

کاهش تعمیرات، افزایش راندمان و کاهش NOX توربین‌های گازی با استفاده از تصفیه ترکیبی سوخت

مختار بیدی^{*}، زهرا مهدوی، هادی اله یاری[‡]

* دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مکانیک و انرژی، † نیروگاه منتظر قائم، ‡ شرکت مپنا

ایمیل نویسنده رابط: m_bidi@sbu.ac.ir

چکیده

توربین‌های گازی از جمله مهمترین تجهیزات در صنایع نفت و نیرو محسوب می‌شوند. نیروگاه‌ها برای کاهش مشکلات بهره برداری و تعمیرات تمایل به استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت اصلی دارند. اما محدودیت ظرفیت تولید فعلی گاز طبیعی به خصوص در فصول سرد سال موجب می‌شود نیروگاه‌ها ناچار به استفاده از گازوییل به عنوان سوخت جایگزین شوند. وجود ذرات معلق و محلول در سوخت‌های مایع موجب کاهش راندمان اتمیزاسیون و کاهش راندمان احتراق می‌گردد. بعلاوه ایجاد شرایط احتراق نامناسب را به همراه خواهند داشت که در مسیر عبور گازهای داغ، مشکلات جدی شامل خوردگی و رسوب دوده ایجاد می‌کند. از مهمترین این ناخالصی‌ها می‌توان به سولفور، فلزات آلیکالی^۱ و وانادیم اشاره کرد که با مکانیزم‌های مختلف مشکلات زیادی در توربین‌های گازی ایجاد می‌کنند. در این مقاله مهمترین روش‌های جداسازی ذرات معلق و محلول از سوخته‌ای سنگین بیان می‌شود که تنها موجب کاهش مشکلات مربوط به مصرف گازوییل در توربین‌های گازی می‌شوند، بلکه در صورت طراحی و اجرای مناسب سیستم تصفیه سوخت می‌توان حتی از یک سوخت سنگین مانند مازوت به عنوان سوخت توربین گاز استفاده کرد. سیستم تصفیه سوخت پیشنهادی علاوه بر کاهش مشکلات خوردگی و رسوب گذاری و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، موجب کاهش تولید آلاینده‌های گلخانه‌ای نیز خواهد شد. در واقع ترکیبی از روش‌های تصفیه فیزیکی، کاهش ویسکوزیته، جداسازی ذرات معلق به روش سانتریفوژ و نیز تغییر ماهیت و یا خنثی‌سازی ناخالصی‌های محلول با افزودن مواد شیمیایی به عنوان راه حل مناسب برای تصفیه کامل گازوییل و سوخت سنگین در واحدهای گازی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: توربین گاز، تصفیه سوخت، خوردگی، گازوییل، مازوت

^۱ - alkali

مقدمه

توربین قلب یک نیروگاه گازی است.. مهمترین عواملی که کاربرد توربین های گازی را افزایش داده است راندمان بهبود یافته، دردسترس بودن و توانایی کارکرد در محدوده وسیعی از سوخت های گاز و مایع است. هرچند گاز طبیعی بهترین انتخاب برای توربین های گازی می باشد اما بسیاری از کشورها برای تامین گاز طبیعی دچار مشکل هستند و ترجیح می دهند که سوخت های ارزانهتری را برای تولید توان بکار ببرند. به عنوان مثال در بعضی از کشورهای خاورمیانه مانند عراق و عربستان سعودی که از نظر تامین سوخت گاز دچار محدودیت هستند ولی سرشار از منابع هیدروکربنی مایع هستند استفاده از سوخت سنگین تصفیه شده نتایج موفقتری را داشته است. سوخت های مایع در بیشتر موارد مناسب ترین و دردسترس ترین منابع سوخت جایگزین هستند. از جمله مهمترین سوخت های مایع می توان گازوییل و مازوت را نام برد. سوخت های مایع به سه دسته سوخت های سبک، نیمه سنگین و سنگین دسته بندی می شوند که بر حسب محدوده خواص فیزیکی سوخت شامل چگالی، گرانروی و ناخالصی های سوخت تعریف می شوند. درحالی که بنزین یک سوخت سبک و مازوت یک سوخت سنگین محسوب می شود، گازوییل در اکثر موارد در رده سوخت های نیمه سنگین قرار می گیرد. هرچند آنالیز منابع مختلف گازوییل بسیار متغیر است به گونه ای که در برخی موارد حتی می توان آن را سوخت سنگین نامید.

