

## بررسی احتراق در توربین های گازی و تاثیر اجزای سوخت بر خصوصیات آن

محمد قدیمی<sup>۱</sup>، فرزاد برهان آزاد<sup>۲</sup>، علیرضا ظهیری<sup>۳</sup>

پژوهشگاه نیرو- تهران شهرک غرب انتهای بلوار پونک باختری  
mghadimi@nri.ac.ir

### چکیده

افزایش عمر و کارایی قطعات مختلف در توربین های گازی مستلزم رعایت ملاحظات شیمیایی در ارتباط با سوخت، هوا و سایر جریان های ورودی می باشد. جهت بررسی مناسب بودن یک سوخت در توربین لازم است پارامترهای فیزیکی آن مانند ظرفیت حرارتی، نقطه شبنم، ضریب ژول-تامپسون و شاخص وب تعیین گردد. مشابهت سوخت مورد استفاده در توربین با مشخصات سوختی که در زمان طراحی به شرکت سازنده نیروگاه اعلام گردیده بسیار حائز اهمیت بوده و بر بسیاری از مشخصات توربین از جمله پایداری احتراق و عمر قطعات تاثیر می گذارد. در این مقاله ضمن بررسی تغییر خواص سوخت بر عملکرد توربین های گاز برخی از پارامتر های مورد بررسی در یکی از نیروگاه های کشور محاسبه گردیده است.

واژه های کلیدی: توربین گاز - احتراق - ترکیب سوخت

### 1- مقدمه:

یکی از مزایای توربین های گازی استفاده این تجهیزات از محدوده وسیعی از سوخت های گاز می باشد. با اینحال بهره برداری مناسب از این تجهیزات نیازمند یک گاز با ترکیب درصد و فشار ثابت است. زمانیکه توربین براساس آنالیز یک سوخت معین تنظیم می گردد قادر به فعالیت خوب در محدوده معین از خواص سوخت می باشد. در نتیجه چنانچه مشخصات سوخت گاز دچار تغییرات قابل ملاحظه ای گردد معمولاً توربین برای بهره برداری مطمئن با سوخت جدید نیاز به تنظیم مجدد دارد. در این حالت زمان مورد نیاز برای اجرای تنظیم توربین معمولاً متغیر بوده و بستگی به میزان تغییرات شرایط بهره برداری دارد. برای تغییرات کوچک در شرایط بهره برداری این تنظیم می تواند در کمتر از یک روز انجام پذیرد. در حالی که تغییرات اساسی در شرایط بهره برداری نظیر تغییر قابل ملاحظه در ترکیب سوخت ممکن است که به روزها خارج شدن واحد از مدار بیانجامد [1].

گاز طبیعی بعنوان سوخت اصلی توربین های گازی یک سوخت نسبتاً ارزان بوده که با توجه به میزان دسترسی و کم آلاینده بودن محصولات احتراق آن بطور وسیعی در این توربین ها مورد استفاده قرار می گیرد. با این حال کیفیت گاز طبیعی مورد استفاده در توربین ها اغلب یکنواخت نبوده و دستخوش تغییراتی می گردد. بطوریکه در گاز طبیعی اغلب علاوه بر متان مقداری هیدروکربن های سنگین، گاز های غیر قابل احتراق (نیتروژن و دی اکسید کربن)، آب، ترکیبات گوگردی و ناخالصی های جامد وجود دارد.

1- کارشناس ارشد مهندسی شیمی

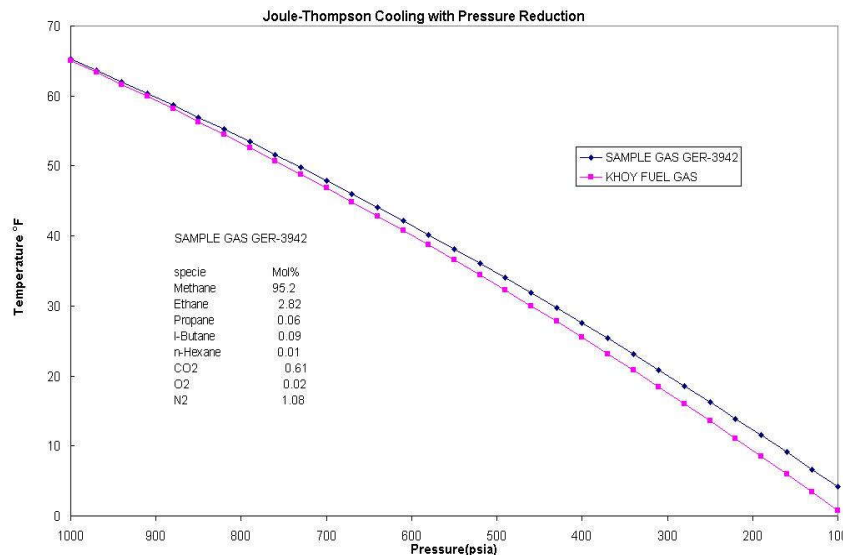
2- کارشناس مهندسی شیمی

3- کارشناس ارشد مهندسی شیمی

بر اساس مطالعات انجام گرفته تغییر ترکیب درصد گاز می‌تواند منجر به تغییرات ترموفیزیکی و شیمیایی گاز گردد. این تغییرات در خواص یک سوخت گاز در طول یک مدت زمان کوتاه می‌تواند باعث ایجاد مشکلات بهره‌برداری و عملیاتی در توربین‌های گاز گردد [1]. برای مثال تغییر قابل ملاحظه در ترکیب درصد گاز طبیعی می‌تواند باعث افزایش نرخ آزادسازی حرارت بصورت بی قاعده و نامنظم، تغییر درجه حرارت گازهای داغ، اشتعال خودبخودی سوخت، خاموش شدن شعله، اختلالات در سرعت شعله و در پاره‌ای از موارد انتشار بیش از حد آلاینده‌ها گازی گردد.

## 2- اثر وجود هیدروکربن‌های سنگین و رطوبت در سوخت توربین گاز و ضرورت تعیین نقطه شبنم

در توربین گاز سوخت قبل از ورود به محفظه احتراق معمولاً از میان یک سری تجهیزات و ایستگاههای کاهش فشار عبور می‌نماید. در گازهای واقعی در اثر تغییر فشار چنانچه گرما و یا کار با محیط تبادل نگردد تغییرات دمای گاز به واسطه پدیده (ژول-تامسون) مشاهده می‌شود. برای اغلب گازها به استثنای هیدروژن در اثر کاهش فشار در حین فرآیند، دمای گاز کاهش می‌یابد. در شکل 1 میزان کاهش دما بر اثر کاهش فشار برای دو نمونه گاز طبیعی (گاز طبیعی اشاره شده در منابع شرکت جنرال الکتریک و گاز طبیعی نیروگاه مورد بحث) نشان داده شده است. افت دمای گاز همانطوریکه در این شکل نشان داده شده است حدود  $7^{\circ}\text{F}$  به ازای کاهش هر 100 psi فشار ( $5/6^{\circ}\text{C}$  به ازای هر 1000Kpa) در شرایط آدیاباتیک می‌باشد.



