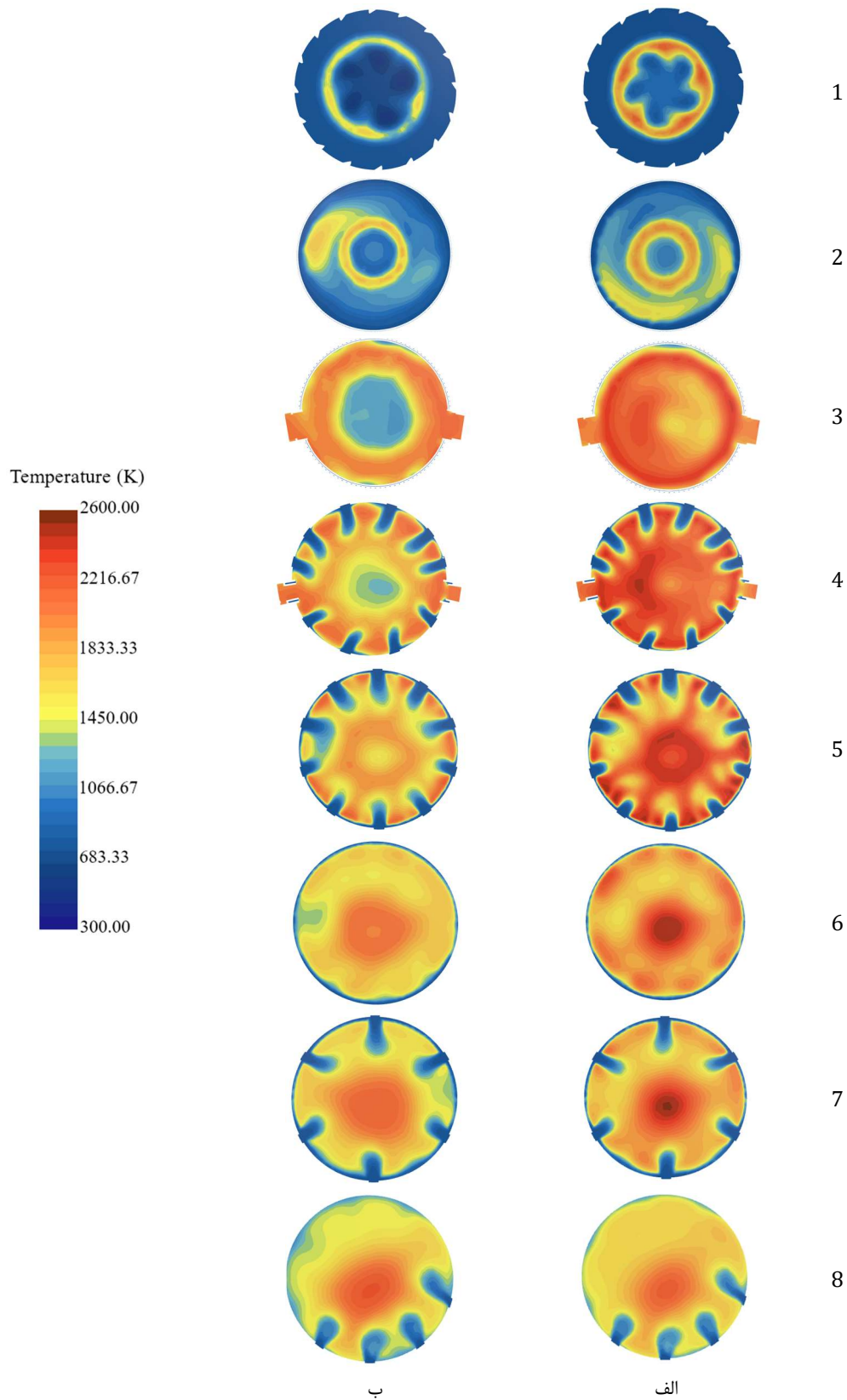


Figure 5- Temperature contour inside the combustion chamber at different sections (a) EBU and (b) FGM