ویسکوزیته بالا و ناخالصی ها موجب دشوار شدن اتمیزاسیون سوخت های نیمه سنگین و سنگین می شود که به نوبه خود موجب کاهش راندمان احتراق، بالا رفتن حجم دوده در محصولات احتراق و گرفتگی و رسوب می شود. بعلاوه وجود این ناخالصی ها موجب ایجاد ترکیبات به شدت خورنده در محصولات احتراق خواهد شد که خوردگی قطعات و پره های توربین را به همراه خواهد داشت. در نتیجه هزینه تعمیر و نگهداری نیروگاه به طرز قابل توجهی افزایش خواهد یافت [۱].

استفاده از سوخت نامناسب که منطبق بر شرایط طراحی توربین گاز نباشد، علاوه بر مشکلات تعمیر و نگهداری، موجب

لود شدینگ سریع^۱ و حتی خروج اضطراری^۲ توربین گاز می شود که زیان ناشی از توقف تولید برق را نیز به نیروگاه تحمیل خواهد کرد [۲]. نارولا [۳] در مطالعه خود مشکلات مختلف سوخت های مایع در توربین های گازی و نیز سایر بخش های جانبی نیروگاه^۳ (BOP) را بیان کرده است. به دلایل مشکلات متعددی که سوخته های مایع در توربین های گازی ایجاد می کنند، استفاده از سیستم های تصفیه سوخت یکی از اصلی ترین چالش های نیروگاه های روز دنیا می باشد (کوورا [۴]، مهر هومجی و همکاران [۵-۷])، در حالیکه نیروگاه های موجود در ایران هیچکدام دارای سیستم مناسب تصفیه سوخت نیستند. این در حالیست که آنالیز سوخت تحویلی به نیروگاه های ایران نشان دهنده کیفیت پایین سوخت های مایع ورودی به نیروگاه ها می باشد. مساله مهمتر اینکه آنالیز سوخت تحویل داده شده به نیروگاه ها در ایران، در ماه های مختلف و سال های مختلف بسیار متفاوت است. در نتیجه سیستم احتراق بدون برخورداری از سیستم تصفیه مناسب به هیچ عنوان قادر به سازگاری با شرایط مختلف سوخت ورودی نمی باشد و این قضیه به مشکلات قبلی گفته شده در مورد سوخت های مایع می افزاید.

در این مقاله انواع روش های تصفیه سوخت برای اینکه سوخت منطبق بر شرایط سازنده اصلی تجهیزات^۴ (OEM) باشد بررسی و ارزیابی می شود و در نهایت راه حل جامع برای تصفیه این سوخته ها بیان خواهد شد.

ناخالصی های موجود در سوخت و اثرات آنها

ناخالصی های موجود در سوخت به سه دسته محلول در آب و نامحلول در آب و محلول در سوخت تقسیم بندی می شوند. جدول (۱) مهمترین ناخالصی های موجود در سوخت به همراه اثر آنها را نشان می دهد [۸]. در جدول (۲) محدوده ناخالصی ها در یک سوخت سنگین به همراه محدوده مجاز آنها برای ورود به توربین گاز معرفی شده است [۹]. بطور کلی ناخالصی های محلول به وسیله افزودنی های پایه منیزیم خنثی

¹ rapid load shedding

² trip

³ balance of plant (BOP)

⁴ original equipment manufacturer (OEM)

خاکستر^۱ در فرایند احتراق می شوند. رسوب خاکستر بر کارایی و دسترسی توربین اثر منفی دارد اما مهمتر اینکه موجب خوردگی شدید در دماهای بالا در مسیر محصولات احتراق خواهد شد مگر اینکه سوخت قبل از ورود به توربین گاز به طور مناسب تصفیه شده باشد.

