به نام یزدان پاک

مبانی طراحی توربین گاز

هادی اله یاری

فرشاد مطبوع

ویراستار: یاور عنانی

شرکت گروه مپنا

انتشارات پندار پارس

سرشناسه	:	اله‌یاری، هادی، ۱۳۶۲ -
عنوان و نام پدیدآور	:	مبانی طراحی توربین گاز/ هادی اله‌یاری، فرشاد مطبوع؛ ویراستار یاور عنانی؛ به سفارش شرکت گروه مپنا.
مشخصات نشر	:	تهران : پندار پارس، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری	:	xxvii، ۱۳۱۲ ص.: مصور، جدول.
شابک	:	978-600-8201-70-0
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	کتابنامه
موضوع	:	توربین‌های گازی
موضوع	:	Gas-turbines
موضوع	:	توربین‌های گازی -- طرح و ساختمان
موضوع	:	Gas-turbines -- Design and construction
شناسه افزوده	:	مطبوع، فرشاد، ۱۳۶۹-
شناسه افزوده	:	شرکت گروه مپنا
رده بندی کنگره	:	TJV۷۸
رده بندی دیویی	:	۶۲۱/۴۳۳
شماره کتابشناسی ملی	:	۵۷۹۲۵۱۲

انتشارات پندارپارس

دفتر فروش: انقلاب، ابتدای کارگرجنوبی، کوی رشتچی، شماره ۱۴، واحد ۱۶ **www.pendarepars.com**

تلفن: ۶۶۵۷۲۳۳۵ – تلفکس: ۶۶۹۲۶۵۷۸ همراه: ۰۹۲۱۴۳۷۱۹۶۴ **info@pendarepars.com**

نام کتاب	:	**مبانی طراحی توربین گاز**
ناشر	:	**انتشارات پندار پارس؛ به سفارش شرکت گروه مپنا**
تألیف	:	**هادی اله یاری، فرشاد مطبوع**
ویراستار	:	**یاور عنانی**
چاپ نخست	:	**بهار ۹۹**
شمارگان	:	**۳۰۰ نسخه**
طرح جلد	:	**رامین شکرالهی**
چاپ، صحافی	:	**فرشیوه، نوری**
قیمت	:	**غیر قابل فروش** **شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۸۲۰۱-۷۰-۰**

***تمامی حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به شرکت گروه مپنا می‌باشد ***

فهرست

فصل ۱؛ سوخت‌ها ۹
۱-۱ انواع سوخت‌ها ۹
۱-۲ سوخت جامد ۱۴
۱-۲-۱ زغال سنگ ۱۴
۱-۲-۱-۱ زغال سنگ آنتراسیت یا خالص ۱۷
۱-۲-۱-۲ زغال سنگ قیری ۱۷
۱-۲-۱-۳ زغال سنگ نارس ۱۸
۱-۲-۱-۴ زغال سنگ لیگنیت یا قهوه ای ۱۸
۱-۲-۱-۵ ترکیبات شیمیایی زغال سنگ ۱۹
۱-۳ سوخت مایع ۲۰
۱-۳-۱ نفت خام ۲۲
۱-۳-۲ سوخت سنگین یا مازوت ۲۹
۱-۳-۳ گازوئیل ۳۱
۱-۴ گاز طبیعی ۳۳
۱-۵ فرایند احتراق ۳۷
۱-۵-۱ محاسبه میزان هوای لازم در احتراق ۳۸
۱-۵-۲ احتراق سوخت‌های مایع ۴۱
۱-۵-۳ احتراق سوخت‌های گازی و اثر وجود رطوبت و میعانات گازی بر آن ۵۱
۱-۵-۴ روش‌های تصفیه گاز طبیعی ۵۸
۱-۴-۵-۱ ترکیب‌بندی سیستم‌های گرمایش و تصفیه گاز طبیعی ۶۵
۱-۶ انواع خوردگی به دلیل آلاینده‌های موجود در سوخت ۶۷
۱-۶-۱خوردگی داغ سولفور(خوردگی داغ نوع دوم) ۷۳
۱-۶-۲ خوردگی اکسید وانادیوم(خوردگی داغ نوع اول) ۷۶
۱-۶-۳ اکسید شدن خالص ۷۷
۱-۶-۴ خوردگی دما پایین ۷۸
۱-۷ روش‌های تصفیه سوخت ۷۸
۱-۸ افزودنی‌های رایج در تصفیه سوخت ۸۵
فصل ۲؛ نیروگاه گازی ۸۹
۲-۱ سیکل برایتون ۸۹
۲-۲ نیروگاه گازی (سیکل ساده) ۹۰
۲-۲-۱ سیکل ساده برایتون تولید مجددو با یک شفت ۱۰۰
۲-۲-۲ سیکل ساده با دو شفت ۱۰۵
۲-۲-۳ ترکیب چینی چند شفته ۱۰۷
۲-۲-۴ سیکل گرمایش مجدد ۱۰۸
۲-۲-۵ سیکل ساده برایتون با خنک کن میانی و گرمایش و تولید مجدد ۱۱۰
۲-۳ روشی برای محاسبه افت قسمت‌های مختلف توربین ۱۱۴
۲-۴ معادله پایستاری جرم و انرژی و قانون گاز کامل و مشخصات سکون ۱۱۵
۲-۵ محاسبه دما و فشار سکون ۱۲۵
۲-۶ بیان مشخصات سکون یک سیال بر اساس عدد ماخ بحرانی ۱۳۰

۲-۷ عد ماخ نسبی بحرانی ۱۳۲
۲-۸ معادله پایستاری جرم ۱۳۳
۲-۹ جریان آیزنتروپیک در مسیرهای با سطح مقطع متغیر ۱۳۵
۲-۱۰ نحوه طراحی دیفیوزر خروجی توربین ۱۳۹
۲-۱۱ نحوه محاسبه بازده کمپرسور و توربین ۱۴۴
۲-۱۱-۱ بازده آیزنتروپیک ۱۴۴
۲-۱۱-۱-۱ ضریب افت بر پایه آنتروپی ۱۵۰
۲-۱۱-۲ بازده پلی تروپیک ۱۵۳
۲-۱۱-۲-۱ بازده پلی تروپیک در توربین‌ها و کمپرسورها با تعداد N مرتبه ۱۵۶
۲-۱۲ تغییر ارزش حرارتی مخصوص cp و g ۱۶۳
۲-۱۳ هوای خنک‌کن زیرکش شده از قسمت کمپرسور و تاثیر آن بر توان توربین ۱۶۵
۲-۱۴ سیکل بسته ۱۶۷
۲-۱۵ تأثیر تغییر شرایط محیطی و پارامترهای ورودی بر بازده توربین گاز ۱۶۸
۲-۱۵-۱ دما ۱۶۸
۲-۱۵-۲ تغییر ارتفاع محل نصب ۱۶۹
۲-۱۵-۳ رطوبت ۱۷۰
۲-۱۵-۴ افت فشار در ورودی و خروجی توربین گاز ۱۷۱
۲-۱۵-۵ فعالیت در بار جزئی ۱۷۳
۲-۱۵-۶ نوع سوخت ۱۷۴
۲-۱۵-۶-۱ گاز طبیعی ۱۸۴
۲-۱۵-۶-۲ گازهای با ارزش حرارتی بالا ۱۸۵
۲-۱۵-۶-۳ سوخت‌های با ارزش حرارتی متوسط ۱۸۶
۲-۱۵-۶-۴ سوخت‌های با ارزش حرارتی پایین ۱۸۷
۲-۱۵-۶-۵ سوخت‌های مایع ۱۸۷
۲-۱۵-۷ دمای سوخت ورودی به توربین گاز ۱۸۹
۲-۱۵-۸ فشار سوخت ورودی ۱۹۰
۲-۱۶ روش‌های افزایش بازده سیکل ساده و توربین گاز ۱۹۲
۲-۱۶-۱ ارتقا اصولی و پایه‌ای توربین گاز ۱۹۳
۲-۱۶-۲ بهبود بازده با استفاده از پوشش عایق حرارتی در توربین ۲۱۰
۲-۱۶-۳ بهبود بازده با استفاده از پوشش عایق حرارتی در کمپرسور ۲۱۲
۲-۱۶-۴ افزایش میزان جریان هوا ۲۱۳
۲-۱۶-۵ تزریق آب یا بخار به محفظه احتراق ۲۱۵
۲-۱۶-۶ سرمایش هوای ورودی ۲۱۹
۲-۱۶-۶-۱ سیستم تبخیری ۲۲۱
۲-۱۶-۶-۲ سیستم پاشش مه ۲۲۶
۲-۱۶-۶-۳ سیستم خنک کن چیلری ۲۲۸
۲-۱۶-۶-۴ -۱ نصب چیلر جذبی بر روی نیروگاه‌های موجود و جدید ۲۳۴
۲-۱۶-۶-۵-۳ بررسی موردی نصب سیستم چیلر جذبی بر روی یک نیروگاه سیکل ترکیبی ۲۳۷
۲-۱۶-۷ گرمایش سوخت ورودی ۲۴۰
۲-۱۶-۷-۱ تمیزی و پاک بودن سوخت گاز ۲۴۲
۲-۱۶-۷-۲ کیفیت سوخت ۲۴۴
۲-۱۶-۸ افزایش توان توربین گاز با اصلاح سیستم کنترل توربین گاز ۲۴۵
۲-۱۷ پارامترهای موثر در تعمیرات و نگهداری و عمر قطعات ۲۴۶

