

## شبیه سازی عددی احتراق آکسی فیول بر محفظه احتراق سنديا دی

محمد حسین مشایخ<sup>۱\*</sup>، علیرضا علیپور<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، mh.mashayekh40@yahoo.com

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، a.alipoor@shirazu.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

تولید روزافزون گازهای گلخانه‌ای موجبات گرم‌تر شدن کره زمین را فراهم می‌آورد و به صورت غیر مستقیم باعث بروز نتایج نامطلوبی می‌شود که آینده زندگی در کره زمین را دچار نگرانی می‌کند. امروزه بحث گازهای گلخانه‌ای از مهم‌ترین مباحث مجامع علمی و بین‌المللی می‌باشد. محققان با ارائه روش‌هایی سعی بر حذف و یا حداقل کردن انتشار آلاینده‌های گرمایی را دارند. از مهم‌ترین راه‌های ارائه شده جهت کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، روش OXY-FUEL COMBUSTION می‌باشد. از همین روی سعی می‌شود که بر روی بعضی محفظه‌های احتراق تا حد امکان، این نوع مکانیزم احتراقی تعبیه شود. در تحقیق حاضر، فرآیند OXY-FUEL COMBUSTION به روش عددی، بر روی محفظه احتراق SANDIA D شبیه سازی شده است. برای شبیه سازی این مسئله، از مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  و از مدل احتراقی EDC و از سینتیک GRI-MECH 3.0 بهره برده شده است. روش حل معادلات حاکم بر مسئله نیز، مدل RANS می‌باشد. برای شبیه سازی عددی این مسئله از نرم افزار متن باز openFOAM بهره برده شده است. در تحقیق حاضر برای اکسند، غلظت‌های اکسیژن ۴۵٪، ۵۵٪، ۶۵٪ بررسی شده‌اند و نتایج از نظر حرارتی و آلاینده با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

**کلمات کلیدی:** OXY-FUEL COMBUSTION، دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup>، اکسیدهای نیتروژن، کربن دی اکسید

### مقدمه

گازهای گلخانه‌ای که توسط انسان‌ها در محیط انتشار می‌یابند، مهم‌ترین دلیل ایجاد تغییرات اقلیمی و زیست محیطی می‌باشند [۱]. با این وجود، میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی، یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در سده اخیر بوده است [۲]. طبق گزارش رسمی آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۲</sup> حدود ۸۰٪ از مصرف انرژی در جهان مربوط به سوزاندن سوخت‌های فسیلی می‌باشد [۳]. طبق این گزارش در سال ۲۰۱۴ حدود ۳۲،۳ گیگاتن کربن دی-اکسید وارد جو شده است. یافته‌های اخیر حاکی از آن است که حدود ۴۰٪ از انتشار کربن دی‌اکسید منتشر شده مربوط به تولید الکتریسیته می‌باشد که از این مقدار نیز در حدود ۳۰٪ از طریق سوزاندن سوخت‌های فسیلی تولید می‌شوند [۴]. روش‌های زیادی برای کم کردن و مهار انتشار کربن دی-اکسید وجود دارند، از جمله این روش‌ها می‌توان به کاشتن درخت، عدم استفاده از احتراق‌های غیر ضروری، استفاده از انرژی‌های نو و به کارگیری تکنولوژی‌های ضبط و ذخیره سازی کربن اشاره نمود [۵-۲]. از مهم‌ترین روش‌های علمی و کاربردی انجام شده، OXY-FUEL COMBUSTION می‌باشد. در تکنیک OXY-FUEL COMBUSTION، اکسیژن خالص به وسیله روش‌هایی از هوا جدا سازی شده و سپس وارد فرایند احتراق می‌شود [۶]. این مسئله باعث می‌شود که محصولات احتراق عمدتاً شامل کربن دی‌اکسید و بخار آب باشند و اکسیدهای نیتروژن از محصولات احتراق حذف شوند. انجام این فرآیند باعث می‌شود که دمای موضعی در محفظه احتراق بسیار بالا رفته و حتی منجر به انفجار شود [۳]. برای برطرف کردن این مشکل، از

محصولات احتراق کربن دی‌اکسید یا بخار آب را جدا نموده [۷] ( معمولاً کربن دی اکسید ) و به واکنش دهنده‌ها اضافه می‌نمایند که این مسئله باعث رقیق سازی واکنش دهنده‌ها و مهار محدوده سرکش دمایی خواهد شد [۸]. از مهم‌ترین مزیت‌های OXY-FUEL COMBUSTION می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۹]:

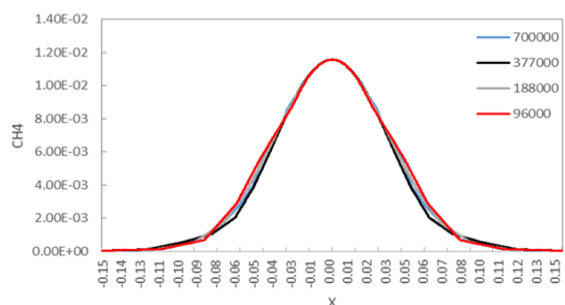
- در غیاب نیتروژن، حجم گازهای خروجی کمتر شده که باعث کمتر شدن ابعاد تجهیزات و افزایش بازدهی خواهد شد.
- یکی از مهم‌ترین مزایای این روش کاهش چشم‌گیر انتشار اکسیدهای نیتروژن می‌باشد، زیرا جدا سازی اکسیژن از نیتروژن راحت‌تر از جدا سازی اکسیدهای نیتروژن از محصولات احتراق می‌باشد و از ابتدا نیتروژن جدا شده و ذخیره می‌شود.
- از دیگر مزایای مهم این روش، قابلیت پیاده سازی این سیستم بر اکثر توربین‌های گازی بدون تغییرات عمده در تجهیزات می‌باشد.

اولین کاربردهای این نوع احتراق، از اواخر قرن ۲۰ میلادی در آمریکا شروع شد و امروزه در ژاپن و سراسر اروپا رواج دارد [۱۰]. از مهم‌ترین مباحث در این نوع احتراق، بررسی پایداری شعله و استحصال غلظت اکسیژن بهینه نسبت به حالت احتراق معمولی با هوا می‌باشد و تا به حال کارهای زیادی پیرامون این مسئله صورت پذیرفته است [۱۱]. طی تحقیقاتی که انجام شده، محققان به این نتیجه رسیدند که در این نوع احتراق، در حالتی که نسبت اکسیژن در اکسند و در مقابل کربن دی اکسید کمتر از ۲۲٪، ۲۵٪ و ۲۷٪ در قیاس با غلظت اکسیژن در هوا که ۲۱٪ است باشد، احتراق ناقص و همراه با سوخت‌های نسوخته می‌باشد [۱۲-۶]. کارهای تجربی زیادی، پیرامون عدم تشابه نیتروژن و کربن دی اکسید انجام شده است که از بین آن‌ها می‌توان به [۱۱] و [۱۳] [۱۵] اشاره نمود و نتیجه مشترک این تحقیقات این بود که برای احتراق با سوخت متان، در حالت OXY-FUEL COMBUSTION نسبت به حالت احتراق با هوا، اتلاف حرارت تشعشعی<sup>۳</sup> بیشتر می‌باشد. آن‌ها همچنین گزارش نمودند که، با افزایش غلظت اکسیژن، این اتلاف حرارت تشعشعی نیز بیشتر می‌شود. دلیل این اتفاق ضریب انتشار<sup>۴</sup> متفاوت گازها و سهم تشعشعی دوده و همچنین ویسکوزیته مولکولی در OXY-FUEL COMBUSTION نسبت به احتراق با هوا می‌باشد. هزینه بر بودن و همچنین مشکل ساز بودن شبیه سازی تجربی و آزمایشگاهی، باعث جذاب تر شدن کارهای شبیه سازی عددی شده است. کارهای عددی زیادی پیرامون این نوع احتراق صورت پذیرفته است [۱۶]. از مهم‌ترین مباحث در شبیه سازی عددی این نوع احتراق انتخاب مکانیزم و مدل تشعشعی بسیار مهم می‌باشد که در این زمینه نیز کارهای زیادی انجام شده است [۱۷].

در تحقیق پیش رو روش OXY-FUEL COMBUSTION بر روی محفظه احتراق SANDIA D اعمال می‌شود و نتایج از نظر احتراقی و بحث آلاینده اکسیدهای نیتروژن و کربن دی اکسید بررسی خواهند شد.