سدیم (Na)، پتاسیم (K) و کلسیم (Ca) جزو ناخالصی های محلول در آب به شمار می روند و ناشی از ورود آب های زیرزمینی به نفت خام در فرایند تشکیل نفت و به خصوص هنگام انتقال به وسیله کشتی می باشند. بخشی از آنها در پالایشگاه از سوخت جدا می شوند اما مقداری از آنها در سوخت باقی می ماند که به همراه سولفور (S) موجب خوردگی سولفیدی^۲ در توربین می شوند. در واقع در فرایند احتراق سولفات سدیم (Na_2SO_4) تشکیل می شود که در برخورد با پره های توربین رسوب کرده و چنانچه دمای گاز بالاتر از نقطه ذوب این نمک ها باشد این نمک ها بر روی سطح پره ذوب می شوند و باعث از بین رفتن لایه محافظ اکسید کروم و کبالت می شوند. از بین رفتن این لایه محافظ در دماهای بالا سرعت اکسید شدن پره های توربین را به شدت بالا می برد. پتاسیم نیز به عنوان یک فلز قلیایی^۳ به شروع فرایند خوردگی سولفیدی کمک می کند و تا حدود زیادی شبیه سدیم عمل می کند. شکل (۱) خوردگی سولفیدی را روی پره یک توربین کوچک نشان می دهد که پس از ۱۰۰۰ ساعت کارکرد با سوختی که 2ppm سدیم داشته است به وجود آمده است [۱۱]. بدیهی است افزایش مقدار ناخالصی ها و افزایش توان توربین و افزایش دما اثرات این تخریب را به مراتب شدیدتر می کند. جدول ۳ دمای نقطه ذوب تعدادی از نمک هایی که در فرایند احتراق تشکیل می شود را نشان می دهد.

و یا تغییر ماهیت می دهند و ناخالصی های نا محلول به وسیله فرایندهای تصفیه فیزیکی، شستشو و جداسازی گریز از مرکز یا الکترو استاتیک از سوخت جدا می شوند [۱۰]. مهمترین ناخالصی های موجود در سوخت سدیم، پتاسیم، وانادیوم و سولفور است که در ادامه به اثرات مخرب آنها به همراه روش تصفیه آنها اشاره خواهد شد. پیوست ۱ یک نمونه آنالیز سوخت گازوییل در یک نیروگاه ایران را نشان می دهد. مقایسه مقادیر ناخالصی ها مخصوصا سدیم، پتاسیم، سولفور و وانادیوم با مقادیر مجاز مندرج در جدول (۲) نشان دهنده شرایط نامطلوب این سوخت و ضرورت تصفیه آن پیش از ورود به توربین گاز است.

جدول ۱: ناخالصی های سوخت مایع و اثر مخرب آنها [۸]

Class	Contaminant	Main effect
Water soluble	Sodium (Na)	Ash fouling and sulfidation corrosion
	Potassium (K)	
	Calcium (Ca)	Ash fouling
Water extractable	Solids & sediment	Ash fouling, sludge, filter plugging, erosion
	Free water	Microbiological corrosion in fuel tanks
Fuel soluble	Vanadium (V)	Ash fouling and accelerated oxidation
	Nickel (Ni)	Ash fouling; interferes with V-inhibition
	Lead (Pb)	Ash fouling and accelerated oxidation
	Zinc (Zn)	Ash fouling and accelerated oxidation
	Sulfur (S)	Sulfidation corrosion; environmental
	Asphaltenes	Fuel stability, sludge, filter plugging
	Wax	Filter plugging (impacts process temps)

جدول ۲: محدوده ناخالصی ها در یک سوخت سنگین و محدوده

مجاز آنها برای ورود به توربین گاز [۹]

Item	Unit	Normal Range for HFO	Treated Fuel For GT
V	ppm	30-50	< 0.5
Na+K	ppm	40-80	< 1.0
Lead (Pb)	ppm	0.2-2	< 1.0
Ca	ppm	0.1-10	< 10
Sulfur content	Wt %	1.0-1.8	< 0.5
Carbon residue	Wt %	5-15	-
Ash content	Wt %	0.01-0.09	< 100 ppm
Kin. Viscosity at 100 °F	mm ² /s	250-450	< 50

خوردگی در دمای بالا و ضرورت تصفیه سوخت

خوردگی سولفیدی

سوخت های مایع مانند گازوییل و مازوت شامل مقادیر قابل توجهی ناخالصی و ذرات فلزی هستند که موجب ایجاد رسوب

