

بررسی تاثیر نوع سوخت و شرایط ورودی بر ساختار شعله و آلاینده‌گی محفظه احتراق توربین گاز

محمد حسین عسکری^۱، مهدی اشجعی^۲
دانشکده مکانیک دانشگاه تهران
*mhossein.askari@ut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق احتراق چهار سوخت متان، بوتان، پروپان و اتان به منظور شناسایی تاثیر نوع سوخت بر ساختار شعله و آلاینده‌گی در محفظه احتراق توربین گاز بررسی شده است. همچنین تاثیر شرایط ورودی با استفاده از سه نسبت هوا به سوخت و سه شدت توربولانسی ورودی مختلف مشخص گردیده است. مدل‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار فلونت و با مدل احتراقی تعادلی با در نظر گرفتن سینتیک احتراقی دومرحله‌ای صورت پذیرفته‌اند. نرخ انرژی سوخت ورودی در تمامی حالت‌ها با تغییر دادن دبی سوخت ورودی یکسان نگاه داشته شده‌اند تا مقایسه بین آن‌ها امکان پذیر باشد. نتایج نشان دادند که طول، دمای شعله و آلاینده‌گی ناکس با افزایش درصد هوای اضافی کاهش می‌یابند، که کاهش طول شعله به علت تعجیل در اختلات هوا و سوخت و کاهش ناکس به علت کاهش دمای شعله است. شدت توربولانسی نیز با افزایش نرخ مخلوط شدن هوا و سوخت، طول شعله را کاهش داده و به علت همگن‌تر شدن احتراق دمای بیشینه و در نتیجه آلاینده‌گی ناکس را نیز کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی عددی، سوخت، ساختار شعله، آلاینده‌گی

۱- مقدمه

در این دوران که مباحثی چون آلاینده‌گی هوا، گرم شدن زمین و به اتمام رسیدن منابع سوخت‌های فسیلی یکی از بزرگترین نگرانی‌های بشر برای ادامه حیات در کره خاکی است، تلاش برای یافتن سوخت‌های جایگزین به ویژه سوخت‌های زیست محیطی و همچنین بهبود احتراق سوخت‌های موجود و گسترش محدوده قابل استفاده از آن‌ها یکی از مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی در علم احتراق را به وجود آورده است. سوخت‌های زیست محیطی سوخت‌های جایگزینی هستند که از منابع تجدیدپذیر به دست می‌آیند. استفاده از سوخت‌های زیست محیطی به دست‌یابی به اهداف پیمان کیوتو کمک خواهد کرد [1]. مقالات ارائه شده در حوزه توربین گاز عموماً از گازوئیل و گاز طبیعی به عنوان سوخت مناسب در توربین گاز نام می‌برند و این درحالی است سوخت‌های فراوانی قابلیت استفاده شدن در توربین گاز را دارند. در حال حاضر یک خلاء اساسی در پرداختن به محدوده وسیع از سوخت‌ها و نحوه بکارگیری و عملکرد آن‌ها در توربین گاز وجود دارد [2]. لی و همکارانش [3] احتراق دی متیل اتر در یک محفظه احتراق توربین گاز ۶۰ کیلوواتی را که در فشار اتمسفری کار می‌کرد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دی متیل اتر نسبت به متان دارای آلاینده‌گی‌های کمتری بوده اما کنترل احتراق آن سخت‌تر است. دی متیل اتر CO کمتری نسبت به متان تولید می‌کند درحالی‌که ناکس آن در حد متان است. همچنین در احتراق دی متیل اتر امکان برگشت شعله ۳ بیشتر از احتراق متان است. در این آزمایشات دمای خروجی از احتراق متان بیشتر از دی‌متیل

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه تهران
استاد دانشکده مکانیک دانشگاه تهران

³ Flash back

اثر بود که به علت ظرفیت گرمایی بالاتر آن است. ری و همکاران [4] تاثیر ترکیب سه سوخت دیزل، جت و سوخت گاز مایع ۱ را بر اشتعال در توربین گاز را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تغییرات فشار محفظه، دما و فشار بخار با هم مقایسه شده‌اند.