۲-۱۷-۱ تعداد دفعات روشن شدن توربین گاز و ساعات کارکرد آن ۲۴۷
۲-۱۷-۲ نوع سوخت ۲۵۴
۲-۱۷-۳ دمای ورودی به توربین گاز ۲۵۵
۲-۱۷-۴ تزریق آب یا بخار به محفظه احتراق ۲۵۷
۲-۱۷-۵ تخمین زمان تعویض قطعات اصلی توربین گاز ۲۵۸
۲-۱۸ آلیاژهای مورد استفاده در قسمت داغ توربین گاز ۲۶۱
فصل ۳: نیروگاه سیکل ترکیبی ۲۶۵
۳-۱ نیروگاه سیکل ترکیبی ۲۶۵
۳-۲ بازده حرارتی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ۲۷۵
۳-۳ تأثیر افزایش بازده توربین گاز بر روی بازده سیکل ترکیبی ۲۷۶
۳-۴ بهینه سازی بویلر بازیاب ۲۸۱
۳-۵ سیکل ترکیبی تک فشاره ۲۸۸
۳-۵-۱ پارامترهای اصلی در طراحی سیکل تک فشاره ۲۹۱
۳-۵-۱-۱ فشار ۲۹۱
۳-۵-۱-۲ دما ۲۹۵
۳-۵-۱-۳ دمای پینچ و اپروچ ۲۹۶
۳-۵-۱-۴ افت فشار در سمت آب و بخار ۲۹۷
۳-۵-۱-۵ افت فشار در سمت گاز داغ ۲۹۸
۳-۵-۱-۶ فشار کندانسور ۲۹۸
۳-۶ سیکل ترکیبی دو فشاره ۲۹۹
۳-۶-۱ پارامترهای اثر گذار در طراحی سیکل دو فشاره ۳۰۲
۳-۶-۱-۱ فشار بخار فوق اشباع ۳۰۲
۳-۶-۱-۲ دمای بخار فوق اشباع در سیکل دو فشاره ۳۰۴
۳-۶-۱-۲ نقطه پینچ ۳۰۵
۳-۶-۱-۳ فشار کندانسور ۳۰۶
۳-۶-۱-۴ دمای دود خروجی از توربین گاز ۳۰۷
۳-۷ سیکل سه فشاره ۳۰۸
۳-۷-۱ پارامترهای اصلی در طراحی سیکل سه فشاره ۳۱۱
۳-۷-۱-۱ فشار بخار ۳۱۱
۳-۷-۱-۲ دمای بخار فوق اشباع ۳۱۲
۳-۷-۱-۳ نقطه پینچ ۳۱۳
۳-۸ سیکل گرمایش مجدد ۳۱۳
۳-۸-۱ پارامترهای اصلی در طراحی سیکل گرمایش مجدد ۳۱۷
۳-۸-۱-۱ فشار بخار ۳۱۷
۳-۹ استفاده از آتش اضافی در بویلر بازیاب ۳۲۰
۳-۱۰ اثرات شرایط محیطی محل نصب بر روی توان و بازده ۳۳۱
۳-۱۰-۱ تاثیر دما ۳۳۱
۳-۱۰-۲ تاثیر فشار هوا و ارتفاع محل نصب ۳۳۴
۳-۱۰-۳ تاثیر رطوبت در دمای ثابت ۳۳۶
۳-۱۰-۴ سیال خنک کننده کندانسور ۳۳۶
۳-۱۰-۵ سوخت ۳۳۷
۳-۱۰-۶ فشار کندانسور ۳۳۹
۳-۱۰-۷ نقطه پینچ ۳۳۹

۳-۱۰-۸ افت فشار جریان گاز در بویلر بازیاب ۳۴۰
۳-۱۰-۹ دمای گاز خروجی از توربین گاز ۳۴۰
۳-۱۰-۱۰ نحوه تغییر بار سیستم کنترل در سیکل ترکیبی ۳۴۰
۳-۱۰-۱۱ لغزنده کردن فشار بخار LP و IP در توربین بخار دو و سه فشاره ۳۴۱
۳-۱۱ بویلر بازیاب حرارت ۳۴۶
۳-۱۲ روش‌های کاهش آلایندگی در نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی ۳۴۹
فصل ۴؛ نیروگاه‌های IGCC ۳۵۵
۴-۱ نیروگاه‌های IGCC ۳۵۵
۴-۱-۱ تقسیم‌بندی گازی‌سازها ۳۵۷
۴-۱-۱-۱ روش بستر ثابت (روان) ۳۵۹
۴-۱-۱-۲ روش جریان همراه ۳۶۰
۴-۱-۱-۳ روش بستر سیال شده ۳۶۰
۴-۱-۲ روش‌های گازی‌سازی تجاری شده ۳۶۰
۴-۱-۲-۱ روش شرکت GE ۳۶۱
۴-۱-۲-۲ روش شرکت شل ۳۶۲
۴-۱-۲-۳ روش شرکت ساسول لورگی ۳۶۵
۴-۱-۲-۴ روش شرکت زیمنس ۳۶۶
۴-۱-۲-۵ روش KBR ۳۶۷
۴-۱-۲-۶ روش کونکو فیلیپ ۳۶۸
۴-۱-۳ فرایند گاز سازی در نیروگاه‌های IGCC ۳۶۹
۴-۱-۴ بهینه سازی گاز سنتز شده برای فرایندهای مختلف ۳۷۲
۴-۱-۵ بازده نیروگاه IGCC بدون جداسازی دی اکسید کربن ۳۷۴
۴-۱-۶ در دسترس بودن نیروگاه‌های IGCC ۳۷۵
۴-۱-۷ روش‌های افزایش بازده نیروگاه IGCC ۳۷۶
فصل ۵؛ سیستم فیلتراسیون هوای ورودی توربین ۳۷۹
۵-۱ آسیب دیدگی به وسیله ذرات خارجی (FOD) ۳۸۰
۵-۲ سایش ۳۸۰
۵-۳ رسوب‌گذاری ۳۸۲
۵-۴ انسداد مسیر خنک‌کاری پره ها ۳۸۳
۵-۵ گداخت ذره ای ۳۸۳
۵-۶ خوردگی ۳۸۳
۵-۷ آلاینده‌های اصلی در هوای ورودی به توربین گاز ۳۸۴
۵-۷-۱ آلاینده‌های گازی ۳۸۵
۵-۷-۲ آلاینده‌های جامد ۳۸۵
۵-۷-۳ نمک ۳۸۶
۵-۷-۴ آلاینده‌های مایع ۳۸۸
۵-۷-۵ آلاینده‌ها و نمک موجود در هوای دریا ۳۸۹
۵-۷-۶ سیستم جلوگیری از تشکیل یخ در دهانه کمپرسور (آنتی آیسینگ) ۳۹۴
۵-۸ استفاده از فیلتر ۴۰۶
۵-۸-۱ انتخاب فیلتر ۴۰۷
۵-۸-۲ پارامترهای یک فیلتر ۴۰۸
۵-۸-۳ مکانیزم فیلتر ۴۰۸
۵-۸-۴ بازده فیلتر و کلاس‌بندی آن ۴۱۰

۵-۸-۵ افت فشار فیلتر ۴۱۱
۶-۸-۵ بار فیلتر ۴۱۳
۷-۸-۵ سطح سرعت ۴۱۳
۸-۸-۵ عملکرد در شرایط مرطوب ۴۱۴
۹-۸-۵ انواع فیلترها ۴۱۵
۱-۹-۸-۵ توری‌ها و دریچه‌های محافظ ۴۱۵
۲-۹-۸-۵ فیلترهای جداکننده اینرسیال ۴۱۶
۳-۹-۸-۵ فیلترهای جذب کننده رطوبت ۴۱۸
۴-۹-۸-۵ فیلترهای اولیه ۴۱۹
۵-۹-۸-۵ فیلترهای بازده بالا ۴۲۰
۶-۹-۸-۵ فیلترهای خود تمیز شونده ۴۲۱
۷-۹-۸-۵ فیلترهای روغنی ۴۲۳
فصل ۶؛ انتقال انرژی بین سیال و روتور و آنالیز ابعادی و نقشه عملکردی ماشین‌های دوار ۴۲۷
۱-۶ مومنتوم محوری ۴۲۷
۲-۶ اندازه حرکت شعاعی ۴۲۸
۳-۶ مومنتوم زاویه ای ۴۲۹
۴-۶ زوایای جریان و ایرفویل ۴۳۱
۵-۶ تعریف میزان عکس العملی بودن یک مرتبه ۴۳۳
۶-۶ مشخصات نسبی سکون سیال در روتور ۴۳۶
۷-۶ زاویه برخورد و انحراف در پره ها ۴۳۸
۸-۶ آنالیز ابعادی و نقشه عملکردی ماشین‌های دوار ۴۴۴
۱-۸-۶ شباهت‌های هندسی دو ماشین دوار ۴۴۴
۲-۸-۶ شباهت‌های دینامیک دو ماشین دوار ۴۴۴
۳-۸-۶ تئوری π باکینگهام در جریان‌های تراکم ناپذیر ۴۴۴
۴-۸-۶ نقشه عملکردی توربین و کمپرسور ۴۴۶
۵-۸-۶ چوک شدن توربین و کمپرسور ۴۴۹
۶-۸-۶ سرعت مخصوص در نقشه عملکردی ۴۵۰
فصل ۷؛ کمپرسور گریز از مرکز ۴۵۹
۱-۷ تعریف پارامترها و قسمت‌های مختلف ماشین‌های دوار ۴۵۹
۲-۷ سیستم ورودی روتور ۴۶۷
۳-۷ افت داکت ورودی ۴۶۸
۴-۷ ترمودینامیک کمپرسور ۴۶۹
۵-۷ انواع روش‌های چینش پره روی روتور ۴۶۹
۶-۷ اجزا معادله انتقال انرژی و درجه عکس العملی بودن مرتبه ۴۷۲
۱-۶-۷ اثرات عملکردی هد استاتیکی ۴۷۳
۲-۶-۷ اثرات عملکردی هد دینامیکی ۴۷۴
۷-۷ اجزای شتاب دهنده جریان در پروانه ۴۷۵
۸-۷ پدیده لغزش و ضریب لغزش ۴۷۶
۹-۷ ویسکوزیته و فاکتور تراکم پذیری جریان ۴۷۸
۱۰-۷ اصول کار ۴۸۱
۱۱-۷ کار مورد نیاز و افزایش فشار ۴۸۳
۱۲-۷ بازده کمپرسور ۴۸۵
۱۳-۷ ناحیه ولوت ۴۸۶