شکل 1- سرمایش ژول-تامسون یک نمونه گاز طبیعی در اثر کاهش فشار [2]

در شرایط عملی کاهش دما تابع ترکیب اجزاء موجود در گاز و شرایط انتقال حرارت موضعی است. برای مثال در یک سیستم توربین گاز با فشار خط لوله 900 psi و دمای  $16^{\circ}\text{C}$  و میزان فشار قابل قبول 450 psi قبل از سیستم کنترلی توربین، دمای گاز تا  $17^{\circ}\text{C}$  می‌تواند افت داشته باشد [3]. علاوه بر این کاهش بیشتر دما بعد از عبور گاز از شیر کنترل توربین و در ماکزیمم مقدار زمانیکه واحد در بارمینیمم در حال بهره‌برداری است اتفاق می‌افتد. متأسفانه از آنجائیکه پدیده حمل مایعات توسط جریان گاز بسیار اتفاق می‌افتد نقطه شبنم هیدروکربن در این حالت افزایش یافته و تشکیل کندانسیت یک بحث و موضوع جدی می‌باشد. در این حالت جداسازی مایعات آزاد به تنهایی کافی نبوده و در بهترین شرایط حداکثر یک گاز اشباع با نقطه شبنم مساوی درجه حرارت گاز ایجاد می‌شود. به علت احتمال تشکیل مایعات در جریان پایین دستی، استفاده از دستگاههای جداسازی که در این حالت معمولاً ترکیب یک فیلتر جداکننده و یک سوپرهیتر می‌باشد، جهت جلوگیری تشکیل مایع ضروری است.

برای محاسبه نقطه شبنم گاز در یک فشار معین در صورت معلوم بودن ترکیب درصد آن می‌توان از معادلات نیمه تجربی نظیر ردلیش کوانگ (Redlich-Kwong) و پنگ رایبنسون (Peng-Robinson) استفاده نمود. در این حالت رابطه اساسی برای تعادل‌های فازی نظیر نقطه شبنم، برابری فوگاسیته هر جز در فاز مایع با فوگاسیته همان جزء در فاز بخار می‌باشد. در نتیجه در صورت برابری فوگاسیته یک جزء در چند فاز هم‌وزن در حال تماس هیچ انتقال جرمی بین فازها انجام نمی‌پذیرد. در صورت وجود آب در ترکیب یک گاز مسئله تا اندازه‌ای پیچیده می‌شود از آنجائیکه ترکیب سوخت گاز اغلب شامل آلکان‌ها می‌باشد فاز آبی در دماهای بالاتر می‌تواند تشکیل شود. در این حالت بهترین راه برای شناسایی نقطه شبنم تعیین نقطه شبنم آب و هیدروکربن و انتخاب درجه حرارت ماکزیمم است. جهت بررسی اثرات سوخت لازم است ترکیب درصد سوخت، درجه حرارت سوخت و فشار آن مشخص گردد. بدیهی است که وجود هیدروکربن‌های سنگین در مخلوط یک هیدروکربن گازی بر روی نقطه شبنم گاز تأثیر شدیدی می‌گذارد. معمولاً براساس استاندارد موجود برای اندازه‌گیری اجزاء موجود در گاز، هیدروکربن‌ها از متان تا پنتان بصورت مجزا ارائه شده و سایر هیدروکربن‌های سنگین‌تر از پنتان بصورت  $C_6^+$  گزارش می‌شود [2]. اگرچه ارائه آنالیز گاز به این صورت جهت محاسبه ارزش حرارتی گاز کافی می‌باشد اما همانطور که در ادامه نشان داده می‌شود بسته به اینکه جزء سنگین که بصورت  $C_6^+$  گزارش می‌شود چه ترکیبی باشد (هرچند که کمیت آن در آنالیز کلی گاز پایین هم باشد) میزان نقطه شبنم بصورت قابل ملاحظه تغییر می‌کند. در شکل 2 تغییرات نقطه شبنم گاز نیروگاه مورد بحث که با آنالیز جدول 1 بسته به اینکه ترکیب  $C_6^+$  کدام هیدروکربن باشد نشان داده شده است.

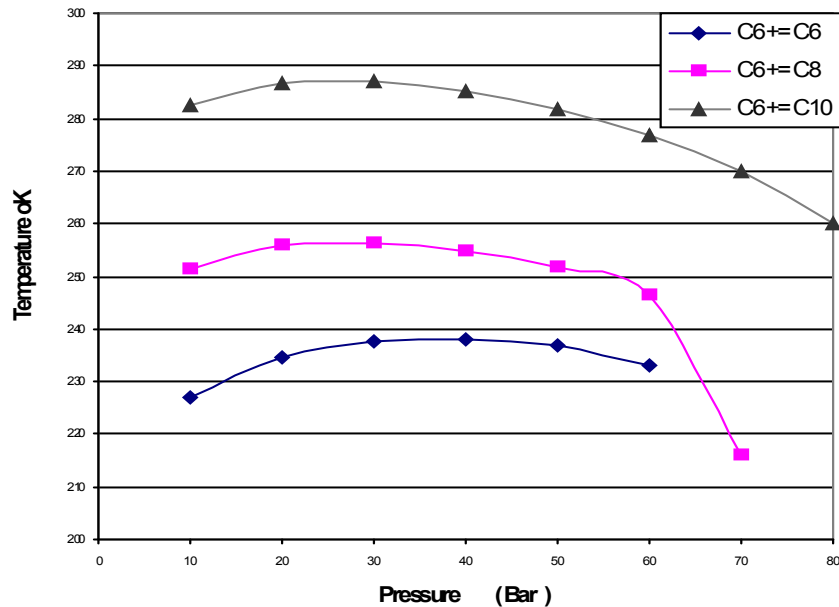
جدول 1- آنالیز گاز طبیعی نمونه برداری شده از نیروگاه مورد مطالعه [4]

| ردیف | جزء            | فرمول       | درصد مولی جزء در ترکیب |
|------|----------------|-------------|------------------------|
| 1    | نیتروژن        | $N_2$       | 4/1                    |
| 2    | دی اکسید کربن  | $CO_2$      | 0/6                    |
| 3    | متان           | $CH_4$      | 88/9                   |
| 4    | اتان           | $C_2H_6$    | 4/8                    |
| 5    | پروپان         | $C_3H_8$    | 0/95                   |
| 6    | ایزو بوتان     | $C_4H_{10}$ | 0/22                   |
| 7    | نرمال بوتان    | $C_4H_{10}$ | 0/3                    |
| 8    | ایزو پنتان     | $C_5H_{12}$ | 0/07                   |
| 9    | نرمال پنتان    | $C_5H_{12}$ | 0/05                   |
| 10   | هگزان و بالاتر | $C_6^+$     | 0/01                   |