شکل ۵: کانتور دمای درون محفظه احتراق در مقاطع مختلف (الف) EBU و (ب) FGM

با توجه به جدول ۴، خطای دمای سکون میانگین محفظه در شبیه‌سازی با مدل FGM، کمتر از مدل EBU است. برای خواندن توزیع دمای سکون خروجی در راستای شعاع مطابق شکل ۶ پنج پراب از پایین تا بالای صفحه خروجی ایجاد شده است، توزیع دمای سکون نشان داده شده در شکل ۷، میانگین مقادیر این پنج پراب است. نتایج مدل FGM به طور کلی خنک‌تر و نزدیک‌تر به توزیع مرجع است اما با توجه به جلوتر بودن شعله در مدل FGM که در شکل ۴ و شکل ۵ قابل مشاهده است، در میانه‌ی صفحه‌ی خروجی، دمای گازهای خروجی از محفظه در مدل FGM بیشتر از مدل EBU به دست آمده است. علاوه بر مدل احتراقی، عوامل دیگری نظیر مدل توربولانسی نیز در دقت شبیه‌سازی تاثیر قابل توجهی می‌توانند داشته باشند که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. با توجه به نتایج موجود در جدول ۴، بررسی اثر مدل توربولانسی در شبیه‌سازی محفظه احتراق با مدل احتراقی یکسان انجام شده است که به دلیل خطای کمتر مدل FGM، این مدل به عنوان مدل پیشفرض برای مقایسه تاثیر مدل‌های توربولانسی در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- میانگین دمای سکون خروجی

Table 4- The average exit stagnation temperature

	Reference	FGM	EBU
Outlet Total Temperature [K]	1573	1656.2	1670.5
Error [%]	-	5.2	6.1

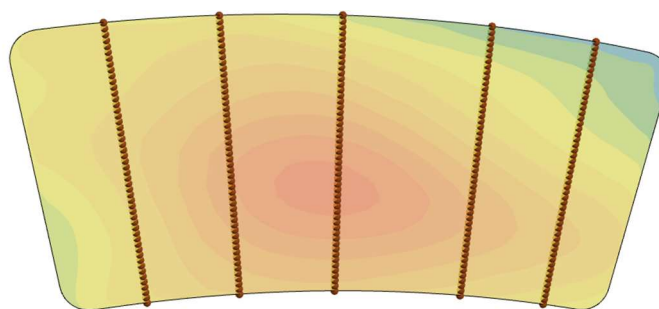


Figure 6- The probes created for reading the exit stagnation temperature distribution in the radial direction