۷-۱۳-۱ روش طراحی یک بعدی ولوت ۴۸۷
۷-۱۴ اثر لقی نوک پره ۴۸۸
۷-۱۵ کمپرسورهای شعاعی چند مرتبه‌ای ۴۸۹
۷-۱۶ دیفیوزر ۴۹۴
۷-۱۷ اثر تراکم پذیری ۴۹۹
۷-۱۷-۱ عدد ماخ ورودی در پروانه و دیفیوزر ۴۹۹
۷-۱۸ کمیت‌های بدون بعد برای رسم نقشه کمپرسور ۵۰۳
فصل ۸؛ کمپرسور محوری ۵۱۳
۸-۱ کمپرسور محوری ۵۱۸
۸-۲ پایه عملکرد کمپرسور محوری ۵۲۰
۸-۳ تعریف خط پیچ (شعاع متوسط) در توربوماشین ها ۵۲۲
۸-۴ تئوری اولیه کمپرسورهای محوری ۵۲۳
۸-۵ پارامترهای موثر در نسبت فشار هر مرتبه ۵۲۷
۸-۶ قفل شدن محل عبور جریان در کمپرسور ۵۳۲
۸-۷ درجه عکس العملی بودن پره ۵۳۴
۸-۸ جریان سه بعدی ۵۳۶
۸-۹ فرایند طراحی کمپرسور ۵۵۲
۸-۱۰ طراحی پره ۵۷۸
۸-۱۰-۱ خانواده ایرفویل‌های C4 ..... ۵۸۹
۸-۱۰-۲ خانواده ایرفویل‌های NACA ۵۹۱
۸-۱۰-۳ اثر زاویه برخورد ۵۹۳
۸-۱۰-۴ اثر عدد رینولدز ۵۹۳
۸-۱۰-۵ اثر عدد ماخ ۵۹۴
۸-۱۰-۶ اثر لقی نوک پره ۵۹۴
۸-۱۱ مشخصات کمپرسور در نقطه خارج از طراحی ۵۹۶
۸-۱۲ محاسبه پرفورمنس یک مرتبه ۵۹۷
۸-۱۳ اثر تراکم پذیری ۶۰۹
۸-۱۴ عملکرد در حالت شرایط خارج از نقطه طراحی ۶۱۳
۸-۱۵ واماندگی کمپرسور ۶۱۷
۸-۱۵-۱ واماندگی پره ۶۱۹
۸-۱۵-۱-۱ واماندگی چرخشی یا دوار ۶۱۹
۸-۱۵-۱-۲ واماندگی موجی ۶۲۰
۸-۱۶ سرج کمپرسور ۶۲۱
۸-۱۷ چوک یا خفگی کمپرسور ۶۲۴
۸-۱۸ مشخصات یک کمپرسور جریان محوری ۶۲۴
۸-۱۹ بعضی تفاسیر از منحنی عملکردی کمپرسور ۶۲۷
۸-۲۰ رفتار کمپرسور در زمان شروع به کار ۶۲۹
۸-۲۱ کمپرسورهای دو شفته ۶۳۰
۸-۲۲ کمپرسورهای با قابلیت تغییر هندسه ۶۳۱
۸-۲۳ انواع افت‌های کمپرسور ۶۳۴
۸-۲۴ مواد مورد استفاده در ساخت کمپرسور ۶۳۶
فصل ۹؛ محفظه احتراق ۶۴۵
۹-۱ انواع شعله محفظه احتراق ۶۴۸

۹-۱-۱ محفظه احتراق دیفیوژن ۶۵۴
۹-۱-۱-۱ طراحی محفظه احتراق دیفیوژن ۶۵۹
۹-۱-۲ محفظه احتراق پریمیکس ۶۶۱
۹-۲ دمای شعله ۶۷۰
۹-۳ انواع محفظه احتراق ۶۷۱
۹-۳-۱ محفظه احتراق حلقوی ۶۷۲
۹-۳-۲ محفظه احتراق کن ۶۷۲
۹-۳-۳ محفظه احتراق کن- حلقوی ۶۷۳
۹-۳-۴ محفظه احتراق سیلو ۶۷۴
۹-۴ مهمترین پارامترهای موثر در طراحی محفظه احتراق ۶۷۵
۹-۵ فرایند احتراق ۶۷۷
۹-۶ عملکرد محفظه احتراق ۶۸۲
۹-۷ مشکلات عملی محفظه احتراق ۶۹۲
۹-۸ آلایندگی صوتی (نویز) محفظه احتراق و پدیده هامینگ و growl ۷۰۱
۹-۸-۱ نویز مستقیم محفظه احتراق ۷۰۲
۹-۸-۲ ناپایداری محفظه احتراق ۷۰۳
۹-۸-۳ مشخصات زمانی ۷۰۴
۹-۸-۴ اثر نوع سوخت بر نویز احتراق ۷۰۴
۹-۸-۵ اثر شرایط احتراق (دما و فشار) بر نویز احتراق ۷۰۵
۹-۸-۶ اثر شرایط محیطی محل نصب بر نویز احتراق ۷۰۵
۹-۸-۷ کنترل ناپایداری محفظه احتراق ۷۰۵
۹-۹ طراحی پایه محفظه احتراق ۷۰۷
۹-۹-۱ به دست آوردن ابعاد محفظه احتراق ۷۰۸
۹-۹-۲ تخمین اولیه توزیع هوا و ابعاد منطقه احتراق ۷۱۴
۹-۹-۳ طراحی دیفیوزر ۷۱۵
۹-۹-۴ طراحی Swirler ۷۱۸
۹-۹-۵ طراحی ناحیه چرخش مجدد ۷۲۳
۹-۹-۶ محاسبات دما در قسمت‌های مختلف محفظه احتراق ۷۲۴
۹-۹-۱-۶ محاسبه دمای ناحیه چرخش مجدد محفظه ۷۲۵
۹-۹-۲-۶ محاسبه دمای ناحیه اولیه احتراق (بدون در نظر گرفت ناحیه چرخش مجدد) ۷۲۵
۹-۹-۳-۶ محاسبه دما در ناحیه ثانویه و رقیق سازی ۷۲۵
۹-۹-۷ محاسبه میزان خنک کاری مورد نیاز دیواره محفظه ۷۲۶
۹-۹-۷-۱ تابش از داخل به لاینر ۷۲۸
۹-۹-۷-۲ تابش ارز دیواره بیرونی لاینر به پوسته یا کیسینگ ۷۳۰
۹-۹-۷-۳ انتقال حرارت جابه جایی در دیواره داخلی لاینر ۷۳۱
۹-۹-۷-۴ انتقال حرارت جابه جایی در دیواره خارجی لاینر ۷۳۲
۹-۹-۷-۵ محاسبه دمای دیواره بیرونی و درونی یک لاینر بدون خنک کاری ۷۳۳
۹-۹-۷-۶ محاسبه دمای دیواره بیرونی و درونی یک لاینر با فیلم خنک کاری ۷۳۷
۹-۹-۷-۷ محاسبه دمای دیواره بیرونی و درونی یک لاینر با فیلم خنک کاری و دارای TBC ۷۵۲
۹-۹-۸ محاسبه میزان جریان جرمی سوراخ‌های روی بدنه لاینر ۷۵۳
۹-۱۰ آلایندگی محفظه احتراق ۷۶۸
۹-۱۰-۱ آلایندگی‌های توربین گاز ۷۶۹
۹-۱۰-۲ اکسیدهای نیتروژن ۷۷۱

۹-۱۰-۲-۱ تاثیر شرایط محیطی بر میزان NO_x تولیدی ۷۸۲
۹-۱۰-۳ مونوکسید کربن ۷۸۴
۹-۱۰-۴ هیدروکربن محترق نشده UHC ۷۸۴
۹-۱۰-۵ اکسیدهای گوگرد SO_x ۷۸۵
۹-۱۰-۶ ریز آلاینده ۷۸۶
۹-۱۰-۷ کنترل ریز آلایندها ۷۸۷
۹-۱۰-۸ حذف دی اکسید کربن از دود خروجی ۷۹۲
۹-۱۰-۸-۱ حذف کربن به روش پس احتراق ۷۹۶
۹-۱۰-۸-۲ حذف کربن به روش پیش احتراق ۷۹۹
۹-۱۰-۸-۳ حذف کربن به روش احتراق سوخت با اکسیژن خالص ۸۰۰
۹-۱۱ آلایندگی صوتی ۸۰۲
فصل ۱۰: توربین محوری ۸۰۷
۱۰-۱ طراحی و ساخت توربین جریان محوری ۸۰۸
۱۰-۱-۱ مرحله اول: بررسی شکل‌بندی اولیه یک مرتبه ۸۱۰
۱۰-۱-۲ مرحله دوم: تعریف مقدار کار در هر مرتبه ۸۱۰
۱۰-۱-۳ مرحله سوم: طراحی مرتبه به مرتبه توربین ۸۱۱
۱۰-۲ تعریف متغیرهای پرکاربرد در طراحی توربین ۸۱۲
۱۰-۳ تئوری طراحی پره‌ها با روش جریان گردابه آزاد ۸۵۹
۱۰-۴ تئوری طراحی با زاویه ثابت نازل ۸۶۳
۱۰-۵ طراحی جزئی پروفیل یک دسته پره برای قرارگیری در یک ردیف ۸۶۵
۱۰-۶ متغیرهای هندسی یک دسته ایرفویل ۸۶۷
۱۰-۶-۱ ضخامت پیشانی پره ۸۶۷
۱۰-۶-۲ زاویه گوه ای پیشانی پره ۸۶۸
۱۰-۶-۳ زاویه چرخش پوشش داده نشده ۸۶۸
۱۰-۶-۴ ضخامت دم انتهایی پره ۸۶۸
۱۰-۶-۵ بارگذاری آیرودینامیک پره ۸۶۹
۱۰-۶-۶ متغیرهای کنترل کننده عملکرد ایرفویل ۸۶۹
۱۰-۶-۷ نسبت طول به کورد پره aspect ratio ۸۶۹
۱۰-۶-۸ اثر لقی نوک پره ۸۷۰
۱۰-۶-۸-۱ رابطه تجربی وابستگی بازده مرتبه به لقی نوک پره ۸۷۲
۱۰-۶-۹ اثر عدد رینولدز ۸۷۳
۱۰-۶-۱۰ اثر زاویه برخورد ۸۷۳
۱۰-۶-۱۱ بخش شدگی جریان در سمت مکش پره ۸۷۶
۱۰-۶-۱۲ محل سکون جریان در پروفیل پره ۸۷۷
۱۰-۶-۱۳ ضخامت دم انتهایی پره ۸۷۸
۱۰-۷ طراحی بر اساس روابط تجربی ۸۷۹
۱۰-۷-۱ تعداد بهینه پره‌ها (رابطه تسوایفل) ۸۸۰
۱۰-۷-۲ گزینه‌های مختلف فراصوت کردن پره‌های استاتور ۸۸۱
۱۰-۷-۳ نحوه انتخاب پروفیل پره و پیچ و کورد آن ۸۸۲
۱۰-۸ روشی تئوری برای تعیین پروفیل پره و نسبت pitch/cord ۸۹۰
۱۰-۸-۱ اولین تقریب برای پروفیل ۸۹۴
۱۰-۸-۲ دومین تقریب برای پروفیل ۸۹۵
۱۰-۹ تغییر ابعاد اجزا در حالت سرد و گرم ۹۰۰