لیتل جوان و چنگ [5] احتراق هفت ترکیب سوختی را در یک توربین گاز را به منظور بررسی تاثیر سوخت بر شعله پیش مخلوط آشفته و ارائه یک راه کار کلی برای بررسی اثر سوخت‌های جایگزین در محفظه احتراق مورد آزمون قرار دادند. آلایندگی های ناکس و مونوکسیدکربن برای سوخت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند در احتراق رقیق پیش مخلوط که سرعت شعله توربولانسی برای سوخت‌های هیدروکربنی با شدت آشفتنگی رابطه خطی دارد و موقعیت شعله با سرعت جریان تغییر نمی‌کند. فلام [6] یک سیستم احتراقی جدید را برای توربین گاز مورد بررسی قرار داد. در این سیستم گاز به صورت لایه‌ای و کنترل شده با هوا مخلوط می‌گردد. او نشان داد که این شیوه در مقایسه با شیوه قدیمی احتراق غیرپیش مخلوط میزان آلایندگی ناکس کمتری داشته اما مقدار مونوکسیدکربن کاهش می‌یابد. شیوه احتراقی جدید در مقایسه با احتراق پیش مخلوط از پایداری بیشتری برخوردار است.

کوکالپ و لباس [7] سوخت‌های جایگزینی را که امکان استفاده شدن در توربین گاز دارند را به صورت تفصیلی مورد بررسی قرار دادند. لی و همکاران [8] عملکرد یک توربین گاز را که از هیدروژن و مونوکسید کربن استفاده می‌کرد مورد آزمون قرار دادند. لیو و ساندرسون [9] تاثیر کاهش در گرمای احتراق سوخت بر عملکرد و آلایندگی های توربین گاز را با استفاده از هشت سوخت مختلف بررسی کردند. لی و هوانگ [10] پایداری شعله را با استفاده از سوخت گاز فازلاب و دو ترکیب از این گاز با سوخت‌های متداول مورد بررسی قرار دادند. جوست [11] تاثیر افزایش هیدروژن به سوخت‌های هیدروکربنی به منظور کاهش آلایندگی را مورد بررسی قرار داد. هدف از مطالعه سوخت‌های جدید بررسی امکان استفاده از این سوخت‌ها در توربین گاز و گسترش محدوده عملکرد توربین گاز هنگام استفاده از این سوخت‌ها است.

در این تحقیق از چهار سوخت متان، بوتان، پروپان و اتان به منظور بررسی تاثیر نوع سوخت بر ساختار شعله و آلایندگی محفظه احتراق توربین گاز استفاده شده است. همچنین تاثیر شرایط ورودی با استفاده از سه نسبت هوا به سوخت و سه شدت توربولانسی ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نرخ انرژی سوخت ورودی در تمامی حالت‌ها یکسان نگاه داشته شده- اند تا مقایسه بین آن‌ها امکان پذیر باشد.

۲- روش مدل سازی

مدل سازی با استفاده از روش عددی با در نظر گرفتن یک محفظه احتراق به طول ۱۷ و قطر ۱۰ سانتی متر انجام شد. محفظه با فرض تقارن محوری بودن با استفاده از معادلات دوبعدی جریان مدل سازی گردید. سه ورودی سوخت و چهار ورودی هوا در ابتدای محفظه در نظر گرفته شد. جریان با استفاده از مدل $k-\epsilon$ و احتراق با فرض واکنش تعادلی مدل سازی گردیده‌اند. سه المان بندی مختلف به منظور مطالعه استقلال از مش مورد استفاده قرار گرفتند که نهایتاً المانی با ۱۴۰۰ سلول برای مدل- سازی انتخاب گردید.

چهار سوخت مختلف در این مطالعه موردی استفاده قرار گرفتند که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها در جدول نشان داده شده است. مقادیر ظرفیت گرمایی مربوط به فشار و دمای استاندارد هستند. همانطور که در این جدول مشاهده می‌گردد، سوخت‌هایی که نسبت هیدروژن به کربن بیشتری دارند دارای ظرفیت گرمایی بیشتری هستند. با افزایش جرم ملکولی دمای جوشش سوخت افزایش و دمای خوداشتعالی آن کاهش می‌یابد.