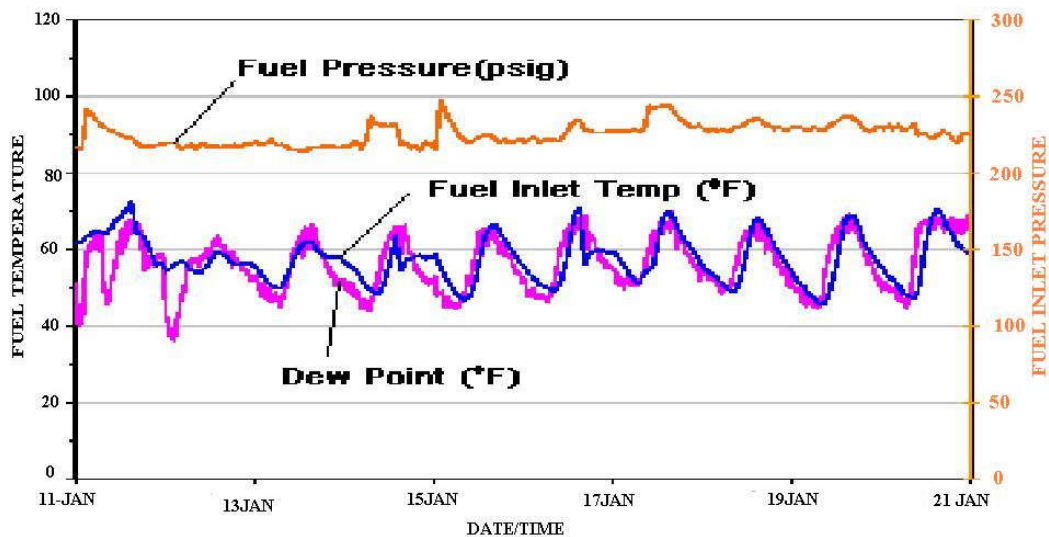
همانطوریکه از شکل 2 مشاهده می‌شود حتی مقادیر کوچک هیدروکربن‌های سنگین ( $C_6^+ = 0/01$  %) در یک ترکیب سوخت گاز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی نقطه شبنم مخلوط دارد. در شکل 3 تغییرات نقطه شبنم، دمای ورودی سوخت گاز و فشار سوخت در زمان‌های مختلف در یک توربین گازی نشان داده شده است [6]. این اطلاعات براساس اندازه‌گیری‌های on-line نقطه شبنم، دما و فشار سوخت بدست آمده است. این اطلاعات نشان می‌دهد که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در نقطه شبنم سوخت این توربین در طول زمان ( $7-8^\circ C$  تغییرات روزانه) اتفاق افتاده است.

دلیل عمده این تغییرات می‌تواند در اثر تغییر شرایط جوی (گرم و سرد شدن خط لوله) و وجود هیدروکربن‌های سنگین در گاز ناشی از تغییرات در منبع تأمین گاز یا مشکلات تصفیه در پالایشگاه گاز باشد. زمانیکه در داخل سوخت گاز، میعانات هیدروکربن‌های سنگین ایجاد می‌گردد معمولاً این میعانات بصورت توده‌ای (و نه به صورت بخارات ریز) در نقاط کم سطح تجمع یافته و سرانجام بطرف محفظه احتراق رانده می‌شود از آنجائیکه سیستم اندازه‌گیری دبی سوخت در این تجهیزات بر مبنای حجمی می‌باشد در اثر کاهش حجم میعانات، حرارت به ازای واحد حجم سوخت افزایش می‌یابد. این مسئله می‌تواند

منجر به ایجاد رگه‌هایی از گازهای داغ گردد (Streaks of hot gas) که در هنگام عبور این توده گازها از محفظه احتراق و توربین باعث اورهیت شدن قطعات داغ نظیر لاینر -ترانزیشن پیس و نازل‌های ردیف اول می‌گردد [7].



شکل 2- منحنی تغییرات نقطه شبنم برای گاز نیروگاه مورد مطالعه [4]



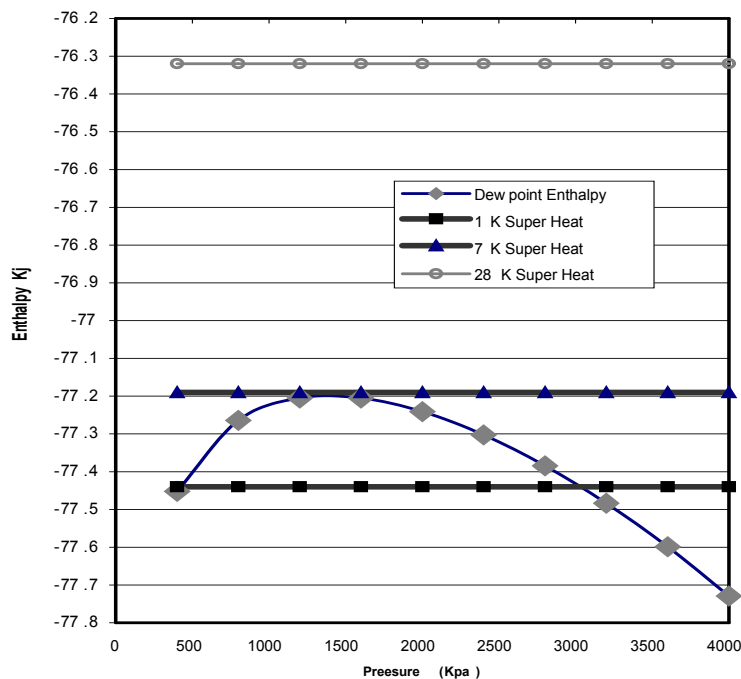
شکل 3 تغییرات نقطه شبنم، دما و فشار سوخت یک توربین گازی مورد مطالعه [6]

### 3- ضرورت تعیین حداقل درجه حرارت فوق اشباع

در شرایطی که احتمال تشکیل میعان‌ات در جریان سوخت گاز وجود دارد جدا کردن میعان‌ات به تنهایی کافی نبوده و در بهترین شرایط، حداکثر یک گاز اشباع با نقطه شبنم مساوی درجه حرارت گاز ایجاد می‌شود در نتیجه در اثر کاهش مجدد