۱۰-۱۰ تخمین بازده یک مرتبه از توربین ۹۰۰
۱۰-۱۱ فاکتورهای محدود کننده در طراحی توربین ۹۰۱
۱۰-۱۲ تخمین پرفورمنس یک مرتبه از توربین در نقطه طراحی ۹۰۳
۱۰-۱۳ تخمین بازده کلی یک توربین ۹۱۱
۱۰-۱۴ خنک کاری پره‌های توربین ۹۱۳
۱۰-۱۴-۱ طراحی سیستم خنک کاری پره توربین ۹۲۲
۱۰-۱۴-۲ محاسبات حرارتی سیستم خنک کاری پره ۹۲۷
فصل ۱۱؛ توربین‌های جریان شعاعی ۹۴۳
۱۱-۱ اجزای انتقال انرژی ۹۴۷
۱۱-۲ زوایای جریان ۹۴۸
۱۱-۳ درجه عکس العملی بودن ۹۴۸
۱۱-۴ دیگر متغیرهای بدون بعد موثر در عملکرد توربین شعاعی ۹۴۸
۱۱-۴-۱ عدد رینولدز ۹۴۹
۱۱-۴-۲ ضریب جریان ۹۴۹
۱۱-۴-۳ ضریب کار ۹۴۹
۱۱-۴-۴ مشخصان نسبی سکون و عدد ماخ بحرانی ۹۴۹
۱۱-۵ شکل بندی و هندسه یک توربین شعاعی نمونه ۹۵۱
۱۱-۶ اثر تراکم پذیری ۹۵۴
۱۱-۷ مسیر حلزونی ۹۵۵
۱۱-۸ استاتور با پره ۹۵۶
۱۱-۹ روتور ۹۵۷
۱۱-۱۰ رابطه محاسبه افت در قسمت استاتور ۹۵۸
۱۱-۱۱ افت فاصله شعاعی بدون پره بین استاتور و روتور ۹۵۹
۱۱-۱۲ افت قسمت ورودی جریان به روتور ۹۶۰
۱۱-۱۳ افت‌های پروفیل پره روتور ۹۶۱
۱۱-۱۴ افت‌های داکت خروجی از روتور ۹۶۳
۱۱-۱۵ افت‌های ناشی از لقی بین پشت صفح روتور و پوسته توربین ۹۶۳
فصل ۱۲؛ طراحی مکانیکال توربین گاز ۹۸۱
۱۲-۱ فرایند طراحی ۹۸۱
۱۲-۲ معماری توربین گاز و نیازمندی‌های طراحی و هدف آن ۹۸۳
۱۲-۳ بارهای وارده به قطعات توربین ۹۸۴
۱۲-۴ مدهای شکست در قطعات مختلف توربین ۹۸۴
۱۲-۵ مواد مورد استفاده در ساخت توربین ۹۸۵
۱۲-۵-۱ شکست استاتیکی و مقاومت کششی ۹۸۶
۱۲-۵-۲ خزش ۹۸۸
۱۲-۵-۳ پارامتر لارسون میلر ۹۸۹
۱۲-۵-۴ رابطه تصویر Theta ۹۹۱
۱۲-۵-۵ خستگی نوسانی سیکل بالا (HCF) ۹۹۱
۱۲-۵-۶ خستگی نوسانی با سیکل کم (LCF) ۹۹۴
۱۲-۵-۷ خزش و (LCF) ۹۹۷
۱۲-۵-۸ خستگی ترمومکانیکال (TMF) ۹۹۷
۱۲-۵-۹ اکسید شدن و خوردگی داغ ۹۹۷
۱۲-۶ کلید مواد مورد استفاده در توربین گاز ۹۹۸

۱۲-۷ آلیاژهای مورد استفاده در قسمت‌های مختلف توربین گاز ۱۰۰۰
۱۲-۸ طراحی تنشی قطعات توربین و تخمین عمر ۱۰۰۲
۱۲-۸-۱ تخمین عمر ۱۰۰۳
۱۲-۸-۱-۱ روش ایمن-عمر ۱۰۰۳
۱۲-۸-۱-۲ روش تلرانس آسیب ۱۰۰۵
۱۲-۹ طراحی مکانیکال پره توربین ۱۰۰۷
۱۲-۹-۱ نحوه محاسبه تنش در پره توربین ۱۰۰۷
۱۲-۹-۲ تنش‌های ناشی از حرکت گریز از مرکز پره ۱۰۰۸
۱۲-۹-۳ تنش‌های خمشی ناشی از جریان گاز بر روی پره ۱۰۱۰
۱۲-۹-۴ تنش‌های گریز از مرکز بر خلاف جهت تاب پره در پره‌های تابدار سه بعدی ۱۰۱۴
۱۲-۹-۵ شکل پره ۱۰۱۴
۱۲-۹-۶ نحوه اتصال پره به دیسک ۱۰۱۵
۱۲-۹-۷ تنش‌های حرارتی ۱۰۱۸
۱۲-۹-۸ سیستم خنک کن پره ۱۰۱۹
۱۲-۱۰ طراحی مکانیکال دیسک در حالت با پره ۱۰۲۰
۱۲-۱۰-۱ تنش‌ها بر روی دیسک با پره ۱۰۲۰
۱۲-۱۰-۲ تنش‌های حرارتی ۱۰۲۶
۱۲-۱۰-۳ تنش در روتور کمپرسورهای شعاعی ۱۰۲۶
۱۲-۱۱ ارتعاشات دیسک و پره ۱۰۲۷
۱۲-۱۱-۱ ارتعاش رزونانسی ۱۰۳۱
۱۲-۱۱-۲ لرزش درجای پره ۱۰۳۴
۱۲-۱۱-۳ لرزش درجای پره وامانده در شرایط زیر صوت و transonic ۱۰۳۵
۱۲-۱۱-۴ لرزش درجای چوک شدگی ۱۰۳۵
۱۲-۱۱-۵ لرزش درجای فراصوت ۱۰۳۵
۱۲-۱۱-۶ لرزش درجای فراصوت در حالت واماندگی پره ۱۰۳۶
۱۲-۱۱-۷ لرزش درجای کلاسیک ناشی از کوپل پیچش و خمش ۱۰۳۶
۱۲-۱۱-۸ لرزش درجای سیستمی ۱۰۳۶
۱۲-۱۱-۹ نحوه طراحی برای جلوگیری از لرزش درجای پره ۱۰۳۶
۱۲-۱۲ ارتعاشات موتور ۱۰۳۷
۱۲-۱۲-۱ سرعت‌های بحرانی روتور ۱۰۳۸
۱۲-۱۲-۲ نحوه محاسبه دورهای بحرانی ۱۰۴۰
۱۲-۱۲-۳ ارتعاش کل سیستم موتور ۱۰۴۱
۱۲-۱۳ دیگر اجزا جانبی توربین ۱۰۴۳
فصل ۱۳؛ پوشش محافظ حرارتی در توربین(TBCs) ۱۰۴۹
۱۳-۱ اصول اولیه ترمودینامیک ۱۰۵۱
۱۳-۲ ساختار کریستال‌ها ۱۰۵۵
۱۳-۳ نواقص در کریستال‌ها ۱۰۵۷
۱۳-۴ تعادل فازها ۱۰۵۸
۱۳-۵ دیاگرام فازی دودویی ۱۰۵۹
۱۳-۶ آلیاژهای زیرپایه اصلی مورد استفاده در توربین گاز ۱۰۶۰
۱۳-۷ ظرفیت تحمل حرارتی فلزات و آلیاژها ۱۰۶۰
۱۳-۸ مکانیزم‌های افزایش استحکام ۱۰۶۱
۱۳-۹ آلیاژهای تیتانیومی ۱۰۶۳

۱۰-۱۳ آلیاژهای فولاد ۱۰۶۵
۱۱-۱۳ آلیاژهای پایه نیکل-آهن ۱۰۶۸
۱۲-۱۳ آلیاژهای پایه نیکل-کبالت ۱۰۶۸
۱۳-۱۳ اکسید شدن ۱۰۷۲
۱-۱۳-۱۳ تست اکسید شدن و رشد و تکامل آن ۱۰۷۶
۲-۱۳-۱۳ اکسید شدن آلیاژها ۱۰۸۳
۳-۱۳-۱۳ نقش عناصر مختلف در آلیاژها ۱۰۸۸
۴-۱۳-۱۳ اکسید شدن در حضور بخار آب ۱۰۹۲
۵-۱۳-۱۳ فرایند اکسید شدن آلیاژها ی چند کریستاله در مقایسه با آلیاژهای تک کریستاله ۱۰۹۲
۱۴-۱۳ خوردگی داغ ۱۰۹۳
۱-۱۴-۱۳ نمک‌های خورنده ۱۰۹۵
۲-۱۴-۱۳ خوردگی داغ فلزات و آلیاژها ۱۱۰۰
۳-۱۴-۱۳ نقش عناصر خاص موجود در آلیاژهای پایه نیکلی و کبالتی در خوردگی داغ ۱۱۰۳
۴-۱۴-۱۳ خوردگی داغ TBCs ۱۱۰۷
۱-۴-۱۴-۱۳ مقاومت خوردگی و اکسید شدن پوشش‌ها ۱۱۰۸
۲-۴-۱۴-۱۳ نیازمندی‌های پوشش‌های فلزی مقاوم به خوردگی ۱۱۰۸
۳-۴-۱۴-۱۳ مواد تشکیل دهنده پوشش‌ها و نقش آنها ۱۱۰۸
۱۵-۱۳ فرایندهای ایجاد پوشش ۱۱۰۹
۱-۱۵-۱۳ پوشش به روش دیفیوژن ۱۱۱۰
۱-۱-۱۵-۱۳ پوشش‌های Pack ۱۱۱۱
۲-۱۵-۱۳ پوشش به روش OVERLAY ۱۱۲۸
۱-۲-۱۵-۱۳ ایجاد پوشش OVERLAY به روش پاشش و قوس ۱۱۲۹
۲-۲-۱۵-۱۳ ایجاد پوشش OVERLAY با روش تخلیه بخار فیزیکی PVD ۱۱۴۶
۱۶-۱۳ مقایسه مقاومت در برابر اکسید شدن و خوردگی داغ پوشش‌های مختلف ۱۱۵۱
۱۷-۱۳ عمر خوردگی و اکسید شدن پوشش ها ۱۱۵۴
۱۸-۱۳ پوشش‌های سرامیکی (TBCs) ۱۱۵۶
۱-۱۸-۱۳ پاشش TBC ها به روش APS ۱۱۶۱
۲-۱۸-۱۳ پوشش‌های TBC به روش EB-PVD ۱۱۶۸
۱۹-۱۳ تعمیر پوشش ها ۱۱۷۹
۲۰-۱۳ پوشش‌ها در توربین گاز ۱۱۸۰
فصل ۱۴؛ نحوه تطبیق دادن توربین و کمپرسور ۱۱۸۷
۱-۱۴ تطبیق توربین با کمپرسور ۱۱۹۱
۲-۱۴ تطبیق کمپرسور با توربین ۱۱۹۵
۳-۱۴ مصرف سوخت مخصوص ۱۱۹۸
۴-۱۴ خط عملکردی راننده کمپرسور در نقشه عملکردی کمپرسور در خطوط T_{t4}/T_{t2} ثابت ۱۱۹۹
۱-۴-۱۴ حلقه بیرونی ۱۱۹۹
۲-۴-۱۴ حلقه داخلی ۱۲۰۰
۳-۴-۱۴ ادامه حلقه بیرونی ۱۲۰۱
۵-۱۴ فرایند ایجاد خطوط نسبت دمای ثابت در نقشه عملکردی کمپرسور ۱۲۰۱
فصل ۱۵؛ فرایندهای ساخت و تعمیر قسمت‌های مختلف توربین گاز ۱۲۰۹
۱-۱۵ کمپرسور ۱۲۱۱
۱-۱-۱۵ روش ساخت قطعات مختلف کمپرسور ۱۲۱۱
۱-۱-۱-۱۵ ساخت آب بندها ۱۲۱۷