¹ ash fouling

² sulfidation corrosion

³ alkali metal



شکل ۲: اثر وانادیم و اکسید شدن شتابنده سطح پره توربین [۱۲]

Melting Points of Some Oil Ash Constituents		
Compound	Melting Point, F (C)	
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	3720	(2049)
Aluminum sulfate, Al ₂ (SO ₄) ₃	1420*	(771)
Calcium oxide, CaO	4662	(2572)
Calcium sulfate, CaSO ₄	2640	(1449)
Ferric oxide, Fe ₂ O ₃	2850	(1566)
Ferric sulfate, Fe ₂ (SO ₄) ₃	895*	(479)
Nickel oxide, NiO	3795	(2091)
Nickel sulfate, NiSO ₄	1545*	(841)
Silicon dioxide, SiO ₂	3130	(1721)
Sodium sulfate, Na ₂ SO ₄	1625	(885)
Sodium bisulfate, NaHSO ₄	480*	(249)
Sodium pyrosulfate, Na ₂ S ₂ O ₇	750*	(399)
Sodium ferric sulfate, Na ₃ Fe(SO ₄) ₃	1000	(538)
Vanadium trioxide, V ₂ O ₃	3580	(1971)
Vanadium tetroxide, V ₂ O ₄	3580	(1971)
Vanadium pentoxide, V ₂ O ₅	1275	(691)
Sodium metavanadate, Na ₂ O·V ₂ O ₅ (NaVO ₃)	1165	(629)
Sodium pyrovanadate, 2Na ₂ O·V ₂ O ₅	1185	(641)
Sodium orthovanadate, 3Na ₂ O·V ₂ O ₅	1560	(849)
Sodium vanadylvanadates, Na ₂ O·V ₂ O ₄ ·V ₂ O ₅	1160	(627)
5Na ₂ O·V ₂ O ₄ ·1V ₂ O ₅	995	(535)

* Decomposes at a temperature around the melting point.

حذف سدیم و پتاسیم

در یک فرایند متداول که به عنوان شستشوی سوخت^۱ شناخته می‌شود، آب دمین به سوخت اضافه می‌شود تا محلول سوخت رقیق شود. از آنجا که پتاسیم و سدیم در آب محلول هستند با تزریق آب دمین به سوخت در آن حل می‌شوند و با توجه با اینکه چگالی آب و سوخت متفاوت است با استفاده از نیروی ثقل از محلول آب و نمک از سوخت جدا می‌شوند. در کاربردهای صنعتی البته برای شتاب بخشیدن به فرایند جداسازی از نیروی سانتریفوژ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است حداکثر چگالی سوخت که بتوان با این روش شستشو شود در حدود ۹۸۵ کیلوگرم بر متر مکعب است و چنانچه چگالی سوخت بالاتر از ۹۹۱ کیلوگرم بر متر مکعب باشد استفاده از این روش امکانپذیر نیست شکل (۳) پکیج دو مرحله فالکن^۲ را نشان می‌دهد که برای تصفیه سوخت سنگین با دبی ۱۲۰ m³/h ساخته شده است که برای یک نیروگاه گازی ۴۵۰ مگاواتی مناسب می‌باشد. البته ظرفیت دستگاه به آنالیز سوخت بستگی دارد و افزایش ناخالصی‌های سوخت موجب افزایش ابعاد و قدرت موتورهای سانتریفوژ خواهد شد. با توجه با بالابودن ویسکوزیته گازوییل در ایران،



شکل ۱: خوردگی سولفیدی روی پره یک توربین گاز کوچک پس از ۱۰۰۰ ساعت کارکرد با سوختی حاوی 2ppm سدیم [۱۱]

خوردگی اکسید وانادیم

وانادیوم موجب ایجاد خاکستر پنتا اکسید وانادیم (V₂O₅) می‌شود که دمای ذوب آن ۶۹۱°C (۱۲۷۵°F) است. این ماده در برخورد با سطوح توربین کندانس می‌شود و در نتیجه لایه اکسید محافظ را از بین می‌برد. در نتیجه موجب می‌شود اکسیداسیون سطح فلز شتاب بگیرد. شکل (۲) نمونه‌ای از اکسید شدن شتابنده سطح پره توربین را نشان می‌دهد که در اثر وجود وانادیم به وجود آمده است [۱۲].