¹ Gas-to-liquid synthetic

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سوخت‌های مختلف

بوتان	پروپان	اتان	متان	
C_4H_{10}	C_3H_8	C_2H_6	CH_4	فرمول شیمیایی
۲.۵	۲.۶۷	۳	۴	نسبت هیدروژن به اکسیژن
-۱	-۴۲	-۸۹	-۱۶۴	دمای جوشش ($^{\circ}C$)
۲۸۸	۵۴۰	۴۷۲	۵۳۷	دمای خود اشتعالی ($^{\circ}C$)
۴۹.۵	۵۰.۳	۵۱.۹	۵۵.۵	گرمای بالای احتراق (MJ/kg)
4.64 e-4	4.56 e-4	4.42 e-4	4.16 e-4	دبی سوخت ورودی (kg/s)
۲۲.۹۲	۲۲.۹۲	۲۲.۹۲	۲۲.۹۲	نرخ انرژی ورودی (kW)
0.0287	0.0286	0.0285	0.0288	دبی هوای ورودی ($\lambda=4$) (kg/s)
0.02152	0.02145	0.02138	0.0216	دبی هوای ورودی ($\lambda=3$) (kg/s)
0.0251	0.0250	0.02494	0.0252	دبی هوای ورودی ($\lambda=3.5$) (kg/s)

معادلات پایه برای تمام روش‌های محاسبات جریان در داخل محفظه معادلات دیفرانسیلی هستند که قوانین بقای جرم، ممنتوم (معادلات ناویر استوکس - یک مجموعه سه تایی)، انرژی و غلظت گونه‌ها را توصیف می‌کنند. این معادلات به صورت زیر قابل نمایش هستند.

$$\frac{D}{Dt} \begin{pmatrix} 1 \\ u_i \\ e \\ Y_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Q \\ S_\alpha \end{pmatrix} - \frac{\partial}{\partial x_j} \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{ij} \\ q_j \\ J_{\alpha i} \end{pmatrix}$$

نخستین ترم در سمت راست ترم منبع را نشان می‌دهد و ترم دوم انتقال نفوذ را بیان می‌کند. اپراتور D/Dt ترم انتقال جابجایی را نشان می‌دهد و عبارت است از:

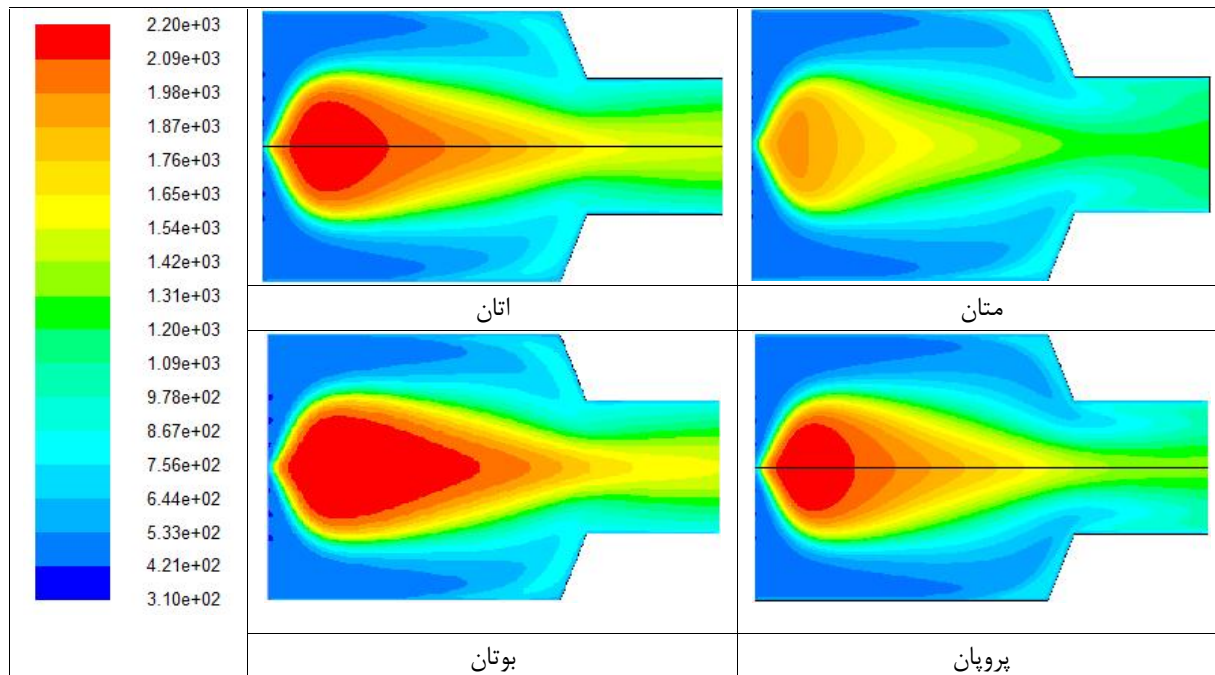
$$\frac{Df}{Dt} \equiv \frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j f)$$