۱۵-۱-۲ مواد مورد استفاده در ساخت کمپرسور ۱۲۱۸
۱۵-۱-۳ مونتاژ روتور کمپرسور ۱۲۱۸
۱۵-۲ محفظه احتراق ۱۲۲۳
۱۵-۲-۱ روش‌های ساخت محفظه احتراق ۱۲۲۴
۱۵-۳ توربین ۱۲۲۶
۱۵-۳-۱ ساخت قطعات اصلی توربین جریان محوری ۱۲۲۷
۱۵-۳-۲ ساخت پره داغ توربین ۱۲۲۹
۱۵-۳-۲-۱ ساخت پره داغ توربین BBC به عنوان نمونه ۱۲۳۳
۱۵-۳-۲-۱-۱ ساخت قالب ۱۲۳۵
۱۵-۳-۲-۱-۲ فرآیند تولید قطعه مومی ۱۲۳۵
۱۵-۳-۲-۱-۳ کنترل قطعه مومی ۱۲۳۶
۱۵-۳-۲-۱-۴ فرآیند طراحی و شبیه‌سازی و استخراج سیستم راهگاهی ۱۲۳۶
۱۵-۳-۲-۱-۵ فرآیند ساخت قالب سرامیکی ۱۲۳۸
۱۵-۳-۲-۱-۶ فرآیند ریخته گری ۱۲۳۸
۱۵-۳-۲-۱-۷ شرایط آماده‌سازی ذوب ۱۲۳۸
۱۵-۳-۲-۱-۸ فرآیندهای تکمیلی ۱۲۳۹
۱۵-۳-۲-۱-۹ بازدید چشمی ۱۲۴۰
۱۵-۳-۲-۱-۱۰عملیات حرارتی ۱۲۴۰
۱۵-۳-۲-۱-۱۱ فرآیند کنترل و استاندارد پذیرش ۱۲۴۰
۱۵-۳-۲-۱-۱۲ مراحل و تعداد انجام آزمایش ها ۱۲۴۰
۱۵-۳-۲-۱-۱۳شرایط پوشش دهی ۱۲۴۱
۱۵-۳-۲-۱-۱۴ قطعه آزمایشی ۱۲۴۲
۱۵-۳-۲-۲ فرایند تعمیر و جوان‌سازی پره‌های داغ توربین ۱۲۴۲
۱۵-۳-۲-۲-۱ انواع آسیب‌های پره داغ ۱۲۴۲
۱۵-۳-۲-۲-۲ آسیب‌های ریز ساختاری ۱۲۴۳
۱۵-۳-۲-۲-۳ تمیز کاری ۱۲۴۳
۱۵-۳-۲-۲-۴ تمیزکاری قلیایی ۱۲۴۴
۱۵-۳-۲-۲-۵ اسید شویی ۱۲۴۴
۱۵-۳-۲-۲-۶ تمیزکاری به روش مکانیکی ۱۲۴۴
۱۵-۳-۲-۲-۷ ارزیابی غیر مخربNDE ۱۲۴۵
۱۵-۳-۲-۲-۸ بازرسی به روش مایع نافذFPI ۱۲۴۶
۱۵-۳-۲-۲-۹ متالوگرافی غیر مخرب Replica ۱۲۴۷
۱۵-۳-۲-۲-۱۰ حذف پوشش ۱۲۴۷
۱۵-۳-۲-۲-۱۱ حذف پوشش سرامیکی ۱۲۴۷
۱۵-۳-۲-۲-۱۲حذف پوشش فلزی ۱۲۴۸
۱۵-۳-۲-۲-۱۳ تایید حذف پوشش ۱۲۴۸
۱۵-۳-۲-۲-۱۴ حذف آسیب‌ها و ترک‌های سطحی ۱۲۴۸
۱۵-۳-۲-۲-۱۵ عملیات حرارتی ۱۲۵۱
۱۵-۳-۲-۲-۱۶ عملیات حرارتی جوان‌سازی(Rejuvenation) ۱۲۵۱
۱۵-۳-۲-۲-۱۷ جوشکاری ۱۲۵۲
۱۵-۳-۳ ساخت دیسک ناحیه گرم ۱۲۵۳
مراجع ۱۲۶۳

دیباچه

امروزه توربین گاز در صنایع مختلف، به خصوص در بخش تولید توان، دارای کاربرد بسیار وسیعی است. این کاربرد وسیع و روزافزون مرهون ویژگی‌های خاص توربین گاز نظیر تولید با صرفه انرژی و قابلیت راه‌اندازی سریع می‌باشد. در کشور ما نیز به دلیل وفور منابع سوخت گاز و نیز رشد تقاضای انرژی الکتریکی، ساخت و توسعه فناوری توربین‌های گاز اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به تنوع بالای موارد کاربری توربین‌های گاز، طراحی‌های مختلفی توسط سازندگان این محصول ارائه شده است. به دلیل همین امر، توسعه فناوری توربین‌های گاز و یا حتی انتخاب و به‌کارگیری محصولات ارائه شده توسط سازندگان مختلف، نیازمند شناخت اصول و مبانی طراحی توربین گاز است.

گروه مپنا از آغاز تأسیس در سال ۱۳۷۱، از طریق مهندسی، ساخت تجهیزات و اجرای نیروگاه، بخش عمده ظرفیت نیروگاه‌های ایران را احداث نموده است؛ به طوری که نقش مهم این گروه در توسعه ظرفیت نیروگاهی کشور سبب رشد و توسعه صنعتی در این زمینه شده است. همچنین گروه مپنا تنها سازنده تمامی تجهیزات اصلی نیروگاه‌های حرارتی، از جمله توربین گاز و بخار، تجهیزات جانبی توربین، پره توربین، ژنراتور و بویلرهای بازیاب حرارتی (HRSG) در ایران می‌باشد. در این حوزه‌ها، گروه مپنا نخستین و بزرگترین پیمانکار عمومی نیروگاهی در غرب آسیا، نخستین و بزرگترین سازنده تمامی تجهیزات اصلی نیروگاهی در این مناطق و نخستین و بزرگترین سرمایه‌گذار طرح‌های نیروگاهی خصوصی در کشور محسوب می‌شود. جذب پیشرفته‌ترین فناوری و دانش فنی در تمام حوزه‌های فعالیت صنعتی را می‌توان از دستاوردهای گروه مپنا برشمرد.

گروه مپنا با برخورداری از توانمندی‌ها و فناوری‌های بیان شده و برای ایفای رسالت‌های اجتماعی خویش از یک سو و گسترش کسب و کار در حوزه‌هایی که مزیت رقابتی دارد از سوی دیگر، کتاب «مبانی طراحی توربین گاز» را منتشر می‌سازد. این کتاب به منظور نشر دانش، در دسترس جامعه علمی و تخصصی کشور قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود که این کتاب مورد استقبال محققان و طراحان علاقمند واقع گردد و ضمن آن که زمینه‌ای برای تحقیق و انتشار بیشتر متون علمی در این زمینه را فراهم می‌سازد، به توسعه فناوری توربین گاز در داخل کشور کمک کند.

بیش از یک ربع قرن تلاش در زمینه جذب و توسعه فناوری‌های پیشرفته و به‌کارگیری آن برای رشد و ارتقای ملی، گروه مپنا را به یک بنگاه اقتصادی دانش بنیان تبدیل کرده است. انتشار این کتاب در زمینه فناوری توربین گاز که گروه مپنا در آن سرآمدی ملی و منطقه‌ای دارد، ایفای بخشی از رسالت‌های اجتماعی سازمان از طریق نشر دانش است. معاونت پژوهش و فناوری گروه مپنا امیدوار است در انجام این وظیفه، با دریافت نظرها و پیشنهادها از حمایت جامعه علمی ـ تخصصی کشور بهره‌مند گردد.

بهمن ۱۳۹۸
محمود رضا حقی فام
معاون پژوهشی و فناوری شرکت گروه مپنا

مقدمه مولف

در نگارش کتاب، این هدف در نظر بوده است که دانشجویان و مهندسانی که در زمینه طراحی، تعمیرات و بهره برداری توربین گاز فعالیت می‌نمایند بتوانند اطلاعات جامع، کاربردی و روزآمد مربوط به حیطه فعالیت را در حداقل زمان و به صورت مدون در اختیار داشته باشند. به طور خلاصه این کتاب نتیجه چندین سال فعالیت در پروژه‌های اجرایی نیروگاهی و نفتی و حداقل سه سال تحقیق در مدارک فنی و مهندسی سازندگان مطرح توربین گاز دنیا و اجزای مختلف این تجهیز و بیش از ۵۰۰ مرجع معتبر بین المللی منتشر شده پس از سال ۲۰۰۶ می‌باشد.

امید است گامی که برداشته شده در خدمت به جامعه مهندسی کشور عزیزمان مفید واقع گردد و از همه سروران استدعا دارد که نظرات اصلاحی خود را جهت بهبود کتاب از نگارنده دریغ نفرمایند.

مسیری که برای چاپ این کتاب پیموده شد، بدون کمک برخی سروران و همکاران به ویژه جناب آقای مهندس عسگری میسر نبود و چنانچه پیگیری و کمک ایشان نبود این کتاب چاپ نمی‌شد. همچنین از زحمات بی شائبه سرکار خانم مدرس که با صبوری، تمامی مدارکی که اینجانب برای تألیف این کتاب بدان نیاز داشتم در اختیار اینجانب گذاشتند تشکر می‌گردد.

در پایان نیز از حمایتی که جناب آقای مهندس آذرمینا معاون محترم مهندسی بخش برق مپنا، در راستای چاپ این کتاب مبذول داشتند، تشکر می‌نمایم.