شکل ۶- پراب‌های ایجاد شده برای خواندن توزیع دمای سکون خروجی در راستای شعاع

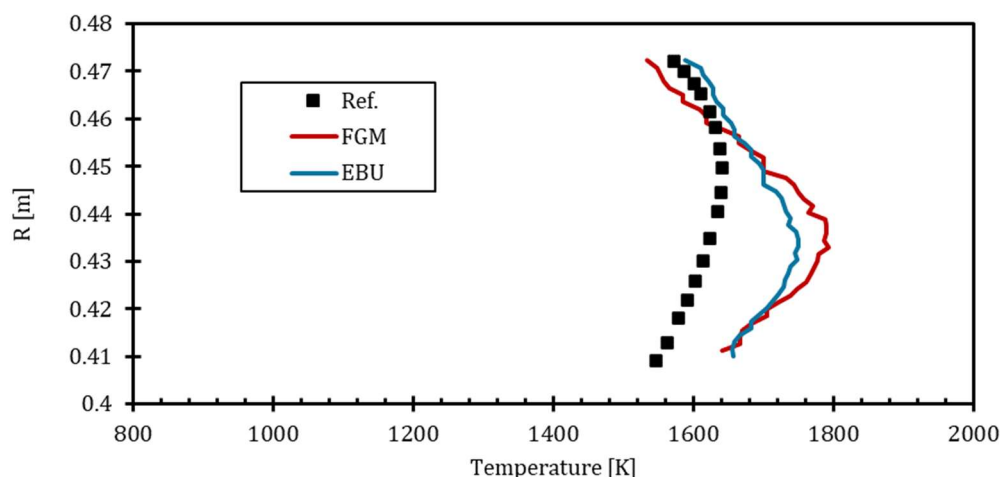


Figure 7- The outlet temperature profile obtained by the FGM and EBU models

شکل ۷- پروفیل دمای خروجی به دست آمده به وسیله مدل‌های FGM و EBU

بررسی مدل توربولانسی

در شبیه‌سازی عددی، انتخاب مدل توربولانسی نقش اساسی بر روی دقت و صحت شبیه‌سازی و نتایج آن ایفا می‌کند؛ مدل‌های توربولانسی مختلف با توجه به نحوه عملکردشان و نحوه گسسته‌سازی معادلات ناویر استوکس مخصوصاً نزدیک دیواره می‌توانند نتایج متفاوتی داشته باشند؛ در شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق، تفاوت مدل‌های توربولانسی می‌تواند در شبیه‌سازی گردابه‌های داخل محفظه، اختلاط سوخت و هوا، اختلاط جریان داغ داخل لاینر با جریان هوای خنک اطراف لاینر که در هر بخش از محفظه وارد لاینر می‌شود و در افت فشار ناشی از عبور جریان از سویپرلر و سوراخ‌های لاینر نتایج متفاوتی را در بر داشته باشد، ازین رو در این مقاله نتایج شبیه‌سازی با دو مدل $k-\varepsilon$ Standard و $k-\varepsilon$ Realizable مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند که در مدل $k-\varepsilon$ Standard، گردابه‌ها و در نتیجه اختلاط جریان سرد و گرم و همچنین اختلاط سوخت و هوا نسبت به مدل $k-\varepsilon$ Realizable بهتر شبیه‌سازی می‌شوند، در شکل ۸، اندازه وورتیسیته^۱ که بیانگر شدت گردابه‌های جریان است برای دو مدل توربولانسی مقایسه شده است. در شکل ۹ در مقاطع دو تا هفت و همچنین شکل ۱۰ تفاوت شبیه‌سازی گردابه‌ها و چرخش جریان توسط بین دو مدل کاملاً مشخص است. دقت و توانایی مدل توربولانسی در شبیه‌سازی گردابه‌ها، تاثیر مستقیم بر توزیع دما در طول لاینر دارد زیرا میدان سرعت جریان بیانگر نحوه اختلاط سوخت و هوا و همین‌طور اختلاط جریان سرد سوراخ‌های اصلی و خنک‌کاری روی لاینر با جریان داغ داخل لاینر است که هر دو مورد یاد شده اثر مستقیم بر محل قرارگیری شعله و نقاط دمایی داغ داخل لاینر دارند.

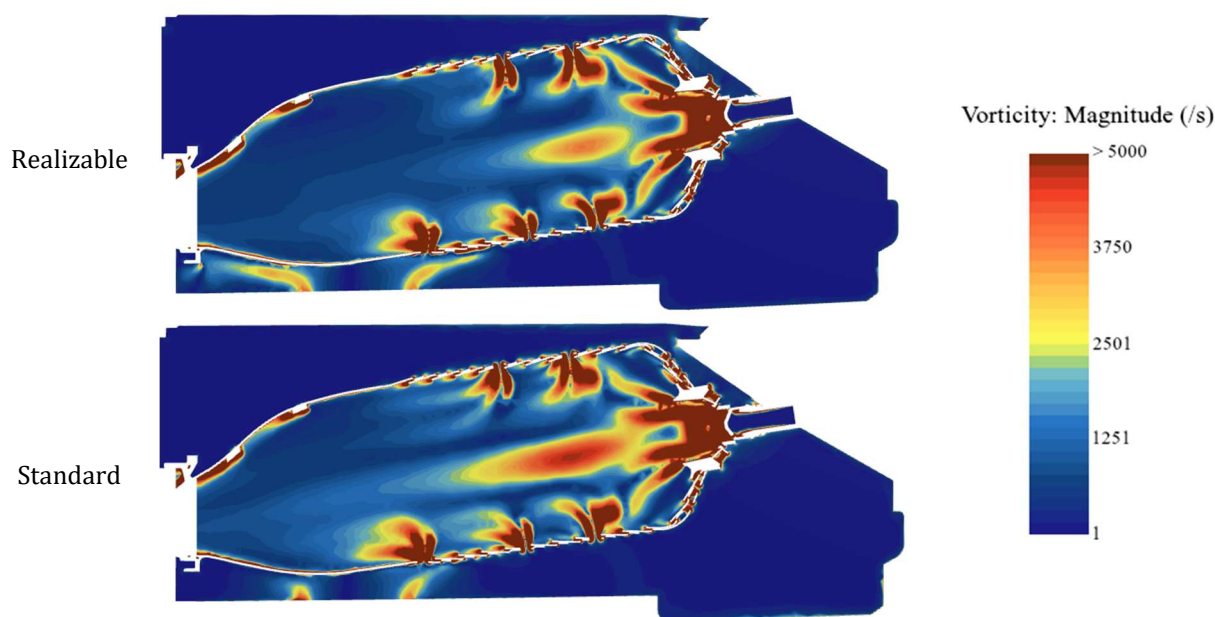


Figure 8- Velocity contour and streamlines inside the combustion chamber in the mid-section
 شکل ۸- کانتور سرعت و خطوط جریان درون محفظه احتراق در صفحه میانی