در اینجا چکالی، u_i مؤلفه‌های سرعت، e انرژی داخلی بر واحد جرم، و Y غلظت گونه بر واحد جرم است. منبع انرژی حرارتی Q شامل یک قسمت ویسکوز و یک قسمت منبع که از واکنش شیمیایی سوخت ناشی می‌شود، می‌باشد.

۳- نتایج

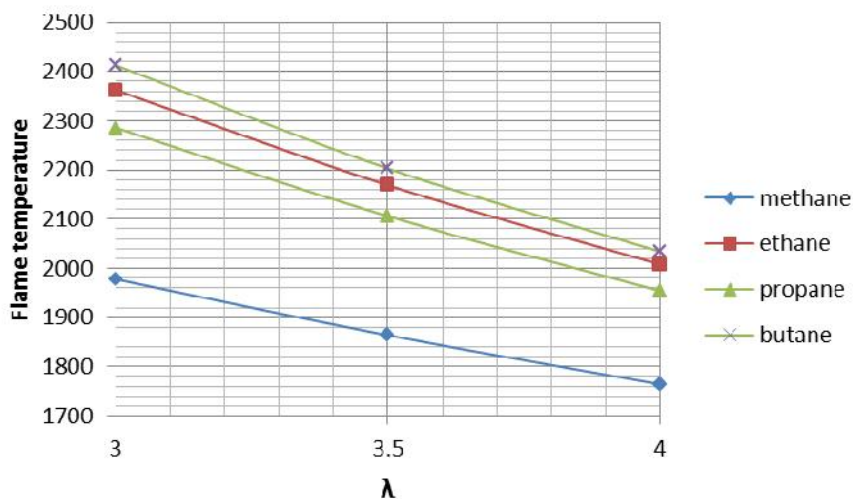
کانتور دما برای سوخت‌های مختلف در شدت توربولانسی ۱۲ درصد و نسبت هوا به سوخت به هوا به سوخت استوکیومتری ۳.۵ در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد بوتان و بعد از آن اتان دارای بیشترین دمای طول شعله و متان دارای کمترین دما و طول شعله است. علت این امر می‌تواند دمای خوداشتعالی پایین بوتان و اتان نسبت به پروپان باشد که سبب می‌شود شروع احتراق آن‌ها نیاز به انرژی اولیه کمتری داشته باشد.

آلاینده‌گی ناکس، طول شعله و دمای شعله برای حالتی که شدت توربولانسی ۱۲ است برای سوخت‌های مختلف بر حسب در صد هوای اضافی در اشکال ۲ تا ۴ نشان داده شده است. هدف از این نمودارها بررسی اثر هوای اضافی بر احتراق است. همانطور که در این اشکال مشاهده می‌گردد با افزایش هوای اضافی و با توجه به اینکه نرخ آزاد سازی انرژی سوخت در تمامی حالت‌ها یکسان است، دمای شعله تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد. دمای احتراق متان به میزان قابل ملاحظه‌ای از سه سوخت دیگر کمتر است که می‌تواند به علت دبی ورودی کمتر آن و همچنین دمای آدیاباتیک شعله پایین تر آن باشد.