هادی اله یاری

اطلاعات تماس:

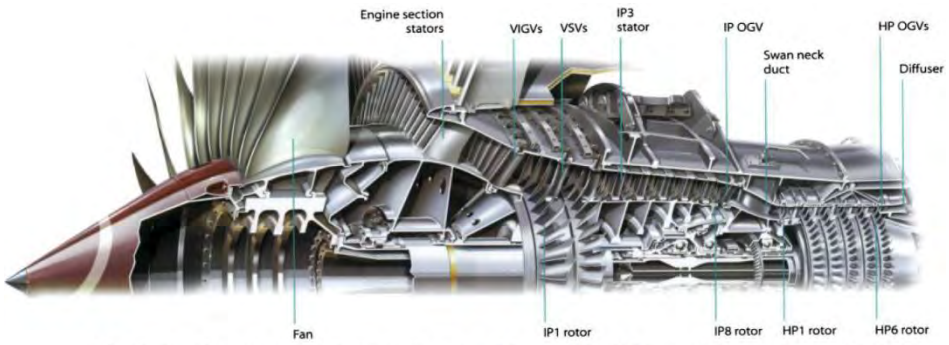
پست الکترونیکی: alahyaari_h@mapnagroup.com

تلفن: ۰۲۱-۲۴۷۱۱۴۸۲-۲۳۱۵۱۴۸۲

نمابر: ۰۲۱-۲۴۷۱۲۸۰۷

مقدمه

توربین گاز به طور قطع یکی از مهمترین اختراعات بشری در قرن بیستم است. این ماشین بعد از جنگ جهانی دوم برای تولید برق مورد استفاده قرار گرفت ولی در ابتدا قابل رقابت با موتورهای آن زمان مانند توربین بخار و موتورهای دیزل نبود. اولین کاربرد مهم توربین‌ها به عنوان موتور راننده جت‌های جنگی در اواخر جنگ جهانی دوم صورت گرفت. این موتورها در ابتدا دارای بازده پایین بوده و قابلیت اطمینان پایین و آلایندگی صوتی بالایی داشتند ولی پس از ۲۰ سال به حد بلوغ کافی برای استفاده در موتورهای جت‌های مسافربری رسیدند.



1–6 The fan and compressors form the compression system of the Trent 500, a high-bypass civil engine. *(Source: Rolls Royce.)*

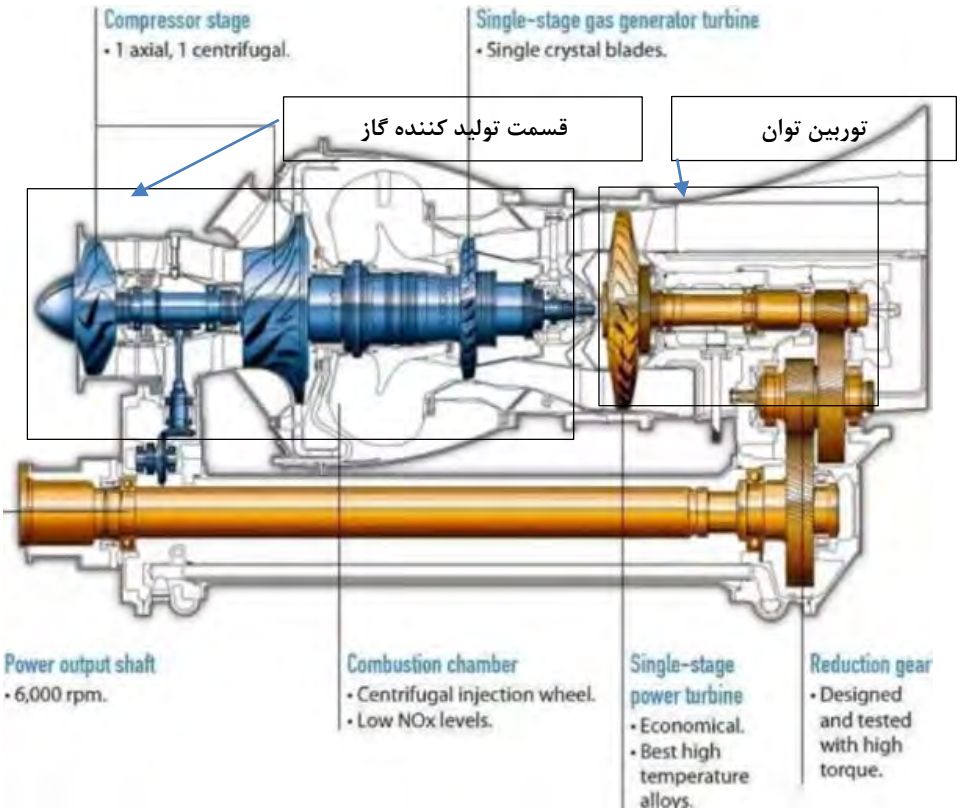
شکل الف) موتور توربین‌های Trent 500

امروزه ظرفیت توان تولید توربین‌ها تا حدود ۵۵۰ مگاوات نیز افزایش یافته است. این محدودیت به دلیل وجود ماشین آلات برای ریخته گری و تراشکاری دیسک‌ها و محدودیت ترافیکی بار در جاده‌ها اعمال می‌شود اما در توربین‌های بخار این محدودیت وجود ندارد زیرا امکان مونتاژ و ساخت توربین بخار در محل نصب وجود دارد در صورتی که توربین‌های گاز در محل تولید و ساخت مونتاژ و اسمبل می‌گردد و محدودیت‌های فوق پا برجا می‌باشد.

یک توربین گاز طراحی شده است که بتواند انرژی حرارتی موجود در یک سوخت را به انرژی مکانیکی از قبیل حرکت دورانی یا نیروی بالابر در موتورهای هوایی تبدیل کند. یک توربین شامل دو قسمت اصلی ۱- تولید کننده گاز[1] ۲-تولید کنند توان[1] تقسیم می‌شود. شکل زیر این دو قسمت را نشان می‌دهد. به وضوح، قسمت

[1] -Gas generator (GG)

تولید کننده گاز شامل کمپرسور، محفظه احتراق و کل منطقه توربین در موتورهای هوایی است. در توربین‌های زمینی قسمت تولید کننده گاز[2] شامل کمپرسور، محفظه احتراق و یک یا دو ردیف از توربین که کمپرسور را می‌راند و در روی شفت کمپرسور سوار است، می‌باشد.



شکل ب) قسمت تولید کننده گاز و توان در یک توربین گاز

به طور کلی از توربین گاز در دو زمینه زیر استفاده می‌شود:

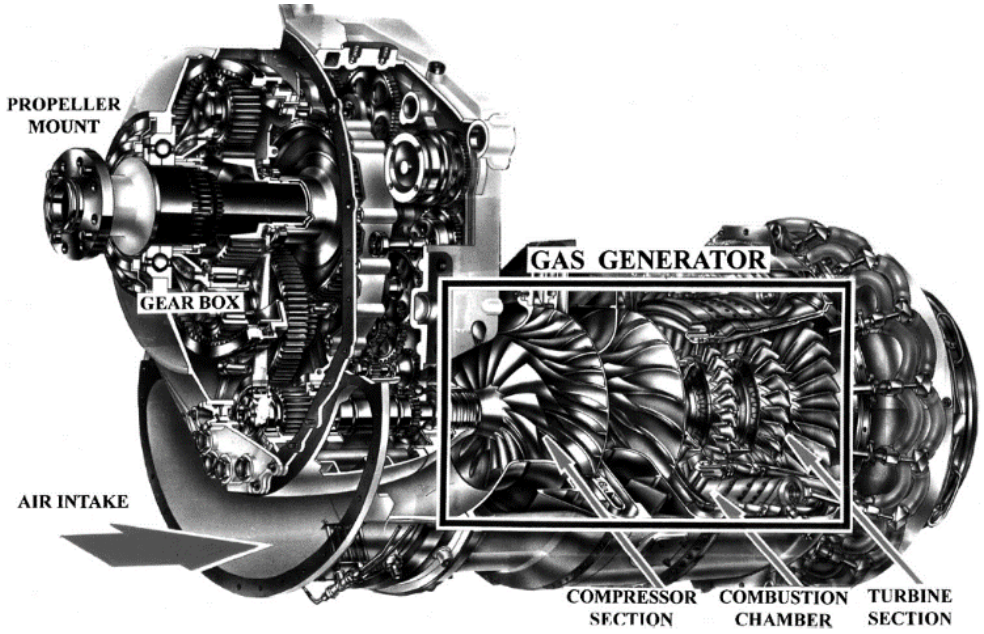
۱-تولید توان در کاربردهای زمینی: در این حالت از تولید گاز به عنوان تولید کننده برق در نیروگاه‌ها و توربوکمپرسور و توربوپمپ برای تقویت فشار سیال در خطوط انتقال گاز و نفت و یا به عنوان نیروی محرک کشتی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

---

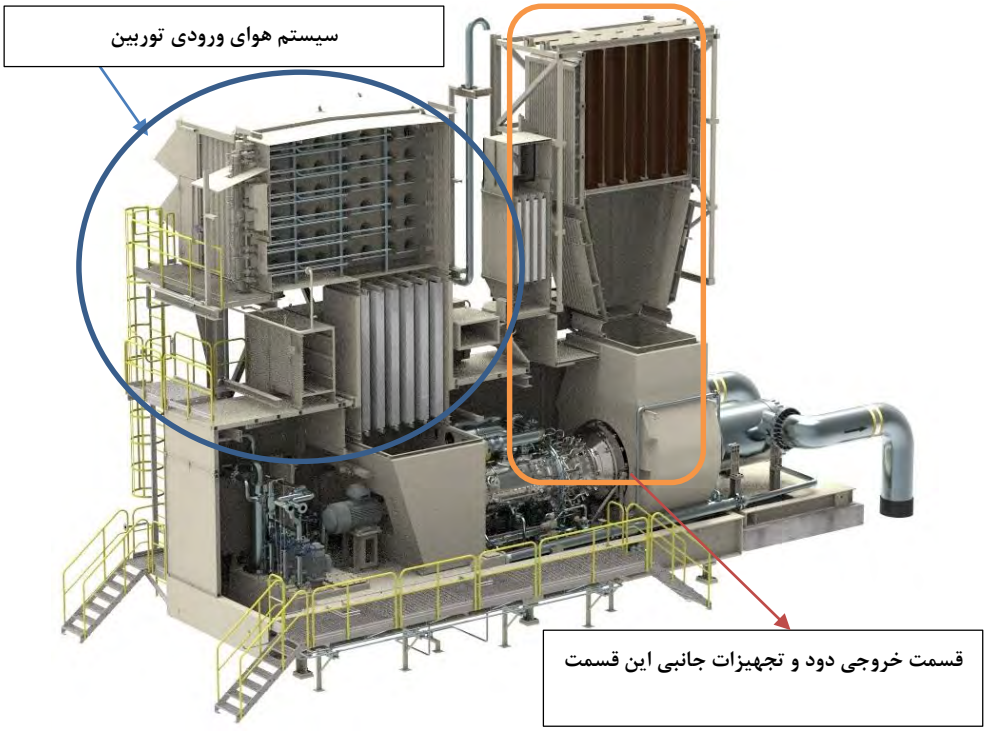
[1] -Power Turbine (PT)
[2] -Gas Generator(GG)

۲- تولید نیروی بالاتر در کاربردهای هوایی: از توربین گاز به دلیل نسبت توان تولید به وزن بالای آن به طور گسترده در صنعت هوایی استفاده می‌شود. همچنین به دلیل عدم تماس قطعات بر روی هم به مانند موتورهای رفت و برگشتی، مشکلات بالانس کمتری دارند و نیاز به روغن روانکاری پایینی دارند. در نتیجه قابلیت اطمینان توربین‌ها بالاتر از موتورهای رفت و برگشتی است.