دمای گاز ناشی از افت فشار مجدد در مسیر (از سپراتور تا مشعل) احتمال تشکیل میعانات تا حد بالایی افزایش می یابد، برای این منظور سازندگان توربین های گاز معمولاً یک حداقل درجه حرارت فوق اشباع را برای گاز تعریف می کنند حداقل درجه حرارت فوق اشباع در واقع یک حاشیه اطمینان از عدم تشکیل میعانات در اثر کاهش فشار یا تبادل حرارت با محیط در مسیر سیستم سوخت رسانی تا توربین گاز می باشد. در شکل 4 با استفاده از نرم افزار شبیه ساز Hysys نقطه شبنم سوخت گاز طبیعی نیروگاه مورد مطالعه با آنالیز جدول 1 بصورت تابعی از فشار ترسیم شده است. فشار محفظه احتراق برای این توربین گاز می تواند از حالت بار کامل تا حالت چرخش بدون بار (idle) بین 300 psi تا 100 psi (2070 kpa تا 690kpa) تغییر نماید. از طرف دیگر مشاهده می شود که در سه سطح مختلف درجه حرارت فوق اشباع (1k، 7k، 28k) انبساط گاز در داخل سیستم سوخت رسانی بسیار ناچیز می باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود در حالیکه گاز سوپر هیت نبوده و یا مقدار سوپر هیت گاز پایین باشد (1k) احتمال تشکیل میعانات زمانیکه خط فرآیند، زیر خط اشباع واقع گردد وجود دارد در حالیکه گاز حدود 7k سوپر هیت باشد همانطوریکه مشاهده می شود هیچ مایعی تشکیل نمی شود با این حال حاشیه امنیت فرآیند پایین می باشد.

با توجه به احتمال تغییرات مرتب و روزمره ترکیب درصد گاز طبیعی و بعضی خطاها در محاسبه نقطه شبنم گاز، ملاحظه می شود که 28k سوپر هیت یک حاشیه امنیت مناسب برای عدم تشکیل میعانات در سیستم سوخت رسانی و محفظه احتراق می باشد به همین منظور سازندگان توربین های گازی خصوصاً شرکت جنرال الکتریک، حداقل 28 k سوپر هیت را برای دمای گاز ورودی به سیستم سوخت رسانی را توصیه می کنند [8].



شکل 4- آنتالپی گاز در شرایط اشباع و در سه فرآیند انبساط آدیاباتیک با سه درجه حرارت سوپر هیت (گاز نیروگاه مورد بحث) [4]

#### 4- پارامترهای تعریف شده جهت تعیین قابلیت تعویض پذیری سوختهای گازی

با توجه به تغییرات روزمره در مشخصات گاز خطوط لوله، انجمن گاز آمریکا (American gas Institute) معیاری را برای قابلیت تعویض پذیری انواع سوخت های گاز با یکدیگر وضع نموده است. براساس تعریف این انجمن سوختهایی با یکدیگر قابل تعویض می باشند که مشخصات شعله حاصل در اثر تعویض سوخت تغییر نکند برای مثال شعله قطع نشود، نوک آن زرد نگردد

و برگشت شعله اتفاق نیافتد. قابلیت تعویض پذیری براساس اندازه گیری کمی اندیس‌هایی توصیف می‌شود. متداولترین اندیس‌های مورد استفاده در این رابطه به شرح ذیل می‌باشند:

#### 4-1- اندیس وب (wobbe index)

این اندیس برای شناسایی مشابهت یک مخلوط گاز از لحاظ میزان حرارت آزاد شده تعریف شده است. براساس مفاهیم پایه‌ای دینامیک سیالات چنانچه یک گاز با ارزش حرارتی  $q_v$  و دانسیته  $\rho$  از یک ارفیس با قطر خارجی  $D$  و افت فشار  $\Delta p$  عبور نماید میزان حرارت خروجی از این قسمت برابر است با

$$= KD^2 \sqrt{\Delta p} \frac{q_v}{\sqrt{\rho}} \quad \text{حرارت خروجی} \quad (1)$$

در صورتی که افت فشار در داخل ارفیس و قطر خارجی آن ثابت نگه داشته شود اندیس وب بصورت ذیل تعریف می‌شود:

$$Wi = \frac{q_v}{\sqrt{\rho}} \quad (2)$$

ثابت بودن اندیس وب در سوخت باعث ثابت نگه داشتن نرخ حرارت در یک مشعل می‌شود. حالت اصلاح شده ضریب وب، تصحیح اثر درجه حرارت سوخت می‌باشد. در این حالت ضریب اصلاح شده وب با تصحیح درجه حرارت برابر است با:

$$Wi = \frac{q_v}{\sqrt{\rho}} \sqrt{\frac{T_{rf}}{T}} \quad (3)$$

که در آن  $T$  و  $T_{rf}$  به ترتیب درجه حرارت مرجع و درجه حرارت تحویل گاز به نیروگاه می‌باشند. در نتیجه اندیس وب در فشار ثابت متناسب با نرخ آزاد شدن حرارت از سوخت است.

#### 4-2- اندیس‌های ویور (Weaver Indexes)

بصورت عمومی سازندگان توربین گاز به استفاده کنندگان از این سیستم‌ها توصیه می‌کنند که برای تعیین قابلیت تعویض پذیری گازها از اندیس وب استفاده نمایند. با اینحال بکارگیری این اندیس به تنهایی برای تعیین قابلیت تعویض پذیری سوخت در توربین‌های گازی کافی نمی‌باشد. چرا که اندیس وب تنها مطابقت داشتن و یکنواخت بودن حرارت آزاد شده برای یک مشعل را در نظر می‌گیرد. از اینرو اندیس‌های دیگری برای پایش سایر خصوصیات شعله تعریف شده‌اند که به اندیس‌های ویور مشهور می‌باشند. این اندیس‌ها میزان آزاد شدن حرارت، بلند شدن شعله، برگشت شعله و زردی نوک آن در یک گاز مفروض تعویض شده با یک گاز مرجع را با یکدیگر مقایسه می‌کنند. و بصورت روابط زیر ارائه می‌شوند.

$$J_M = \frac{H_s}{H_a} \left( \frac{G_a}{G_s} \right)^{0.5} \quad \text{میزان افزایش حرارت} = J_M \quad (4)$$

$$J_A = \frac{B_s}{B_a} \left( \frac{G_a}{G_s} \right)^{0.5} \quad J_A : \text{تغییر در هوای اولیه} \quad (5)$$

$$J_L = J_A \frac{V_s}{V_a} \left( \frac{100 - Q_s}{100 - Q_a} \right) \quad J_L : \text{اندیس متغیر یا بالا رفتن شعله} \quad (6)$$

$$J_F = \frac{V_s}{V_a} - 1.4 J_A + 0.4 \quad J_F : \text{اندیس بازگشت شعله} \quad (7)$$

$$J_Y = J_A + \frac{N_s - N_A}{110} - 1 \quad J_Y : \text{اندیس زردی نوک شعله} \quad (8)$$

$$J_I = J_A - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634 \quad (9)$$

: اندیس احتراق کامل  $J_I$

پارامترهای استفاده شده در معادلات (4) الی (9) عبارتند از :

H : ارزش حرارتی گاز برحسب بی تی یو بر فوت مکعب ( $\text{BTU}/\text{ft}^3$ )

G : وزن مخصوص گاز ( هوا = 1 )

B : هوای تئوری لازم برای احتراق کامل سوخت برحسب فوت مکعب/فوت مکعب گاز

S, a : اندیس‌های مربوط به گاز اصلی و گاز جایگزین شده

V : سرعت شعله برحسب فوت بر ثانیه

N : تعداد اتم‌های کربن که در احتراق هر 100 ملکول گاز به آسانی از آن جدا می‌شوند (با فرض آن که هیدروکربن‌های اشباع

شده دارای یک اتم کربن به ازای هر مول می‌باشند).