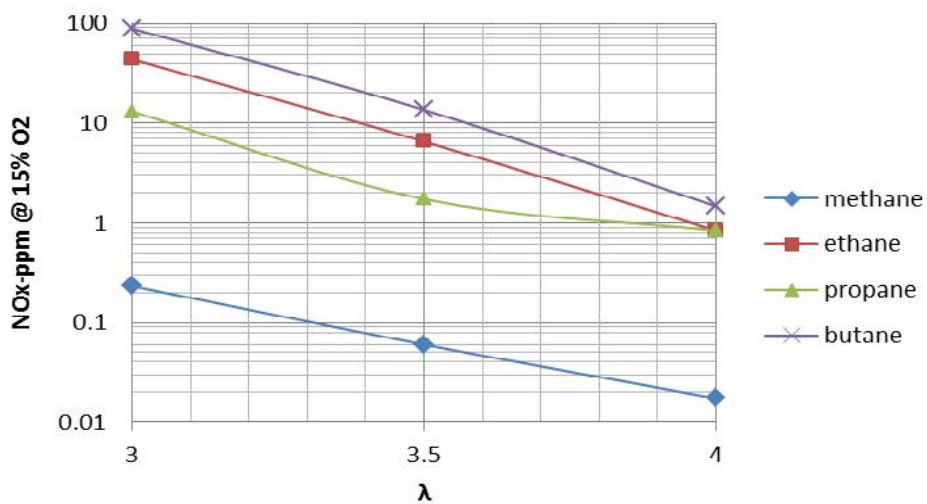


شکل ۱. مقایسه دمای محفظه احتراق سوخت‌های مختلف در $\lambda=3.5$

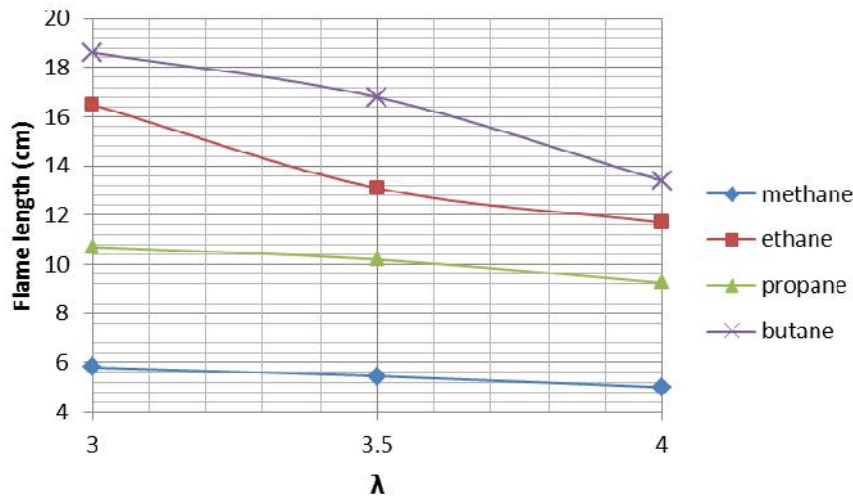
بوتان بیشترین میزان آلاینده‌گی ناکس را دارد که دلیل آن دمای بالاتر آن نسبت به سایر سوخت‌ها است. روند ذکر شده در مورد دمای شعله و ناکس در مورد طول شعله نیز برقرار است و بوتان و متان به ترتیب بیشترین و کمترین طول شعله دارند.