¹ Vorticity

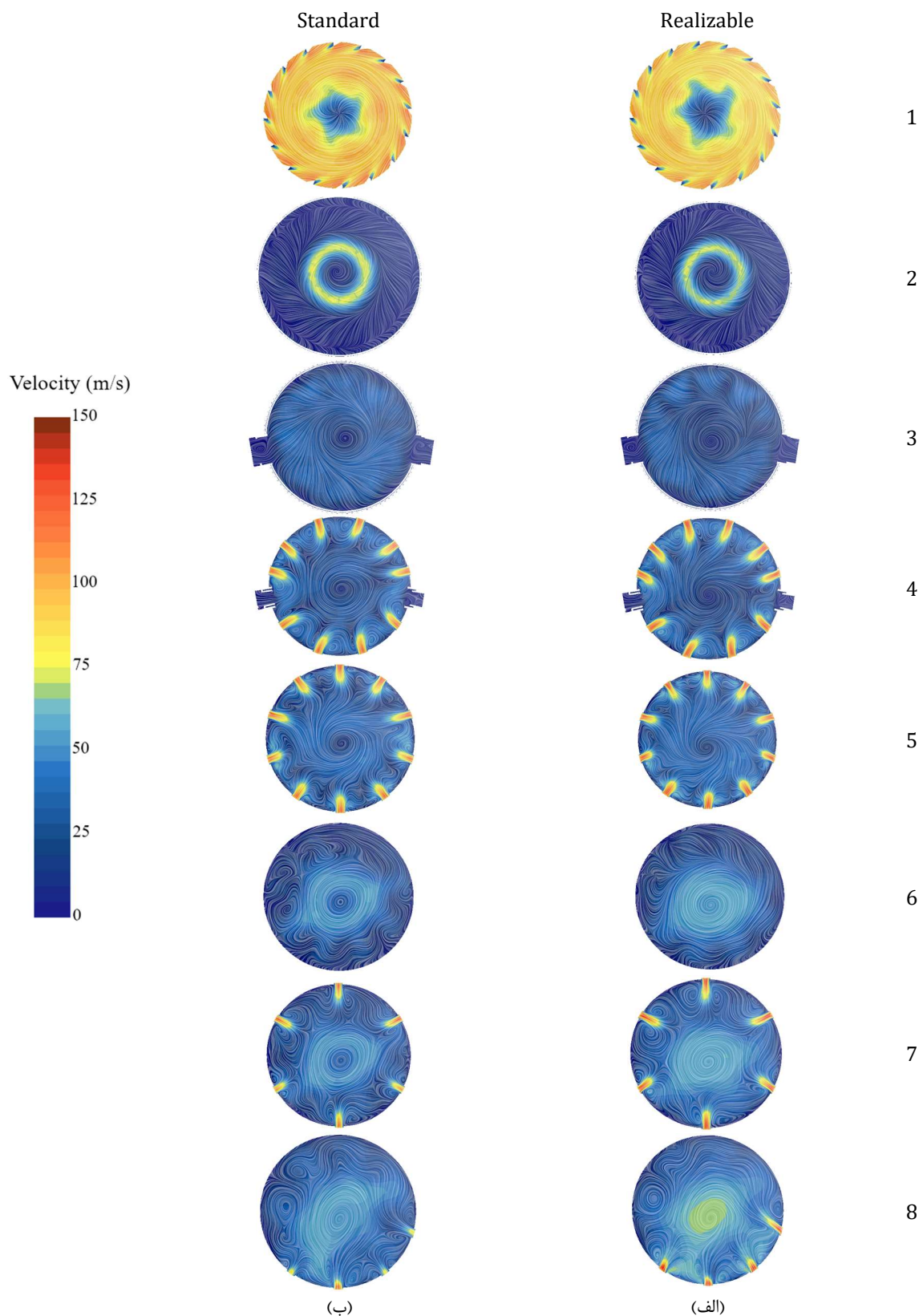


Figure 9- Velocity contour and streamlines inside the combustion chamber at different sections (a) k- ϵ Realizable and (b) k- ϵ Standard

شکل ۹- کانتور سرعت و خطوط جریان داخل محفظه احتراق در مقاطع مختلف (الف) k- ϵ Realizable و (ب) k- ϵ Standard