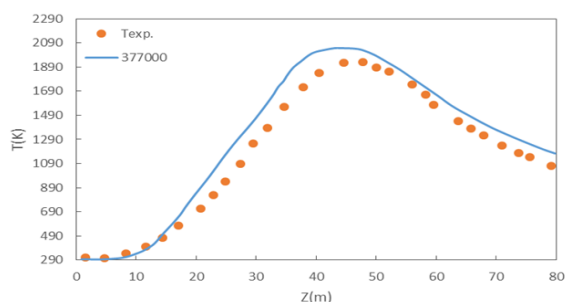
<sup>3</sup> Radiation heat loss  
<sup>4</sup> Emmisivity

<sup>1</sup> CFD  
<sup>2</sup> International Energy Agency(IEA)

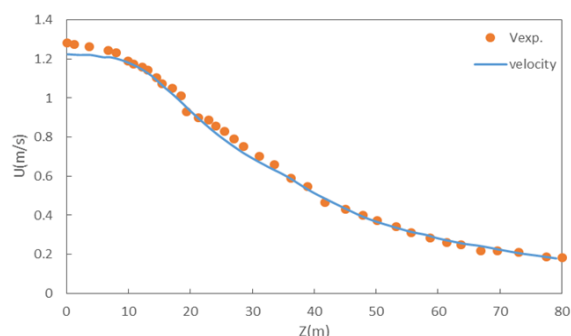


شکل ۳: نتایج استقلال از شبکه برای نتایج کسر جرمی متان در راستای محور X در ارتفاع ۴۵ سانتی متری محفظه احتراق

در ادامه برای صحت سنجی نتایج، می‌بایست که نتایج تجربی را با تعداد شبکه ۳۷۷۰۰۰ مقایسه نمود. در شکل ۴ و ۵ این نتایج برای دما و سرعت محوری در راستای محور محفظه احتراق، قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۴: اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی دما با نتایج آزمایشگاهی

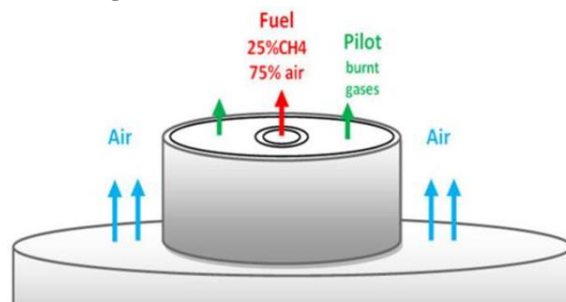


شکل ۵: اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی سرعت با نتایج آزمایشگاهی

پس از بررسی صحت مدل سازی، مراحل شبیه سازی برای سه غلظت ۰.۴۵٪، ۰.۵۵٪ و ۰.۶۵٪ انجام خواهد شد و نتایج آن ارائه خواهند گردید. در اولین مرحله نتایج دما برای هر سه حالت، با مشعل عادی SANDIA D در راستای محور محفظه احتراق بررسی خواهند شد که نتایج آن در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشند.

### روش شبیه سازی و نتایج

در تحقیق پیش رو OXY-FUEL COMBUSTION برای غلظت‌های اکسیژن ۰.۴۵٪، ۰.۵۵٪ و ۰.۶۵٪ روی محفظه احتراق SANDIA D [18] بررسی خواهد شد. در شبیه سازی پیش رو، از مدل اغتشاشی  $K-\epsilon$  و مدل احتراقی EDC و سینتیک شیمیایی GRI-MECH 3.0 و همچنین برای حل معادلات از روش RANS بهره برده خواهد شد. نرم افزار مورد استفاده جهت شبیه سازی نیز، نرم افزار متن باز openFOAM خواهد بود. سعی خواهد شد که به صورت مختصر هندسه و مشخصات محفظه احتراق معرفی گردد.



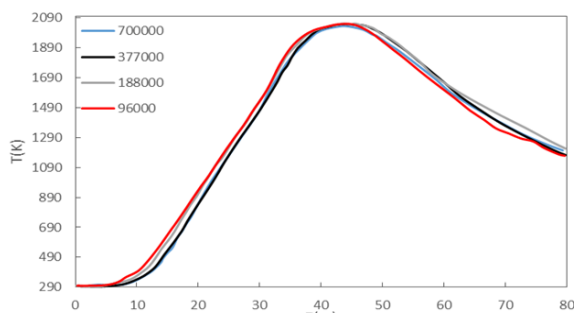
شکل ۱: مشخصات هندسی محفظه احتراق SANDIA D [۱۹]