شکل 2. دمای بیشینه شعله بر حسب نسب هوا به سوخت اضافی برای سوخت‌های مختلف

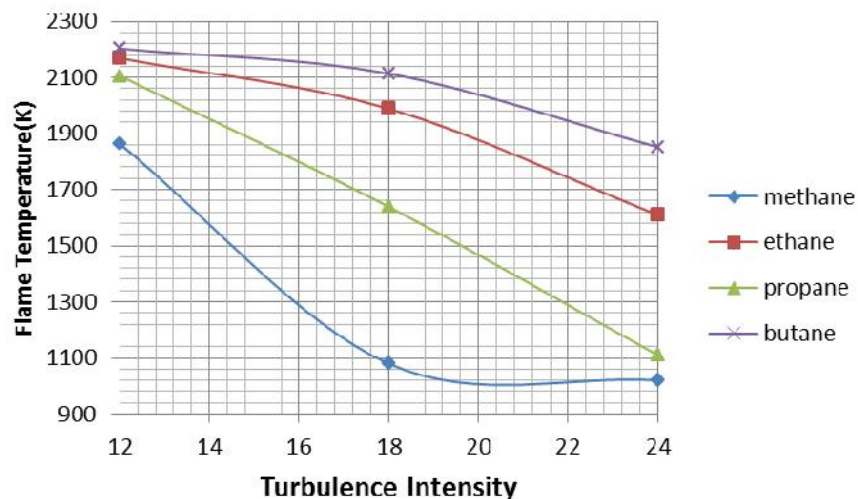


شکل 3. آلاینده‌گی ناکس بر حسب نسب هوا به سوخت اضافی برای سوخت‌های مختلف

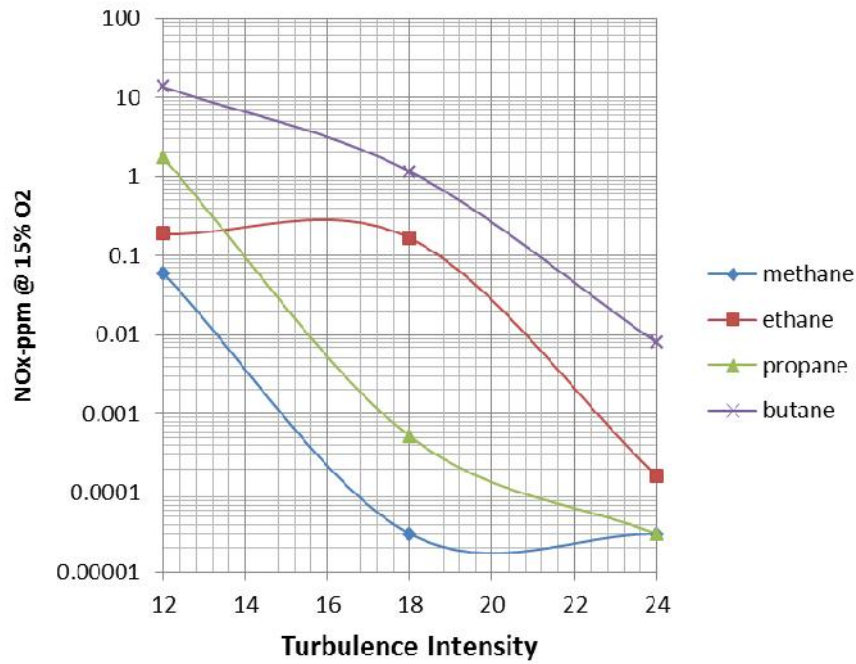


شکل 4. طول شعله بر حسب نسب هوا به سوخت اضافی برای سوخت‌های مختلف

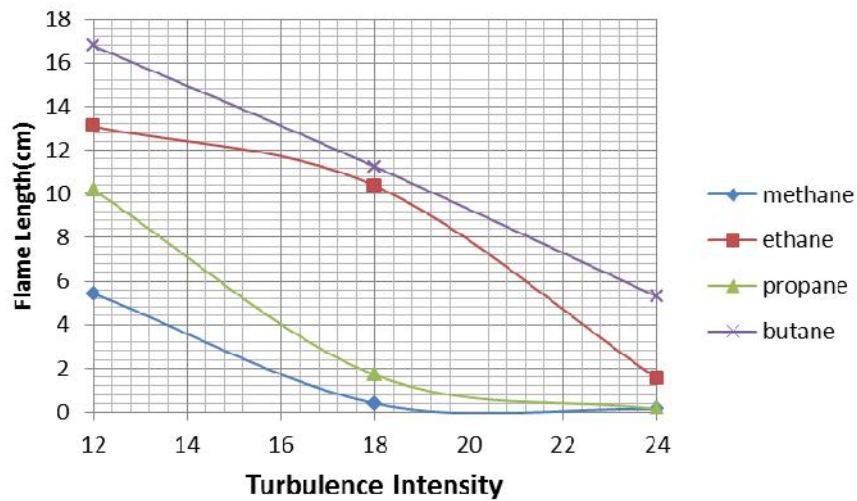
آلاینده‌گی ناکس، طول شعله و دمای شعله برای در صد هوای اضافی ۳.۵ در شدت توربولانسی‌های مختلف در اشکال ۵ تا ۷ نشان داده شده است. همانطور که در این اشکال مشاهده می‌گردد با افزایش شدت توربولانسی دمای شعله کاهش می‌یابد که این کاهش برای سوخت‌های مختلف متفاوت است. در مورد پروپان و متان با افزایش شدت توربولانسی شعله به سمت خاموش شدن پیش میرود و از نهایتاً خاموش می‌شود. آلاینده‌گی ناکس و طول شعله نیز در تمامی حالت‌ها به شدت کاهش می‌یابد و این در حالی است که شدت کاهش‌ها در مورد سوخت‌های مختلف متفاوت است. این پدیده نشان می‌دهد که سوخت‌های مختلف به شرایط توربولانسی ورودی واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند که جای بحث و بررسی بیشتری دارد.