¹ Fuel washing

² Alfa Laval

ویسکوزیته سوخت قبل از ورود به دستگاه سانتریفوژ باید توسط سیستم مناسب به حد مجاز کاهش یابد.

خنثی سازی اثر وانادیوم

وانادیم در فرایند شستشوی سوخت جدا نمی‌شود. بنابراین افزودنی‌های پایه منیزیم برای تبدیل پنتا اکسید وانادیم (V_2O_5) به ترکیباتی مانند اورتوانادات منیزیم^۱ ($Mg_3V_2O_8$) بکار می‌رود که دارای دمای ذوب بسیار بالای $1243^{\circ}C$ ($2270^{\circ}F$) می‌باشد. این ماده در دماهای معمولی پره توربین به صورت جامد باقی می‌ماند و چون حالت مذاب ندارد قادر به تخریب سطح فلز نیست. با فرض اینکه سدیم و پتاسیم در فرایند شستشوی سوخت جدا شده باشند، حداقل نسبت $Mg/V=3$ برای تزریق ترکیبات پایه منیزیم مورد نیاز می‌باشد. یعنی به ازای هر ۱ ppm وانادیم باید ۳ ppm ترکیبات پایه منیزیم به سوخت تزریق شود. نکته قابل توجه این است که در برخی از نیروگاه‌های ایران برای تصفیه سوخت بدون استفاده از سیستم های تصفیه فیزیکی، سیستم های کاهش ویسکوزیته و سیستم شستشوی سوخت، فقط از افزودنی های شیمیایی برای تصفیه سوخت استفاده شده است که علاوه بر بالا رفتن میزان تزریق مواد شیمیایی و هزینه مواد مصرفی، شرایط بدتر از قبل نیز در احتراق سوخت ایجاد شده است زیرا مواد شیمیایی اضافه تزریق شده بدون واکنش با ناخالصی‌های سوخت، در مراحل بعدی موجب تشکیل رسوب خورنده در سطوح توربین شده اند.

اجزای سیستم تصفیه سوخت

با توجه به آنچه گفته شد یک سیستم کامل تصفیه سوخت باید حداقل دارای اجزای اصلی زیر باشد که بتواند سوخت را با نیازهای توربین گاز منطبق نماید:

- تصفیه فیزیکی
- سیستم کاهش ویسکوزیته سوخت

- سیستم شستشوی سوخت و جداسازی ناخالصی های نا محلول
- سیستم تزریق مواد شیمیایی برای خنثی سازی اثر ناخالصی‌های محلول
- سیستم ذخیره سازی سوخت تصفیه شده
- سیستم تصفیه و انتقال پساب ناشی از تصفیه سوخت

در تشریح فرایند تصفیه سوخت به وسیله واحد تصفیه سوخت باید گفت که سوخت ورودی بسته به آنالیز ورودی باید از چند مرحله فیلتر مکانیکی عبور کند. به طور معمول دو مرحله فیلترهای با مش ۷۰ و ۴۰ میکرونی لازم است. البته هر مجموعه فیلتر باید به صورت دوگانه^۲ باشد تا در صورتی که یکی از فیلترها گرفته شود، فیلتر کناری به مدار وارد شود. تغییر فیلترها با اندازه گیری افت فشار ورودی و خروجی و به صورت اتوماتیک و یا دستی انجام می‌شود. پس از حذف ذرات درشت ناخالصی توسط فیلترهای مکانیکی، نوبت به جداسازی ناخالصی‌های نامحلول در دستگاه سانتریفوژ می‌رسد. البته با توجه به ویسکوزیته بالای سوخته ای مایع در ایران که گاهی تا $1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ نیز می‌رسد، قبل از ورود سوخت به واحد سانتریفوژ باید ویسکوزیته آن توسط مبدلهای حرارتی کاهش به حدود $200 \text{ mm}^2/\text{s}$ کاهش یابد. عامل معلق کننده^۳ برای تشدید فرایند جداسازی و آب دمین برای رقیق شدن محلول به آن اضافه می‌شود و وارد دستگاه سانتریفوژ می‌شود.