در شکل ۱، در قسمت PILOT، جریان مخلوطی از سوخت‌های  $H_2$  و  $C_2H_2$  و همچنین هوا و  $CO_2$  و  $N_2$  موجود می‌باشد. طول محفظه احتراق ۹۰ سانتی متر و قطر قاعده آن، ۳۰ سانتی متر می‌باشد. جدول ۱ بیانگر جزئیات هندسه محفظه احتراق می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات شرایط مرزی محفظه احتراق SANDIA D

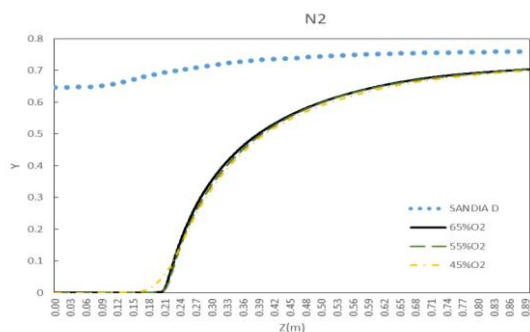
مشخصه	جت اصلی	پیلوت	ورودی هوا	واحد
دمای ورودی	۲۹۴	۱۸۸۰	۲۹۱	کلوین
سرعت ورودی	۴۹.۶	۱۱.۴	۰.۹	متر بر ثانیه
قطر داخلی	۷.۲	۷.۷	۱۹.۹	میلی متر
قطر خارجی	۰	۱۸.۲	۳۰.۰	میلی متر
ضخامت دیواره	۰.۲۵	۰.۳۵	۰	میلی متر

برای شبیه سازی OXY-FUEL COMBUSTION، نیتروژن از هوا حذف شده و به جای آن کربن دی اکسید و اکسیژن به مقادیر دلخواه اضافه شده‌اند. در ابتدا و قبل از انجام مراحل شبیه سازی نیاز به بررسی استقلال از شبکه خواهد بود. تعداد شبکه برای این مرحله، مقادیر ۹۶۰۰۰، ۱۸۸۰۰۰، ۳۷۷۰۰۰ و ۷۰۰۰۰۰ خواهند بود. در شکل ۲ و ۳ نتایج استقلال از شبکه برای نتایج دما در راستای محور محفظه احتراق و کسر جرمی متان در راستای محور X و در ارتفاع ۴۵ سانتی متری محفظه احتراق مشاهده می‌شوند. با بررسی نتایج، مشاهده می‌شود که تعداد شبکه ۳۷۷۰۰۰ برای این نوع شبیه سازی مناسب می‌باشد.

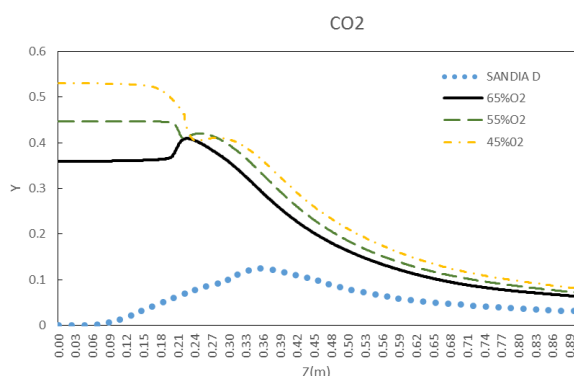


شکل ۲: نتایج استقلال از شبکه دما برای محور محفظه احتراق

برای بررسی انتشار آلاینده‌ها کسر جرمی‌های دو نمودار نیتروژن و کربن دی اکسید بررسی خواهند شد. در نمودار نیتروژن، هر چه تغییرات کسر جرمی نیتروژن کمتر باشد یعنی انتشار اکسیدهای نیتروژن بیشتر می‌باشند. نتایج مربوط به کسر جرمی نیتروژن در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشند. مشاهده می‌شود که در حالت OXY-FUEL COMBUSTION، انتشار اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابند. در نتایج مربوط به کسر جرمی‌های کربن دی اکسید، اشاره به این نکته الزامی می‌باشد که کربن دی اکسید در شرایط اولیه برای حالت OXY-FUEL COMBUSTION بیشتر می‌باشند و در آخر فرآیند احتراق نیز کربن دی اکسید جدا سازی شده و مجدد استفاده خواهند شد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج کسر جرمی نیتروژن و کربن دی اکسید قابل مشاهده می‌باشند.