شکل 5. دمای بیشینه شعله بر حسب شدت توربولانسی برای سوخت‌های مختلف



شکل 6. آلاینده‌گی ناکس بر حسب شدت توربولانسی برای سوخت‌های مختلف



شکل 7. طول شعله بر حسب شدت توربولانسی برای سوخت‌های مختلف

۴- نتیجه گیری

نتایج نشان دادند که طول، دمای شعله و آلاینده‌گی ناکس با افزایش درصد هوای اضافی کاهش می‌یابند. شدت توربولانسی نیز با افزایش نرخ مخلوط شدن هوا و سوخت، طول شعله را کاهش داده و به علت همگن‌تر شدن احتراق دمای بیشینه و در نتیجه آلاینده‌گی ناکس را نیز کاهش می‌دهد. میزان تاثیر شدت توربولانسی بر سوخت‌های مختلف متفاوت است به طوری که در بعضی موارد باعث خاموش شدن شعله می‌گردد.

مراجع

- [1] A. Rehman, R.M. Sarviya K.K. Gupta, "Bio-fuels for the gas turbine: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 14, pp. 2946–2955, July 2010.
- [2] Michael Moliere, "Stationary Gas Turbine and Primary Energies: a Review of Fuel Influence on Energy and Combustion Performance," *Journal of Thermal Science*, 2000.
- [3] Seok Bin Seo, Jae Hwa Chung, Yong Jin Joo, Dal Hong Ahn Min Chul Lee, "Combustion performance test of a new fuel DME to adapt to a gas turbine for power generation," *Fuel*, vol. 87, pp. 2162–2167, 2008.
- [4] C. Wilson L. Rye, "The influence of alternative fuel composition on gas turbine ignition performance," *Fuel*, vol. 96, pp. 277-283, 2012.
- [5] R.K. Cheng D. Littlejohn, "Fuel effects on a low-swirl injector for lean premixed gas turbines," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, pp. 3155–3162, 2007.
- [6] Michael Flamme, "New combustion systems for gas turbines (NGT)," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, pp. 1551-1559, 2004.
- [7] Etienne Lebas Iskender G, "Alternative fuels for industrial gas turbines (AFTUR)," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, pp. 1655–1663, 2004.
- [8] Seok Bin Seo, Jae Hwa Chung, Si Moon Kim, Yong Jin Joo, Dal Hong Ahn Min Chul Lee, "Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas," *Fuel*, vol. 89, pp. 1485-1491, 2010.
- [9] Victoria Sanderson Kexin Liu, "The influence of changes in fuel calorific value to combustion performance for Siemens SGT-300 dry low emission combustion system," *Fuel*, 2012.
- [10] Cheol-Hong Hwang Chang-Eon Lee, "An experimental study on the flame stability of LFG and LFG-mixed fuels," *Fuel*, vol. 86, pp. 649-655, 2007.
- [11] G.L. Juste, "Hydrogen injection as additional fuel in gas turbine combustor. Evaluation of effects," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, pp. 2112-2121, 2006.