علاوه بر قسمت تولید کننده گاز، یک توربین به دو قسمت ورودی و خروجی نیز نیاز دارد. در موتورهای زمینی قسمت ورودی که به ایرینتک شناخته می‌شود به موتور وصل است و طرح آن از یک موتور به موتور دیگر متفاوت است. در ایرینتک از مش‌های ریزی بسته به شرایط هوایی برای جلوگیری از ورود ذرات به توربین استفاده می‌شود.



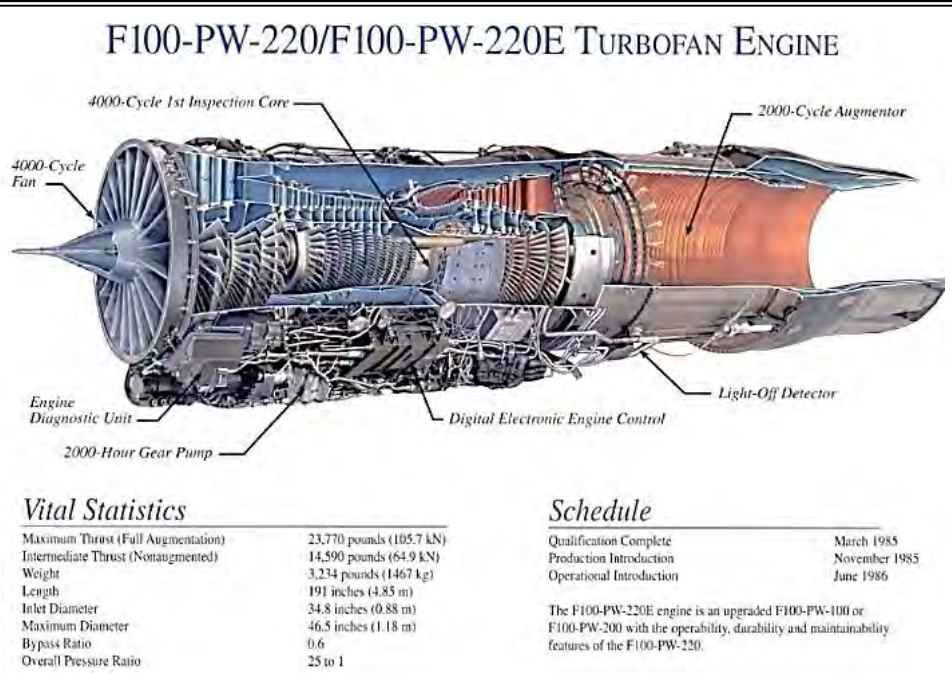
شکل ج) سیستم هوایی ورودی در موتورهای هوایی ملخ دار[1]



شکل چ) سیستم هوایی ورودی و داکت خروجی در موتورهای زمینی (رفرنس شرکت زیمنس)

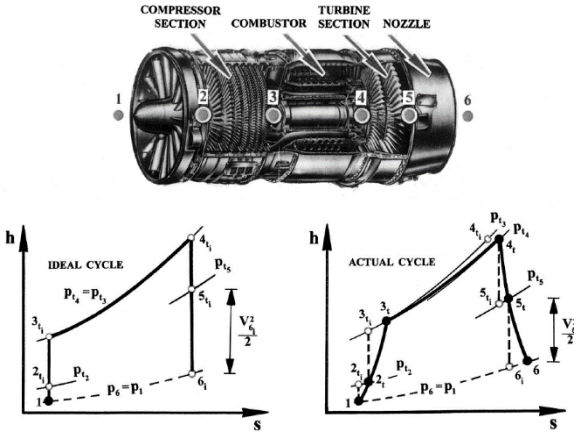
در قسمت داکت خروجی انرژی جنبشی گاز در این قسمت تا حدودی به صورت فشار بازیابی می‌شود. همچنین در توربو فن‌ها از نازل‌های همگرا (در موتورهای با جریان خروجی زیر صوت) یا همگرا واگرا (موتورهای با جریان خروجی فرا صوت) استفاده می‌شود. این نازل‌ها معمولا به صورت Annular هستند و در بعضی طراحی‌ها در داکت خروجی از دو نازل به طور همزمان استفاده می‌شود. نازل اول در مرکز قرار داشته و انرژی جریان اولیه را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند و نازل بیرونی جریان ثانویه را.

شکل بعدی موتور جت با یک نازل همگرا و مشخصات اصلی آن را نشان می‌دهد.



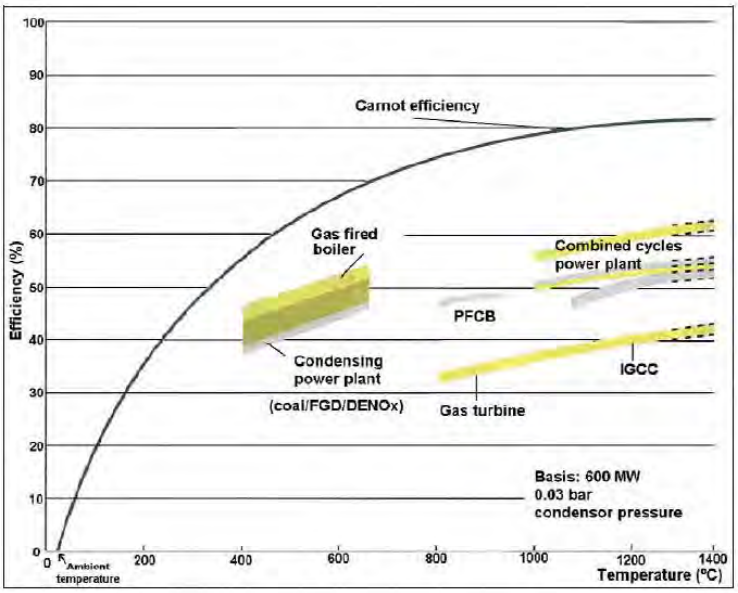
شکل ح) موتور توربوفن F100-PW-220/F100-PW-220E (رفرنس P&W)

همه توربین‌های گازی بر اساس سیکل برایتون ساخته و طراحی می‌شوند. شکل زیر سیکل برایتون در حالت ایده آل و آنتروپی ثابت و واقعی را در قسمت‌های مختلف توربین نشان می‌دهد.



شکل خ) سیکل برایتون واقعی و ایده آل در یک موتورهوایی [1]

لازم به ذکر است از نظر تئوری بازده حداکثر توربین‌های گازی دارای محدودیت است و هیچ گاه نمی‌تواند به ۱۰۰ درصد برسد. این محدودیت که همان بازده سیکل کارنو و ایده آل آن است در شکل زیر به همراه سیکل واقعی توربین گاز و دیگر روش‌های تولید توان جهت مقایسه نشان داده شده است.



شکل د-محدوده بازده انواع نیروگاه‌های برق با سیکل کارنو متناظر [2]

در این قسمت به طور مختصر به شرح کتاب و اهداف آن پرداخته خواهد شد و در ادامه آن، بخش‌های اصلی کتاب آورده می‌شود. لازم به ذکر است این کتاب، بیشتر بر پایه طراحی‌های مهندسی و تجربه‌های مهندسی استوار شده و در آن سعی شده است بیشتر از دید عملیاتی به توربین نگاه شود. بنابراین مقادیر فنی مختلف ذکر شده در این کتاب جنبه تجربی داشته و ممکن است در توربین‌های مختلف و بسته به طراح و سازنده آن متفاوت باشد. ذکر این اعداد باعث ایجاد یک ذهنیت و یک تخمین درست در ذهن خواننده و مهندسان گرامی خواهد شد تا مقایسه‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته قابل درک و نتیجه‌گیری باشد. همچنین این کتاب بیشتر بر طراحی و مهندسی توربین‌های زمینی پرداخته است و چنانچه عمری باقی باشد در سال‌های آتی، بخش موتورهای هوایی نیز به آن اضافه خواهد شد.

در فصل اول این کتاب ابتدا به دسته بندی انواع سوخت‌های مورد استفاده در توربین‌ها پرداخته می‌شود و در فصل دوم به سیکل ترمودینامیک توربین گاز (سیکل برایتون) پرداخته خواهد شد. در فصل سوم نیروگاه سیکل

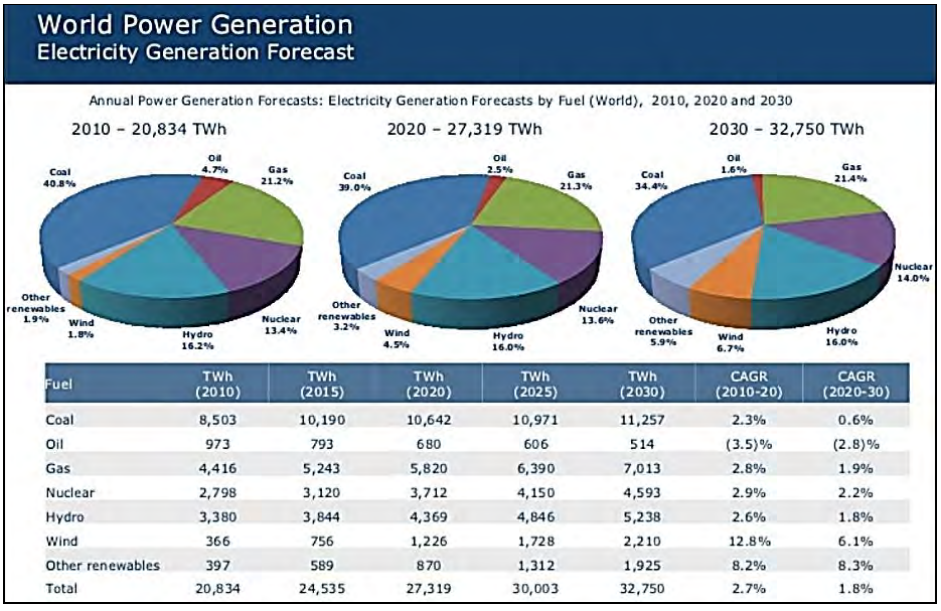
ترکیبی و فصل چهارم نیروگاه IGCC بررسی خواهد شد. در ادامه در فصل پنجم سیستم هوای ورودی توربین بررسی خواهد شد. در فصل ششم به مقوله مومنتوم و انتقال انرژی بین سیال و روتور آورده شده است. در فصل هفتم طراحی آیرودینامیک کمپرسور شعاعی و در فصل هشتم کمپرسور محوری بررسی خواهد شد. در ادامه در فصل نهم محفظه احتراق و روش‌های طراحی تجربی آن بررسی شده است. در فصل دهم به طراحی آیرودینامیک توربین محوری و در فصل یازدهم توربین شعاعی بررسی شده است. در ادامه در فصل دوازدهم طراحی مکانیکال و طراحی از منظر تنش، عمر، خستگی و ارتعاشات یک توربین بررسی شده است. یکی از موارد بسیار جدید در توربین‌ها پوشش‌های حرارتی هستند که سعی شده است انواع روش‌های ایجاد پوشش حرارتی و تفاوت آن‌ها در فصل سیزدهم بررسی شود. در فصل چهاردهم نحوه هماهنگ کردن توربین و کمپرسور و نقشه عملکردی آنها آورده شده است و در نهایت در فصل پانزدهم فرایندهای ساخت قسمت‌های مختلف توربین گاز و ماشین آلات پایه مورد نیاز ساخت و تعمیر قسمت‌های مختلف توربین و جوان‌سازی پره آورده شده است.