R : نسبت تعداد اتم‌های هیدروژن در هیدروکربن

اندیس‌های ویور براساس آزمایشات انجام شده بر روی تعدادی از مشعل‌های صنعتی با شعله‌های نفوذی و تعداد اندکی از

مشعل‌های پیش آمیخته بدست آمده‌اند. این اندیس‌ها میزان تغییر در هوای مورد نیاز برای احتراق در شرایط استوکیومتری را

جهت جبران تغییرات در اجزاء سوخت تعیین می‌کنند [1].

## 5- بررسی اثر ترکیب درصد سوخت بر روی خواص احتراق

### 5-1- تاثیر بر ضریب هم ارزی

یکی از پارامترهای مهمی که در اثر تغییر در ترکیب درصد اجزاء سوخت دستخوش تغییر می‌شود ضریب هم‌ارزی

می‌باشد. این ضریب در بحث احتراق معیاری برای نسبت سوخت به هوا می‌باشد. براساس تعریف، ضریب هم‌ارزی عبارت از

نسبت سوخت به هوا در شرایط واقعی به نسبت سوخت به هوا در شرایط استوکیومتری می‌باشد.

$$\phi = \frac{\left(\frac{m'Fuel}{m'air}\right)_{real}}{\left(\frac{m'Fuel}{m'air}\right)_{stoichiometric}} \quad (10)$$

در احتراق توربین‌های گازی از آنجا که احتراق در شرایط هوای اضافه (ضریب هم‌ارزی کمتر از 1) انجام می‌شود پایداری

شعله در محفظه احتراق در محدوده معینی از تغییرات ضریب هم‌ارزی واقع می‌گردد (شکل 5).

برای بررسی میزان تغییرات ضریب هم‌ارزی در اثر تغییر در ترکیب درصد سوخت، در جدول (2) مقایسه‌ای بین ضریب

هم‌ارزی گازهای متان، اتان و پروپان با 6 نوع گاز طبیعی با اجزاء مختلف انجام گرفته است. (NG1 الی NG6) ترکیب

گازهای طبیعی با تغییر نسبت هیدروکربن‌ها (متان، اتان و پروپان) و اضافه کردن یک ماده رقیق کننده (نیترژن) به گاز

طبیعی با ترکیب NG1 بدست آورده شده است. همانطوریکه در بخش بالا ذکر گردید این ضریب معیاری از درجه حرارت

شعله و پایداری آن می‌باشد. براساس محاسبات انجام شده که نتایج آن در جدول 2 آورده شده است. اگر محفظه احتراق در

یک توربین گاز با ترکیب گاز با مشخصات گاز NG1 فعالیت نموده و دبی جرمی هوا و سوخت در آن به ترتیب 100 lb/s و

3lb/s باشد مقدار ضریب هم‌ارزی در محفظه احتراق آن 0/505 می‌باشد.

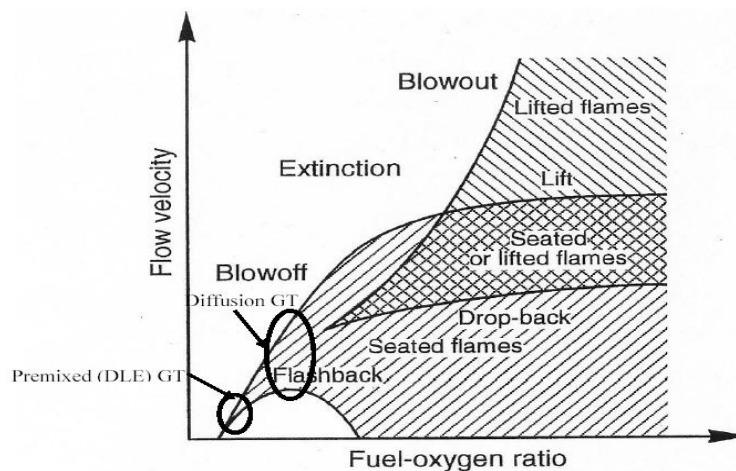
در این حالت اگر سوخت گاز با ترکیب NG6 جایگزین گاز NG1 شود (در شرایط ثابت دبی جرمی هوا و سوخت) با

وجود ثابت بودن ضریب وب برای هر دو نوع ترکیب گاز NG6 و NG1 ( $\text{WobbeIndex}=1352$ ) ضریب هم‌ارزی به میزان

16/6 درصد کاهش یافته و به مقدار 0/421 می‌رسد. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود تغییر در ترکیب درصد سوخت گاز

نظیر آنچه در بالا ذکر شد می‌تواند منجر به یکسری مشکلات عملیاتی نظیر فروکش کردن شعله، دینامیک ضعیف احتراق و

افزایش میزان انتشار منواکسید کربن گردد.



شکل 5- رژیم‌های شعله بصورت تابعی از نسبت اکسیژن به سوخت [9]

جدول 2- خواص سوخت برای سه نوع گاز خالص و 6 نوع ترکیب گاز طبیعی [1]

| NG <sub>6</sub> | NG <sub>5</sub> | NG <sub>4</sub> | NG <sub>3</sub> | NG <sub>2</sub> | NG <sub>1</sub> | پروپان | اتان   | متان   | جزء / خاصیت   |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|---|
| 75              | 77              | 79              | 82              | 85              | 90              | 0      | 0      | 100    | متان (درصد حجمی)                                      |
| 0               | 10              | 20              | 0               | 15              | 5               | 0      | 100    | 0      | اتان (درصد حجمی)                                      |
| 19              | 9.6             | 0               | 14.5            | 0               | 5               | 100    | 0      | 0      | پروپان  |
| 6               | 3.4             | 1               | 3.5             | 0               | 0               | 0      | 0      | 0      | نیترژن  |
| 20498           | 20708           | 21026           | 20701           | 21228           | 21222           | 19930  | 20417  | 21503  | ارزش پایین حرارتی Btu/lb                              |
| 0.0614          | 0.0572          | 0.0528          | 0.0572          | 0.0506          | 0.0505          | 0.228  | 0.0837 | 0.0447 | گاز دانسیته (STP, lb/ft <sup>3</sup> )                |
| 1352            | 1352            | 1352            | 1352            | 1352            | 1352            | 1980   | 1675   | 1288   | اندیس وب Btu/ft <sup>3</sup>                          |
| 15.22           | 15.78           | 16.44           | 15.79           | 16.82           | 16.83           | 15.57  | 15.98  | 17.11  | نسبت جرمی هوا / سوخت A/F                              |
| 0.421           | 0.45            | 0.484           | 0.45            | 0.504           | 0.505           | 0.467  | 0.479  | 0.513  | ضریب هم ارزی ( $\phi$ ) (100lbAir)(31bFuel)           |
| 16.56           | 10.95           | 4.18            | 10.85           | 0.13            | 0.00            |        |        |        | درصد تغییر ضریب هم ارزی نسبت به ترکیب NG <sub>1</sub> |