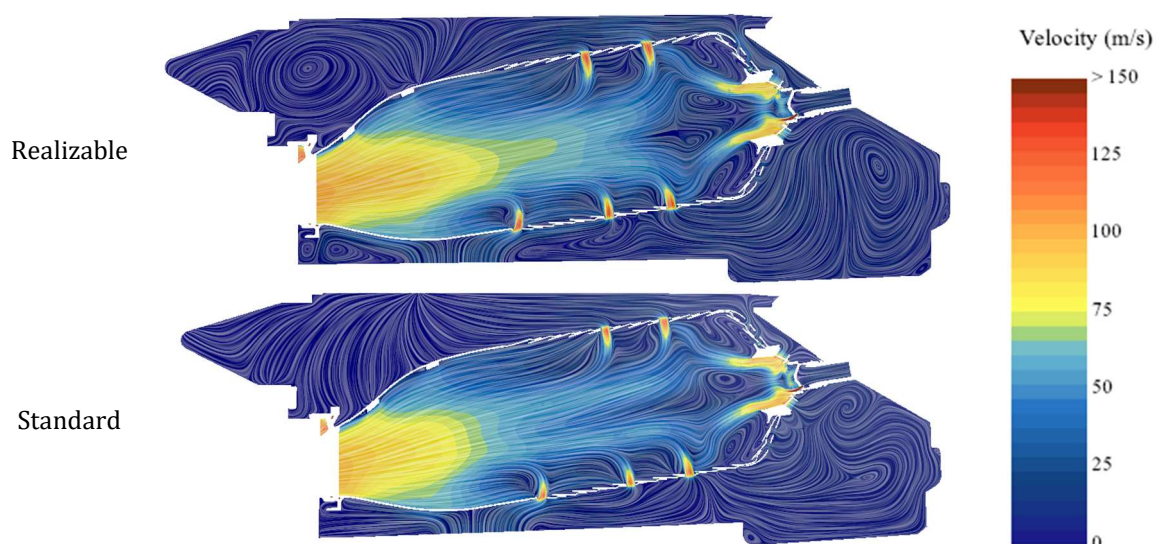


Figure 10- Velocity contour and streamlines inside the combustion chamber in the mid-section
 شکل ۱۰- کانتور سرعت و خطوط جریان درون محفظه احتراق در صفحه میانی

با توجه به شبیه‌سازی بهتر اختلاط جریان داغ و سرد در مدل $k-\epsilon$ Standard می‌توان انتظار داشت که توزیع دما داخل لاینر و همچنین در صفحه خروجی لاینر نسبت به شبیه‌سازی با مدل $k-\epsilon$ Realizable دمای کم‌تری داشته باشد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که توزیع دما در شبیه‌سازی با مدل $k-\epsilon$ Standard یکنواخت‌تر و دمای کلی داخل لاینر خنک‌تر است.

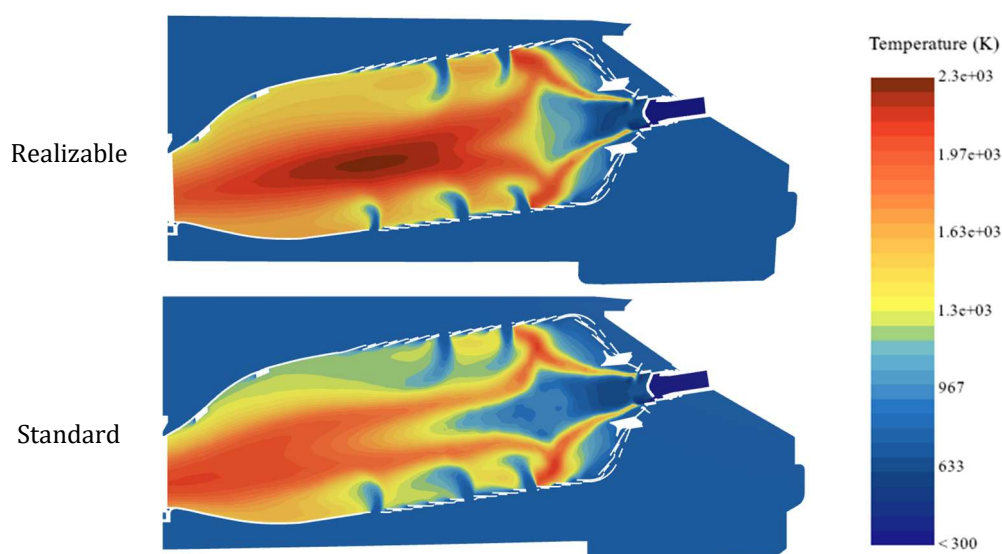


Figure 11- Temperature contour inside the combustion chamber in the mid-plane
 شکل ۱۱- کانتور دمای درون محفظه احتراق در صفحه میانی

با توجه به شکل ۱۲، پروفیل دمای خروجی شبیه‌سازی شده توسط مدل $k-\epsilon$ Standard خنک‌تر و نزدیک‌تر به پروفیل ارائه شده توسط مرجع است. همچنین مطابق جدول ۵ میانگین دمای سکون خروجی لاینر در شبیه‌سازی با $k-\epsilon$ Standard، در حدود چهار درصد خطای کم‌تری نسبت به مدل $k-\epsilon$ Realizable دارد.