در ادامه برای خنثی سازی و تغییر ماهیت ناخالصی‌های محلول، افزودنی‌ها به سوخت تزریق می‌شود. میزان افزودنی‌ها توسط یک فرایند اتوماتیک و با اندازه‌گیری خواص سوخت انجام می‌شود تا از تزریق اضافی جلوگیری شود. در انتها سوخت تصفیه شده به مخازن ذخیره منتقل می‌شود و پساب تولید شده جهت تصفیه و دفع به واحد تصفیه پساب منتقل می‌شود.

² duplex filter

³ demulsifier agent

¹ magnesium orthovanadate

لازم به ذکر است که برای جداسازی ناخالصی های نامحلول در سوخت به جز روش سانتریفوژ می توان از روش جذب الکترواستاتیک نیز استفاده کرد. لیوون و همکاران [۱۳] این دو روش را برای تصفیه سوخت سنگین مقایسه کرده اند و نتیجه گرفته اند که برای استفاده در توربین گاز، روش سانتریفوژ مناسب تر می باشد زیرا روش الکترواستاتیک مقادیر زیادی از سوخت را هدر می دهد و در برابر تغییرات بار و در نتیجه تغییر جریان جرمی سوخت توربین گاز واکنش سریع نشان نمی دهد.

لازم به ذکر هرچند استفاده از سوخت مازوت در توربین گاز باعث ۳.۵ تا ۴ برابر شدن هزینه تعمیرات و نگهداری توربین گاز می شود ولی با توجه به اختلاف قیمت شدید بین سوخت گاز طبیعی و گازوئیل با مازوت صرفه اقتصادی آن بسیار بالا خواهد بود. به عنوان مثال در حالت استفاده از سوخت مایع در سه ماه از سال و بدون پاشش آب با فرض قیمت گازوئیل ۱ دلار و سوخت سنگین ۰.۶۶ دلار به ازای هر لیتر، قیمت گاز طبیعی ۱۰ دلار به ازای هر میلیون بی تی یو، هزینه تامین سوخت واحدهای گازی موجود کرمانشاه ۱۵۸ میلیون دلار می باشد، در حالیکه با تغییر توربین به نوع مازوت سوز، هزینه تامین سوخت سالیانه ۱۰۸ میلیون دلار می باشد. به عبارت دیگر با تغییر نوع توربین به مازوت سوز، سالیانه صرفه جویی معادل ۴۹.۵ میلیون دلار خواهیم داشت.

نتیجه گیری

در مقاله حاضر، چند مکانیزم مهم که در آن ناخالصی های موجود در سوخت گازوئیل در شرایط مختلف در توربین گاز ایجاد می کنند بررسی شد و برای کاهش مشکلات خوردگی، تعمیر و نگهداری و تریب واحدهای گازی که در اثر این ناخالصی ها ایجاد می شوند یک سیستم کامل تصفیه سوخت پیشنهاد شد. این سیستم ترکیبی از روشهای فیلتراسیون فیزیکی، کاهش ویسکوزیته، شستشوی سوخت و جداسازی سانتریفوژ و تزریق افزودنی های شیمیایی می باشد. تجربه نشان می دهد که با توجه به کیفیت پایین سوخت گازوئیل در ایران که شامل ویسکوزیته بالای سوخت و وجود مقادیر زیاد ناخالصی ها و مواد فلزی می باشد، استفاده از روشهای ناکارآمد

مانند تزریق مقادیر زیاد مواد شیمیایی نه تنها هزینه نیروگاه ها را افزایش می دهد بلکه موجب بدتر شدن شرایط سوخت و احتراق و خوردگی در توربین نیز می شود. بنابراین برای کاهش مشکلات ناشی از سوخته های مایع باید یک واحد تصفیه سوخت با شرایط فوق الذکر و با در نظر گرفتن بدترین آنالیز سوخت در یک دوره ده ساله طراحی و اجرا شود.

قدردانی

بر خود واجب می دانیم که از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی، دفتر فنی نیروگاه منتظر قایم به خاطر حمایت معنوی و علمی از این پژوهش تشکر و قدردانی نماییم.