### 5-2- تأثیر بر روی درجه حرارت خود اشتعالی

اشتعال خودبخودی فرآیندی است که در آن یک مخلوط سوخت و هوا در یک شرایط مشخص بطور خودبخودی محترق می‌شوند. دما و یا تأخیر زمانی معیاری برای شناسایی فرآیند اشتعال خودبخودی می‌باشد.

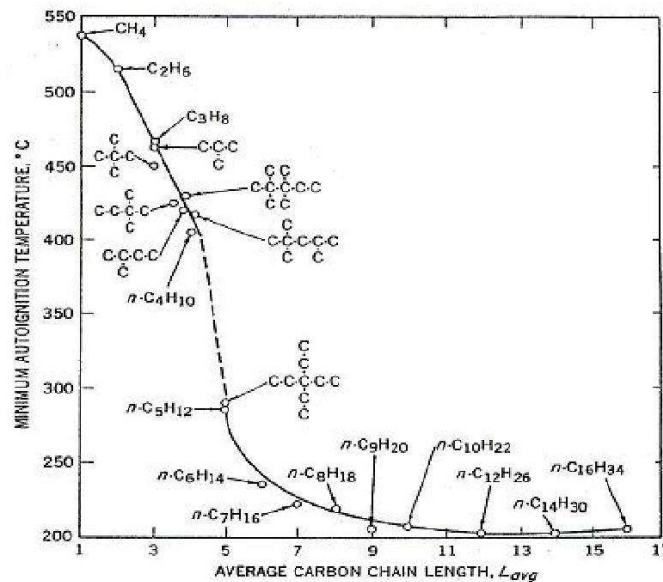
براساس تعریف، درجه حرارت اشتعال خودبخودی حداقل درجه حرارتی است که در آن دما یک مخلوط قابل اشتعال بدون نیاز به عامل خارجی برای اشتعال محترق می‌شود. مدت زمان مورد نیاز برای انجام یک اشتعال خودبخودی از دو قسمت تشکیل شده است.

- مدت زمان مورد نیاز برای اختلاط هوا و سوخت و ایجاد یک مخلوط قابل اشتعال که بستگی به ماهیت فیزیکی فرآیند اختلاط دارد

- مدت زمان مورد نیاز برای انجام واکنش‌های شیمیایی احتراق که وابسته به سینتیک شیمیایی احتراق سوخت در مخلوط قابل اشتعال می‌باشد.



از اشتعال خودبخودی معمولاً در موتورهای دیزل برای احتراق سوخت و تولید نیرو استفاده می‌شود. با اینحال این نوع احتراق در بسیاری از موتورها از جمله توربین‌های گازی مطلوب نمی‌باشد. در توربین‌های گازی احتراق زود هنگام سوخت می‌تواند باعث حرکت و انتقال شعله به منطقه‌ای گردد که برای تحمل دما و ضربه شعله طراحی نشده باشد. این مسئله معمولاً منجر به تخریب زود هنگام سخت افزار توربین می‌گردد. در شکل (6) درجه حرارت اشتعال خودبخودی بصورت تابعی از وزن مولکولی سوخت برای هیدروکربن‌های خطی شاخه‌دار نشان داده شده است.



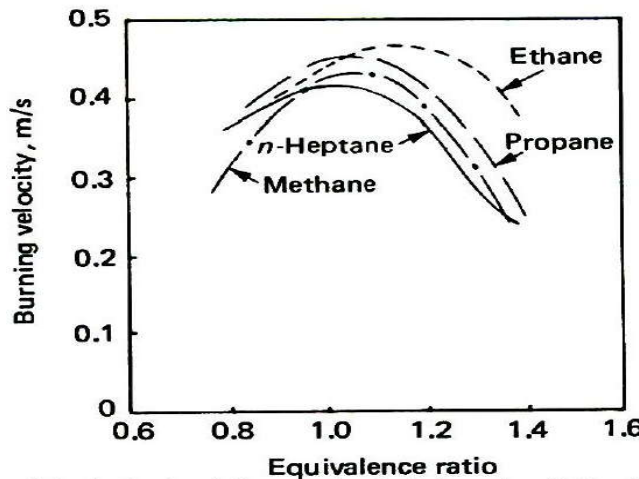
شکل 6- درجه حرارت خود اشتعالی تعدادی از هیدروکربن‌های خطی شاخه دار بصورت تابعی از وزن مولکولی [1]

همانطوریکه از این شکل مشاهده می‌شود متان در بین هیدروکربن‌های متداول دارای بالاترین درجه اشتعال خودبخودی می‌باشد. درجه حرارت خوداشتعالی بصورت نمایی با افزایش وزن مولکولی هیدروکربن کاهش می‌یابد. حضور مقادیر قابل ملاحظه‌ای از هیدروکربن‌های سنگین نظیر C<sub>4</sub>+ می‌تواند سبب پایین آمدن درجه حرارت اشتعال خودبخودی به مقدار معادل درجه حرارت مخلوط سوخت و هوا در محل ورود به منطقه پیش اختلاط گردد. (برای مثال درجه حرارت خروجی کمپرسور در توربین‌های گازی) این مسئله باعث افزایش احتمال اشتعال خودبخودی مخلوط سوخت و هوا پیش از رسیدن به منطقه شعله می‌شود. با مطالعات انجام شده با استفاده از انواع مختلف گازهای طبیعی از مخلوط‌های متان، اتان و پروپان و تهیه مدل سینتیکی مشخص گردید که افزایش درجه حرارت، فشار یا ضریب هم‌ارزی باعث کاهش مدت زمان موردنیاز برای اشتعال خودبخودی می‌گردد. همچنین مشخص گردید که حضور اتان و پروپان باعث کاهش تأخیر زمانی در پدیده خوداشتعالی نسبت به متان خالص گردیده و این میزان کاهش در تأخیر زمانی با افزایش غلظت اتان و پروپان افزایش می‌یابد. این نتایج برای صنایع استفاده کننده از توربین‌های گازی بسیار حائز اهمیت می‌باشد چرا که می‌توان اظهار نمود که یک تغییر قابل ملاحظه در ترکیب درصد سوخت گاز حتی با وجود قرار گرفتن ارزش حرارتی در یک محدوده مشخص، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی خواص خوداشتعالی مخلوط دارد.