با توجه به تمامی نتایج ارائه شده از قبیل دما و سرعت در مقاطع مختلف، می‌توان گفت ترکیب مدل توربولانسی $k-\epsilon$ Standard با مدل احتراقی FGM می‌تواند با دقت مناسبی شرایط عملکردی محفظه احتراق توربین گاز را شبیه‌سازی کند. در

جدول ۶ نیز، پارامترهای فشاری نظیر فشار سکون ورود و خروج و افت فشار کل محفظه احتراق با داده‌های مرجع مقایسه شد تا اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده از جهت فشار نیز قابل بررسی باشد.

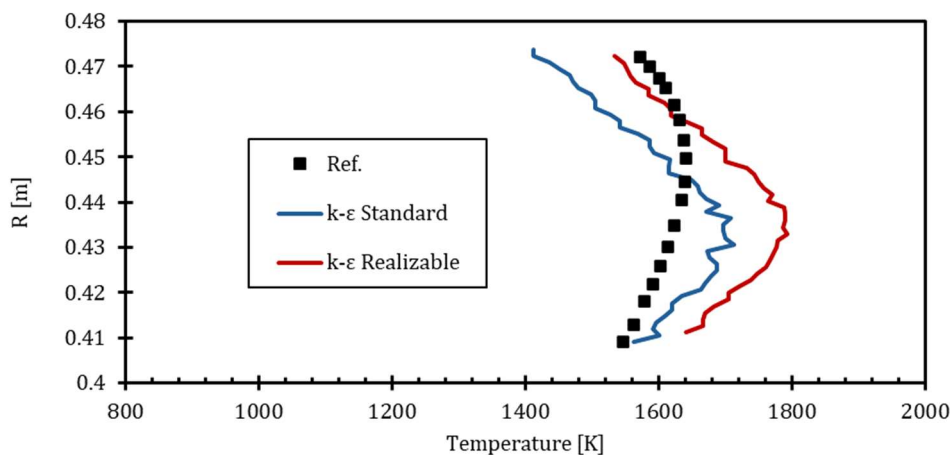


Figure 12- The combustion chamber outlet temperature profile

شکل ۱۲- پروفیل دمای خروجی محفظه احتراق

جدول ۵- میانگین دمای سکون خروجی

Table 5- The average exit stagnation temperature

	Reference	Realizable	Standard
Outlet Total Temperature [K]	1573	1656.2	1557.2
Error [%]	-	5.2	1.0

جدول ۶- اعتبارسنجی پارامترهای فشار

Table 6- Pressure parameter validation

parameter	Ref.	CFD	Error [%]
[bar] Inlet total pressure	21.50	21.43	0.3
[bar] Outlet total pressure	20.60	20.59	0.05

بررسی عملکرد محفظه احتراق

سایر نتایج شبیه‌سازی محفظه احتراق توربین گاز صنعتی با مدل توربولانسی $k-\epsilon$ Standard و مدل احتراقی FGM در شکل ۱۳ و جدول ۷ قابل مشاهده است. در شکل ۱۳ درصد جرمی گونه‌های مختلف داخل لاینر اعم از CH_4 ، CO_2 ، CO ، OH و NO قابل مشاهده است. با توجه به توزیع CO و NO و مقادیر آن‌ها در خروج از محفظه احتراق که در جدول ۷ قابل مشاهده است می‌توان گفت که از میان آلاینده‌ها، بیشترین سهم را NO به خود اختصاص داده که با توجه به دمای بالای داخل محفظه احتراق که در شکل ۱۱ ارائه شده است، تشکیل اکسیدهای نیتروژن و مصرف شدن CO قابل پیشبینی بود. از طرفی با توجه به توزیع OH داخل لاینر می‌توان دریافت که تمرکز تشکیل شعله نزدیک دیواره و قبل از ردیف اول سوراخ‌های ناحیه اول محفظه احتراق است که موجب تمرکز دما بر دیواره لاینر در آن ناحیه شده و افزایش بار حرارتی و احتمال کاهش عمر لاینر در نواحی اطراف لوله‌های اتصال بین لاینرها^۱ می‌شود. با توجه به این نتایج، برای بهبود عملکرد این محفظه احتراق می‌توان طرح‌های مختلفی را برای باز طراحی و اجرای فرآیند DLE^2 در نظر گرفت.