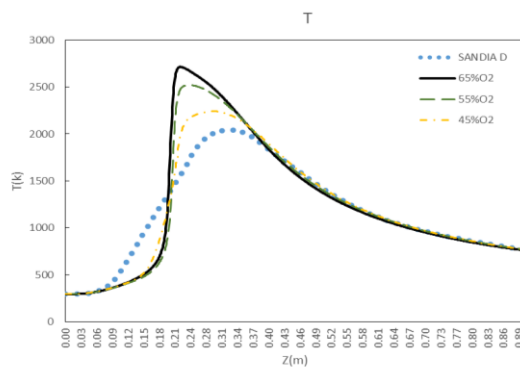
شکل ۹: نتایج مقایسه‌ای کسر جرمی نیتروژن در غلظت‌های متفاوت اکسیژن با مشعل SANDIA D



شکل ۱۰: نتایج مقایسه‌ای کسر جرمی نیتروژن در غلظت‌های متفاوت اکسیژن با مشعل SANDIA D

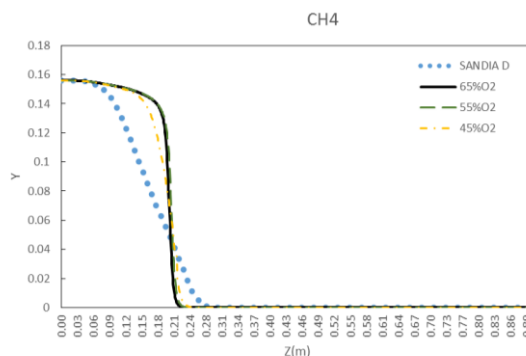
### نتیجه گیری

با توجه به نتایج بررسی شده در این محفظه احتراق، استفاده از OXY-FUEL COMBUSTION از نظر حرارتی و همچنین انتشار آلاینده‌ها بسیار مطلوب و مورد توجه می‌باشند. مشاهده می‌شود که هر چه غلظت اکسیژن بیشتر می‌شود، دمای بیشینه بیشتری به دست می‌آید اما باید توجه داشت که در صورت افزایش بیش از حد اکسیژن، امکان وقوع انفجار نیز افزایش می‌یابد، لذا تا محدوده معینی می‌بایست غلظت اکسیژن را بالا برد. در مباحث مربوط به OXY-FUEL COMBUSTION واحدهای جداساز اکسیژن از هوا و همچنین واحد جداساز کربن دی اکسید از خروجی‌ها نیز بسیار مهم و گران قیمت می‌باشند که قبل از به کار گیری این نوع احتراق می‌بایست از نظر اقتصادی و امکان سنجی نیز بررسی شوند.



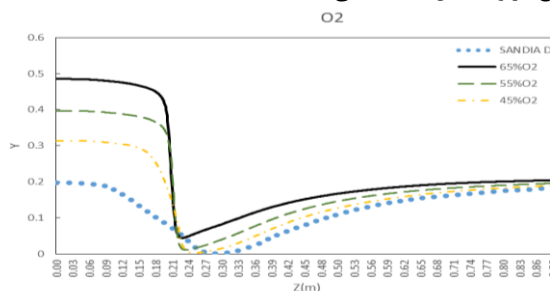
شکل ۶: نتایج مقایسه‌ای دما در غلظت‌های متفاوت اکسیژن با مشعل SANDIA D

مشاهده می‌شود که قله دما برای شرایطی که OXY-FUEL COMBUSTION می‌باشد، بالاتر است و هر چه غلظت اکسیژن بالاتر می‌رود این قله نیز بالاتر می‌رود. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت اکسیژن، طول شعله کاهش می‌یابد. در مرحله بعد، نتایج کسر جرمی متان با یکدیگر مقایسه شده‌اند که نتایج آن در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشند. مشاهده می‌شود که متان در حالت OXY-FUEL COMBUSTION سریع‌تر مصرف شده است که دلیل این مسئله افزایش ناگهانی دما و حضور اکسیژن بیشتر برای انجام واکنش می‌باشد. فلسفه استفاده مجدد از کربن دی اکسید، به غیر از مباحث آلاینده‌گی، کاهش خطر انفجار ناگهانی در محفظه احتراق می‌باشد.