### 5-3- تأثیر بر روی سرعت سوختن، فروکش شدن شعله و پدیده بازگشت شعله

سرعتی که در آن سرعت پخش شعله به داخل مخلوط سوخت و هوا اتفاق می‌افتد بستگی به ترکیب اجزاء سوخت و نسبت هوا به سوخت دارد. بر همین اساس سرعت سوختن مخلوط هوا و سوخت تأثیر مستقیم بر پدیده‌های خاموش شدن شعله و بازگشت شعله در داخل محفظه احتراق دارد.

خاموش شدن شعله یا اطفاء آن به نقطه کاری گفته می‌شود که در آن نرخ حرارت آزاد شده در اثر احتراق پایین‌تر از مقدار مورد نیاز برای محترق ساختن مخلوط هوا و سوخت ورودی به محفظه احتراق است [10]. در تحقیقات انجام گرفته متعددی اثر ساختار ملکولی هیدروکربن‌ها بر روی سرعت سوختن (که در پاره‌ای اوقات تحت عنوان سرعت شعله نامیده می‌شود) مورد مطالعه قرار گرفته است. بر همین اساس برای تعداد اتم‌های کربن یکسان تا 4 عدد کربن نشان داده می‌شود که هیدروکربن‌های اشباع نشده دارای سرعت سوختن بالاتری نسبت به هیدروکربن‌های اشباع شده متناظر خود می‌باشند. نوع پیوندها و موقعیت آنها دلیل این اختلاف می‌باشد.



شکل 7- سرعت سوختن لایه‌ای بصورت تابعی از ضریب هم‌ارزی و نوع سوخت [10]

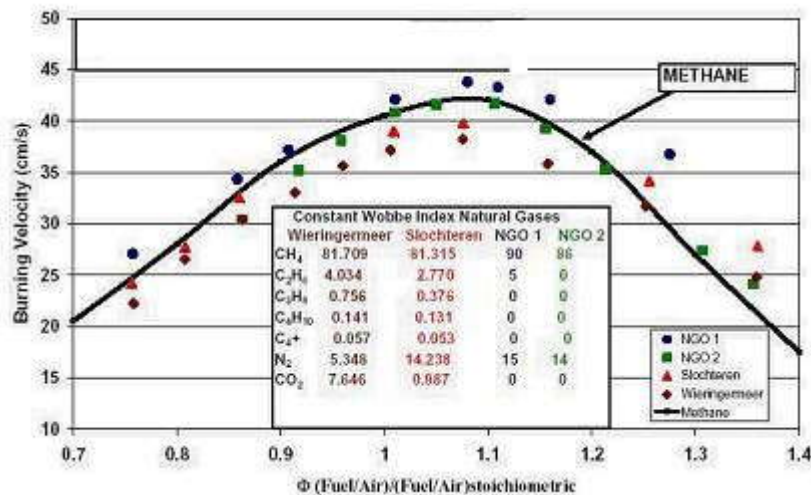
در شکل 7 سرعت سوختن لایه‌ای انواعی از سوختها بصورت تابعی از ضریب هم‌ارزی نشان داده شده است طبق این شکل سرعت سوختن لایه‌ای (متان، اتان و پروپان) در یک مقدار نسبتاً جزئی غنی تر از استوکیومتری به یک مقدار ماگزیم می‌رسد. از آنجائیکه در توربین‌های گاز رژیم جریان بصورت توربولانس می‌باشد سرعت توربولانس در هر لحظه از زمان توسط رابطه 11 محاسبه می‌شود.

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad (11)$$

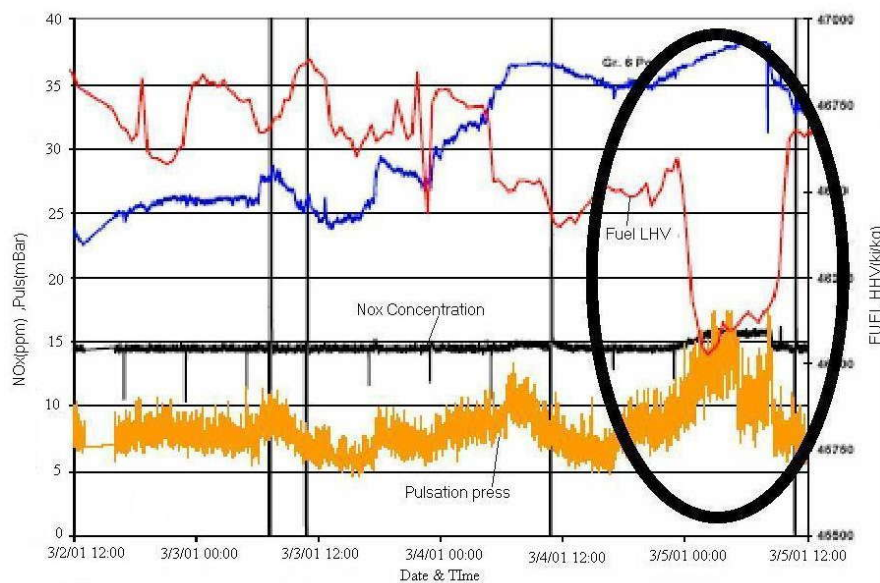
در این رابطه  $V$  سرعت سوختن توربولانس،  $\bar{V}$  سرعت متوسط سوختن و  $V'$  سرعت لحظه‌ای می‌باشد. براساس مطالعات انجام گرفته توسط تعدادی از محققین مشخص شده که سرعت سوختن توربولانس به سرعت سوختن لایه‌ای و میزان نوسانات لحظه‌ای بصورت غیرخطی وابسته است. در نتیجه توربولانس می‌تواند باعث تغییرات کوچک در سرعت سوختن لایه‌ای و در نتیجه اثرات آن گردد. در شکل (8) تغییرات سرعت سوختن لایه‌ای به صورت تابعی از ضریب هم‌ارزی برای چند نوع گاز طبیعی با ضریب وب یکسان و ترکیب درصدهای مختلف اندازه‌گیری شده است. همانطوریکه در این شکل نشان داده شده سرعت سوختن لایه‌ای می‌تواند تا بیش از ده درصد برای سوخت‌هایی که دارای ضریب وب یکسان می‌باشند متفاوت باشد. در نتیجه اختلافات نسبتاً کوچک در سرعت سوختن لایه‌ای می‌تواند در جریان‌های بسیار اغتشاشی نظیر جریان سیالات در داخل محفظه احتراق توربین‌های گازی بسیار حائز اهمیت باشد. تغییرات در سرعت سوختن بواسطه اختلاف در اجزاء سوخت می‌تواند منجر به افزایش تمایل ایجاد پدیده‌های فروکش شدن شعله یا برگشت شعله تحت شرایطی که توربین گاز قبلاً بصورت طبیعی عمل می‌کرده گردد. همچنین این تغییرات می‌تواند باعث افزایش دینامیک احتراق، کاهش عمر قطعات و افزایش تعمیرات گردد.