¹ Corss fire tubes

² Dry Low Emission

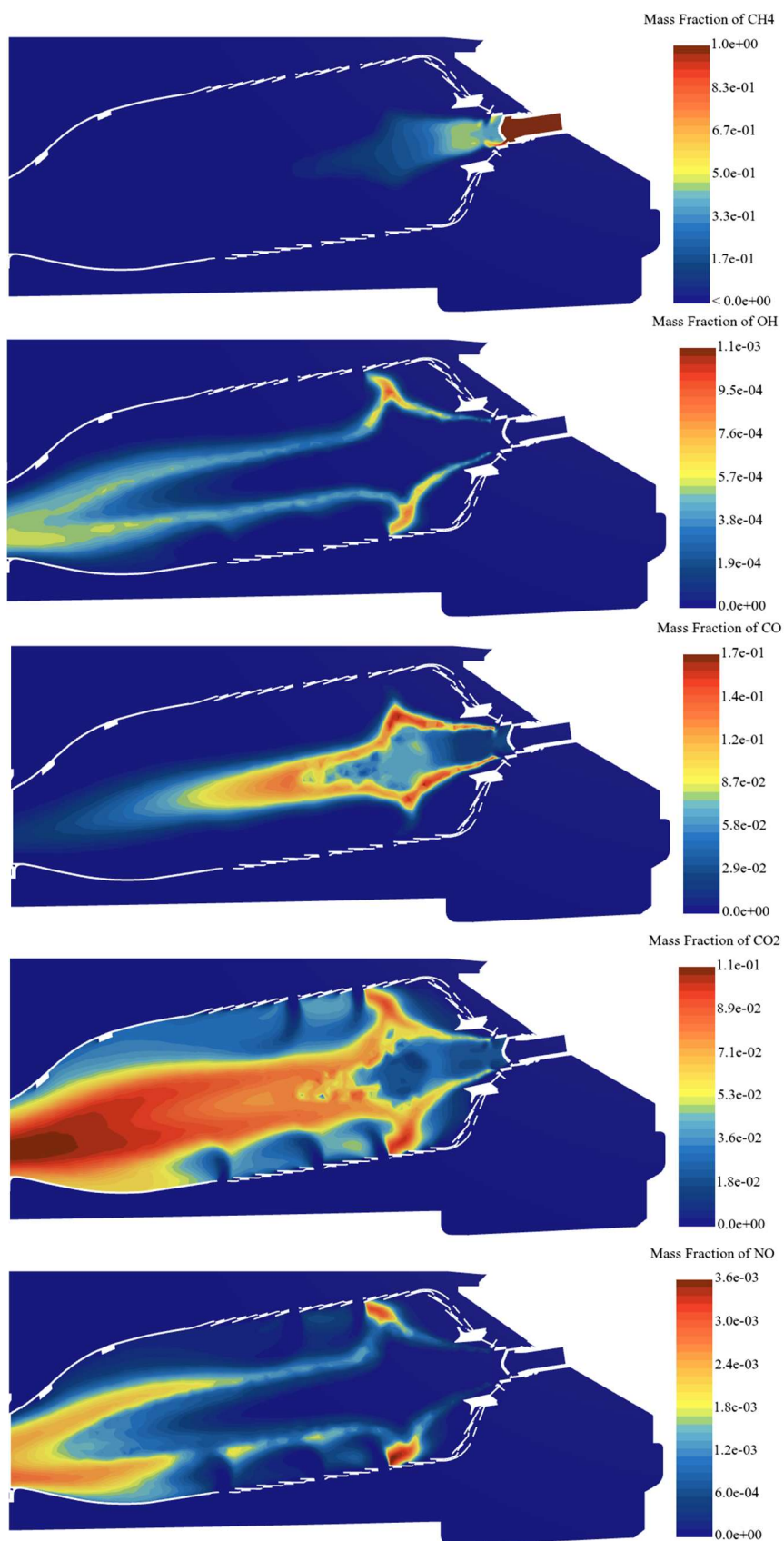


Figure 13- Mass fraction contour of different species in the mid-plane of the combustion chamber
 شکل ۱۳- کانتور درصد جرمی گونه‌های مختلف در صفحه میانی محفظه احتراق

جدول ۷- مقادیر کسر جرمی گونه‌های مختلف در خروج از لاینر

Table 7- The mass fraction values of different species at the liner outlet

Species	Mass Fraction
CH ₄	7.8e-7
OH	1.75e-5
CO	7.8e-7
CO ₂	6.33e-2
NO ₂	1.75e-5
NO	1.45e-3

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز صنعتی با دو مدل احتراقی FGM و EBU و مدل توربولانسی k-ε انجام شده است. نتایج نشان داد که مدل FGM نسبت به EBU از دقت بیشتری در پیش‌بینی میانگین دمای سکون خروجی برخوردار است. همچنین، پروفیل دمای خروجی حاصل از مدل FGM به توزیع مرجع نزدیک‌تر بوده و دمای خنک‌تری را ارائه می‌دهد.