مراجع

- [1] Akhtar, S. Z., 2001, "Gas Turbine Boom Places Premium on Ensuring High Quality Fuel Gas," *Power Engineering*, October 2001, pp. 59-64.
- [2] Angello, L. C. and Castaldini, C., 2004, "Combustion Tuning Guidelines: Understanding and Mitigating Dynamic Instabilities in Modern Gas Turbine Combustors," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004*, Power for Land Sea and Air, Vienna, Austria, ASME Paper No. GT2004-54081.
- [3] Narula, R. G., 1998, "Alternative Fuels for Gas turbine Plants—An Engineering Procurement and Construction Contractor's Perspective," *Proceedings of the ASME Turboexpo*, Stockholm, Sweden, ASME Paper No 98-GT-122.
- [4] Correa, S. M., 1998, "Power Generation and Aeropropulsion Gas Turbines: from Combustion Science to Combustion Technology," *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, pp. 1793-1807.
- [5] Meher-Homji, C. B., 1998, "The Development of the Whittle Turbojet," *ASME*

پیوست ۱: نمونه آنالیز سوخت گازوییل یک نیروگاه در ایران

Value	Unit	Standard	Test Item	Value	Unit	Standard	Test Item
75.0	mg/kg	D 1533	Water Content	0.4	ppm	D 6595	Fe
0.07	Wt%	D 189	Carbon residue	0	ppm	D 6595	Cr
0.01	Wt%	D 482	Ash content	5.1	ppm	D 6595	Al
58	°C	D 3278	Flash Point	0.2	ppm	D 6595	Cu
-6	°C	D 97	Pour point	0	ppm	D 6595	Pb
0.835	g/cm ³	D 1298	Density at 15°C	2.5	ppm	D 6595	Sn
2.860	mm ² /s	D7042	Kin. At 100°F	0	ppm	D 6595	Ni
19637	Btu/lb	D 240	H. heat value	0.5	ppm	D 6595	Ti
18438	Btu/lb	D 240	L. heat value	0	ppm	D 6595	Ag
0.71	Wt%	D 129	Sulfur Content	0.3	ppm	D 6595	Mo
				0.6	ppm	D 6595	Zn
Particle Counting				0	ppm	D 6595	P
ISO 4406 Code	Code	P.No./ml	Size(μ)	1.2	ppm	D 6595	Ca
	18	2496.1	2	0	ppm	D 6595	Ba
	16	578.6	5	0.3	ppm	D 6595	Mg
	13	70.2	10	1.2	ppm	D 6595	Si
	10	7.1	15	0.3	ppm	D 6595	Na
	4	0.1	25	0.3	ppm	D 6595	B
	0	0	50	0	ppm	D 6595	V

Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 120, pp. 249-256.

- [6] Meher-Homji, C. B., 2000, "The Historical Evolution of Turbomachinery," *Proceedings of the Twenty-Ninth Turbomachinery Symposium, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas*, pp. 281-321.
- [7] Meher-Homji, C. B. and Gabriles, G. A., 1998, "Gas Turbine Blade Failures—Causes, Avoidance, and Troubleshooting," *Proceedings of the Twenty Seventh Turbomachinery Symposium, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas*, pp. 129-179.
- [8] Bromley, A. F., 2006, "Gas Turbine Fuels and Fuel Treatment," *Combined Cycle Journal, Outage Handbook, Third Quarter*, pp. OH33-OH39.
- [9] Campbell, A., Goldmeer, J., Healy, T., Washman, R., Moliere, M., and Citen, J., 2008, "Heavy Duty Gas Turbine Fuel Flexibility," *Proceedings of the ASME Turbo Expo, Berlin, Germany, ASME Paper No. GT2008-51368*.
- [10] Moliere, M., Vierling, M., and Symonds, R., 2010, "Interest for Liquid Fuels in Power Generation Gets Renewed," *Proceedings of the ASME Turbo Expo, Glasgow, United Kingdom, ASME Paper No. GT2010-22149*.
- [11] Elliott, F. G., Kurz, R., Etheridge, C., and O'Connell, J. P., 2004, "Fuel System Suitability Considerations for Industrial Gas Turbines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126, pp. 119-126.
- [12] Ferguson, D., Richard, G. A., and Straub, D., 2008, "Fuel Interchangeability for Lean Premixed Combustion in Gas Turbine Engines," *Proceedings of ASME Turbo Expo, Berlin, Germany, ASME Paper No. GT2008-51261*.
- [13] Lieuwen T. C. and Yang, V., Editors, 2005, "Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms and Modeling," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 210, AIAA.