#### 5-4- تأثیر بر روی دینامیک احتراق

دینامیک احتراق معمولاً به نوسانات فشار در داخل محفظه احتراق اطلاق می‌شود و می‌تواند در هر تجهیز احتراقی اتفاق افتد. نوسانات فشار در داخل محفظه احتراق مربوط به دینامیک احتراق که بصورت سر و صدای خارجی قابل شنود می‌باشد می‌تواند باعث صدمه زدن به سلامت پرسنل گردد. علاوه بر این اگر موج های فشار تشدید شوند ممکن است باعث ایجاد خسارت قابل ملاحظه به سخت افزار سیستم گردند



شکل 8- سرعت سوختن لایه‌های انواع سوخت‌های گاز با ضریب وب ثابت [11].



شکل 9- اثر تغییرات اجزاء سوخت بر روی دینامیک احتراق و میزان انشای اکسیدهای نیتروژن (NOx) [5]

دینامیک احتراق در اصل در اثر یکی شدن و بهم پیوستن نوسانات فشار و میزان انرژی آزاد شده ایجاد می‌شود. از آنجائیکه به منظور پایین بودن میزان آلاینده‌ها در توربین‌های گازی ضرورت دارد که بهره‌برداری در حد پایین قابلیت اشتعال پذیری انجام پذیرد. فرآیند احتراق در این توربین‌ها بصورت ذاتی پایداری کمی دارد [1]. براساس مطالعات انجام شده مشاهده گردیده که تغییر در ترکیب اجزاء سوخت گاز (که بصورت تغییر در ارزش حرارتی پایین سوخت قابل مشاهده است) بر روی میزان نوسانات فشار (دینامیک احتراق) در سیستم‌های احتراقی تأثیر گذاشته و باعث افزایش نوسانات فشار با یک ضریب 50 درصد می‌گردد (شکل 9) [5].

## نتیجه گیری

همانطوریکه در مقاله اشاره گردید، احتراق در یک تجهیز احتراقی نظیر توربین گاز به ترکیب سوخت مورد استفاده بسیار وابسته است. از آنجا که اکثر توربین های گازی داخل کشور سوخت خود را از خط لوله سراسری تامین می کنند، ترکیب اجزاء سوخت مورد استفاده در این توربین ها با توجه به تغییرات اجزاء سوخت خط لوله ثابت نبوده و در زمانهای مختلف دستخوش تغییراتی می گردد.

براساس مطالعات انجام شده، بیشتر تغییرات اجزاء سوخت مربوط به هیدروکربن های سنگین آن می باشد. این در حالی است که حضور هیدروکربن های سنگین در سوخت توربین گاز، علاوه بر احتمال تشکیل میعانات در سیستم سوخت رسانی (به دلیل افزایش نقطه شبنم گاز) بر بسیاری از خواص بنیادی احتراق نظیر سرعت سوختن، برگشت شعله، اشتعال خودبخودی و دینامیک احتراق تاثیر گذاشته و به دلیل تبدیل منواکسید نیتروژن به دی اکسید نیتروژن، نقش قابل ملاحظه ای در انتشار آلاینده ها (دود مرئی) از دودکش نیروگاه دارند.

با توجه به آنکه در نیروگاه نمی توان فعالیت پالایشی چندانی بر روی سوخت انجام داد، لازم است تدابیر لازم برای مقابله با اثرات سوء تغییر اجزاء سوخت اتخاذ گردد.

برای مثال تعیین آنالیز سوخت و نقطه شبنم واقعی گاز و بالا بردن دمای سوخت تا حداقل درجه حرارت فوق اشباع مورد نیاز یکی از اقدامات بسیار ضروری در یک بهره برداری مطمئن می باشد که به منظور تعیین میزان دمای مورد نیاز برای سوخت بهتر است آنالیز آن به صورت مستمر و یا حداقل با فواصل کم صورت پذیرد.

علاوه بر این در صورت تغییرات قابل ملاحظه در ترکیب درصد سوخت تا مقادیر فراتر از مقدار مجاز اعلام شده توسط سازنده، برای جلوگیری از صدمات احتمالی لازم است با توجه به پارامترهای تعریف شده برای تعویض پذیری سوخت ها و محاسبه اندیس های مربوطه و مقایسه آنها با مقادیر متناظر با آنالیز گاز در زمان طراحی، در رابطه با تنظیم مجدد توربین تصمیم گیری نمود.

## مراجع

- [1] Richard J. Roby, et al "Effect of Fuel Composition on Gas Turbine Operability and Emissions" Combustion Science & Engineering, Inc, September 3, 2004
- [2] Hysys, " a gas process simulation program". Hyprotech Corporate, Calgary, Alberta ,Canada
- [3] "GAS FUEL CLEAN-UP SYSTEM DESIGN CONSIDERATIONS FOR GE HEAVY-DUTY GAS TURBINES" GER-3942
- [4] " محمد قدیمی "بررسی اثرات ناشی از ناخالصی های سوخت گاز بر عملکرد توربین های گازی نیروگاه... "گزارش های مراحل دوم وسوم، پژوهشگاه نیرو 1385
- [5] Nord, L. O., Anderson, H. G. Influence of variations in the natural gas properties on the combustion process in terms of emissions and pulsations for a heavy-duty gas turbine. Proceedings of International Joint Power Generation Conference 2003,
- [6] Newbound, T.D., Wagiealla, W.,2003, 'On-Line Hydrocarbon Dew Point Monitoring in Fuel Gas', ASME GT2003-38868
- [7] Rainer Kurz "GAS TURBINE FUEL CONSIDERATIONS" Solar Turbine Incorporated San Diego, CA
- [8] "Specification for Fuel Gases for Combustion in Heavy-Duty Gas Turbines, January 2002 GEI 41040G
- [9] Glassman, Irvin. Combustion (3rd Edition). San Diego: Academic Press. 1996.
- [10] Lefebvre, A. H. Gas Turbine Combustion. Philadelphia: Taylor & Francis. 1998.
- [11] Oostendorp, D. L., Levinsky, H. B. The Effects of Fuel and Non-Fuel Gases on the Laminar Burning Velocity of Methane-Air Flames. Journal of Institute of Energy, December 1990, Volume 63, pp 160-166.