در بررسی اثر مدل توربولانسی، مشخص شد که مدل k-ε Standard نسبت به k-ε Realizable توانایی بهتری در شبیه‌سازی گردابه‌ها، اختلاط جریان سرد و گرم، و توزیع دمای یکنواخت‌تر دارد. میانگین دمای سکون خروجی در مدل k-ε Standard برابر ۱۵۵۷.۲ کلوین (خطای ۱ درصد) و در مدل k-ε Realizable برابر ۱۶۵۶.۲ کلوین (خطای ۵/۲۶ درصد) محاسبه شد که نشان‌دهنده برتری مدل k-ε Standard است.

بررسی گونه‌های شیمیایی خروجی نشان داد که بیشترین آلاینده تولیدی NO ناشی از فرآیند تولید NOx حرارتی است. میزان این آلاینده ۱۴/۵ ppm به دست آمد. همچنین، توزیع دما روی دیواره لاینر نشان داد که تمرکز شعله نزدیک دیواره و قبل از ردیف اول سوراخ‌های ناحیه اول محفظه رخ می‌دهد که می‌تواند باعث کاهش عمر لاینر شود.

در مجموع، ترکیب مدل توربولانسی k-ε Standard با مدل احتراقی FGM گزینه مناسبی برای شبیه‌سازی دقیق محفظه‌های احتراق توربین گاز صنعتی محسوب می‌شود.

منابع

- [1] J. A. Van Oijen, F. A. Lammers, and L. P. H. De Goey, "Modeling of complex premixed burner systems by using flamelet-generated manifolds," *Combustion and Flame*, vol. 127, no. 3, pp. 2124-2134, 2001.
- [2] J. A. Van Oijen, A. Donini, R. J. M. Bastiaans, J. H. M. ten Thijsse Boonkamp, and L. P. H. De Goey, "State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 57, pp. 30-74, 2016.
- [3] J. A. M. De Swart, R. J. M. Bastiaans, J. A. Van Oijen, L. P. H. De Goey, and R. S. Cant, "Inclusion of preferential diffusion in simulations of premixed combustion of hydrogen/methane mixtures with flamelet generated manifolds," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 85, no. 3, pp. 473-511, 2010.
- [4] R. L. G. M. Eggels and C. T. Brown, "Comparison of numerical and experimental results of a premixed DLE gas turbine combustor," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 78514, p. V002T02A032, 2001.
- [5] T. Cardoso de Souza, R. J. M. Bastiaans, B. J. Geurts, and L. P. H. De Goey, "LES and RANS of premixed combustion in a gas-turbine like combustor using the flamelet generated manifold approach," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 54624, pp. 1119-1127, 2011.
- [6] H. Mongia, "Gas turbine combustor liner wall temperature calculation methodology," in *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, p. 3267, 2001.
- [7] F. L. G. Dias, M. A. R. do Nascimento, and L. de O. Rodrigues, "Reference area investigation in a gas turbine combustion chamber using CFD," *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 73-82, 2014.
- [8] N. Rasooli, S. Besharat Shafiei, and H. Khaledi, "Combination of 1D code and CFD for performance analysis of a silo type gas turbine combustor," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 43970, pp. 1015-1023, 2010.
- [9] V. Rajabi and E. Amani, "A computational study of swirl number effects on entropy generation in gas turbine combustors," *Heat Transfer Engineering*, vol. 40, no. 3-4, pp. 346-361, 2019.

- [10] C. Zong, Y. Lyu, D. Guo, C. Li, and T. Zhu, "Experimental and numerical study on emission characteristics of the double annular swirler under different pilot fuel ratios," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 51067, p. V04BT04A001, 2018.
- [11] S. Karuppannan, B. Mehul, G. Sivaramakrishna, R. D. Navindgi, and N. Muthuveerappan, "CFD analyses of flow in a gas turbine combustor swirl cup," in *Gas Turbine India Conference*, vol. 58509, p. V001T04A009, 2017.
- [12] "Gas turbine unit GTD25HU80.09 engine DU80 combustion chamber characteristics," State Gas Turbine Research & Production Complex "ZORYA"-"MASHPROEKT", 89995IIP3C-1-2-3.