شکل ۷: نتایج مقایسه‌ای کسر جرمی متان در غلظت‌های متفاوت اکسیژن با مشعل SANDIA D

در ادامه نتایج کسر جرمی اکسیژن در حالت مقایسه‌ای بررسی شده‌اند. مشاهده می‌شود که در حالت اولیه، غلظت‌های اکسیژن افزایش یافته است. به دلیل حضور سوخت متان، با یکدیگر واکنش می‌دهند و ناگهانی مصرف می‌شوند. حضور اکسیژن و متان باعث بالاتر رفتن دما می‌شوند. در شکل ۸ نتایج مربوطه قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۸: نتایج مقایسه‌ای کسر جرمی اکسیژن در غلظت‌های متفاوت اکسیژن با مشعل SANDIA D

- 15- Andersson K., Johnsson F., 2006, "Combustion and flame characteristics of oxy-fuel combustion-experimental activities within the Encap project." Proc. GHGT-8 conf. Trondheim.
- 16- Hawkes E. R., Chen J. H., 2004, "Direct numerical simulation of hydrogen-enriched lean premixed methane-air flames". Combust Flame; 138:242-58.
- 17- Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., Moriarty N. W., Eiteneer B., Goldenberg M., et al. GRI-Mech 3.0 1999; 51:55. < <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech> > .
- 18- Barlow R. S., 1996, "Proceedings of the international workshop on measurement and computation of turbulent non premixed flames", Sandia National Labs. , Livermore, CA (United States).
- 19- Mahmoud R., Jangi M., Fiorina B., 2018, "Numerical Investigation of an Oxyfuel Non-Premixed Combustion Using a Hybrid Eulerian Stochastic Field/Flamelet Progress Variable Approach: Effects of H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Enrichment and Reynolds Number", Energies 11(11):22.

## فهرست علائم

T	دما K
Z	محور استوانه m
X	محور x m
U	سرعت m/s
Y	کسر جرمی

## منابع

- 1- Lupion M., Diego L. R., Loubeau L. and Navarrete B., 2011, "CIUDEN CCS project: status of the CO<sub>2</sub> capture technology development plant in power generation", Energy Procedia, Vol. 4, pp: 5639-5646.
- 2- Amponsah N.Y., Troldborg M., Kington B., 2014, "Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: a review of lifecycle considerations", Renew Sustain Energy Review 39, pp:461-475.
- 3- Habib M. A., Nemitallah M., 2011, "Design of an ion transport membrane reactor for application in fire tube boilers, Energy", Vol. 81, pp:787-801.
- 4- Gonzalez-Salazar M. A., 2015, "Recent developments in carbon dioxide capture technologies for gas turbine power generation", International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 34, pp:106-116.
- 5- Habib M. A., Nemitallah M., Benmansour R., 2013, "Recent development in oxy-combustion technology and its applications to gas turbine combustors and ITM reactors", Energy Fuels, Vol. 27, pp:2-19.
- 6- Nemitallah M., Habib M.A., 2013, "Experimental and numerical investigations of an atmospheric diffusion oxy-combustion flame in a gas turbine model combustor". Applied Energy; 111:401-415.
- 7- Jamal A., Meisen A., Jim LC., 2006, "Kinetics of carbon dioxide absorption and desorption in aqueous alkanolamine solutions using a novel hemispherical contactor-II: Experimental results and parameter estimation". Chemical Engineering Science; 61(19):6590-6603.
- 8- Habib M. A., Said S. A., Khalifa A., Nemitallah M. A., 2014, "Experimental investigations of the flow maldistribution inside an air-cooled heat exchanger", Arab Journal of Science Engineering, Vol. 39, pp:8187-8198.
- 9- Nemitallah M., Habib M. A., Badr H. A., 2019, "Oxyfuel Combustion for Clean Energy Applications", Springer International Publishing, Edition 1.
- 10- Rogalev A., Rogalev N., Kindra V., Komarov I., and Zlyvko O., 2021, "Research and Development of the Oxy-Fuel Combustion Power Cycles with CO<sub>2</sub> Recirculation", energies
- 11- Ditaranto M., Oppelt T., 2011, "Radiative heat flux characteristics of methane flames in oxyfuel atmospheres". Exp Therm Fluid Sci; 35:1343-50.
- 12- Kutne P., Kapadia B.K., Meier W., Aigner M., 2011, "Experimental analysis of the combustion behaviour of oxyfuel flames in a gas turbine model combustor". Proc Combust Inst; 33:3383-90.
- 13- Heil P., Toporov D., Stadler H., Tschunko S., Förster M., Kneer R., 2009, "Development of an oxycoal swirl burner operating at low O<sub>2</sub> concentrations". Fuel; 88:1269-74.
- 14- Kim H. K., Kim Y., Lee S. M., Ahn K. Y., 2007, "Studies on combustion characteristics and flame length of turbulent oxy-fuel flames". Energy Fuels 2007; 21:1459-67.