فصل ۱

سوخت‌ها

۱-۱ انواع سوخت‌ها

اولین سوخت‌هایی که بشر از آن برای تولید بخار استفاده کرد سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، مشتقات نفتی و گاز طبیعی بودند. با پیشرفت تکنولوژی، اهمیت سوخت و بالا رفتن ارزش آن، بشر از منابع مختلفی برای دریافت حرارت مورد نیاز خود استفاده کرد. منابعی مانند گاز خروجی از کوره‌های حرارتی، کارخانه‌های چوب بری، گاز خروجی پالایشگاه‌ها و غیره می‌تواند به عنوان منبع حرارتی در نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در گراف زیر وضعیت استفاده از انرژی‌های مختلف در تولید برق در گذشته نزدیک (سال۲۰۱۰) و در آینده (سال ۲۰۳۰) را نشان می‌دهد. با توجه به گراف زیر، زغال سنگ به عنوان اصلی‌ترین منبع جهت تولید برق در رتبه نخست قرار دارد و پس از آن گاز طبیعی و انرژی هسته‌ای در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

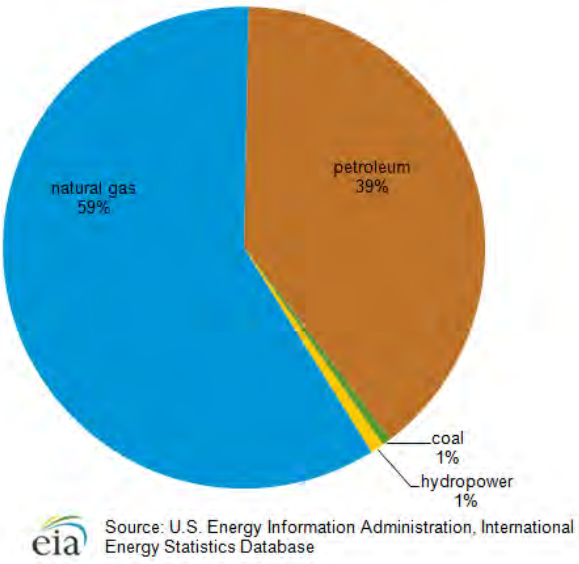


Fuel	TWh (2010)	TWh (2015)	TWh (2020)	TWh (2025)	TWh (2030)	CAGR (2010-20)	CAGR (2020-30)
Coal	8,503	10,190	10,642	10,971	11,257	2.3%	0.6%
Oil	973	793	680	606	514	(3.5)%	(2.8)%
Gas	4,416	5,243	5,820	6,390	7,013	2.8%	1.9%
Nuclear	2,798	3,120	3,712	4,150	4,593	2.9%	2.2%
Hydro	3,380	3,844	4,369	4,846	5,238	2.6%	1.8%
Wind	366	756	1,226	1,728	2,210	12.8%	6.1%
Other renewables	397	589	870	1,312	1,925	8.2%	8.3%
Total	20,834	24,535	27,319	30,003	32,750	2.7%	1.8%

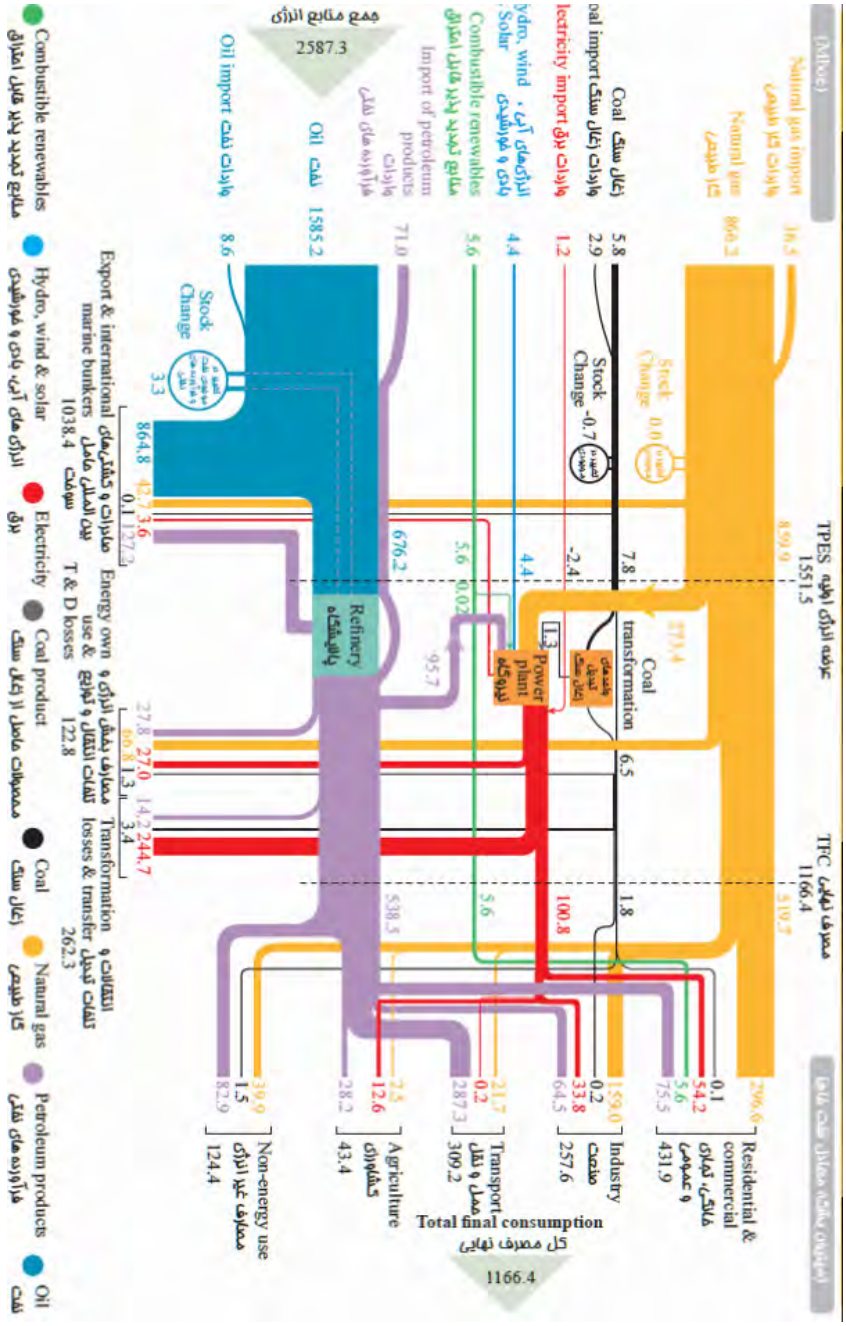
شکل ۱-۱ استفاده از منابع مختلف انرژی در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۳۰[3]

استفاده از زغال سنگ در توربین گاز در صورت وجود گازی ساز امکان‌پذیر است که در بخش نیروگاه‌های IGCC به آن پرداخته خواهد شد.

در ایران، مصرف انرژی با توجه به وجود منابع سرشار هیدروکربنی، متفاوت از نقاط دیگر دنیا است. گاز طبیعی و نفت به عنوان اصلی‌ترین منابع انرژی در ایران در رتبه اول و دوم قرار دارند. شکل‌های زیر درصد نوع سوخت مصرفی در ایران در سال ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ میزان مصرف انرژی و نوع آن در ایران در سال ۲۰۱۰ [3]



شکل ۱-۳ تراز انرژی ایران در سال ۲۰۱۵ (بر حسب داده‌های iea) [5]

به طور کلی، تقسیم‌بندی سوخت‌هایی که توسط بشر مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر اساس ۱- حالت فیزیکی سوخت (جامد، مایع و گاز بودن آن در شرایط طبیعی) ۲-روش تهیه و تولید آن (تولید طبیعی یا صنعتی آن) تقسیم‌بندی می‌شود. پیش از اینکه به این تقسیم‌بندی کلی و مزایا و معایب هر دسته از سوخت‌های تقسیم‌بندی شده پرداخته شود، می‌بایست پارامترهای موثر بر کیفیت سوخت تعریف گردد و در ادامه به صورت دقیق‌تر به بیان ویژگی هر دسته به خصوص سوخت‌هایی که در توربین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، توجه شود.

جدول ۱-۱ تقسیم‌بندی سوخت‌های طبیعی و صنعتی[5]

Natural Fuels	Manufactured Fuels
Solid Fuels	
Wood **Coal** **Oil shale**	Tanbark, Bagasse, Straw Charcoal Coke Briquettes Nuclear fuels
Liquid Fuels	
Petroleum	Oils from distillation of petroleum - Coal tar - Shale-oil Alcohols, etc
Gaseous Fuels	
Natural gas	Coal gas Producer gas Water gas Hydrogen Acetylene Blast furnace gas Oil gas

۱-ویسکوزیته[1]: ویسکوزیته به صورت تئوری، مقاومت سیال در مقابل حرکت داخلی تعریف می‌شود یا به عبارت دیگر، مقاومت یک مایع در برابر اعمال تنش برشی است. هرچه میزان ویسکوزیته سیال بیشتر باشد در مقابل تغییر از خود مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. این پارامتر در انتقال سوخت در خطوط لوله و اتمیزه کردن سوخت تاثیر زیادی دارد.

[1] -Viscosity

۲-آنالیز نهایی[1]: از آنالیز نهایی برای تعیین میزان تئوری هوای مورد نیاز برای احتراق کامل و پتانسیل آلایندگی سوخت استفاده می‌شود.

۳-ارزش حرارتی[2]: ارزش حرارتی یک سوخت مایع به صورت انرژی حاصل از احتراق کامل واحد جرم سوخت تعریف می‌شود (J/kg). این مقدار به دو صورت ارزش حرارتی ناخالص یا بالا[3]، و ارزش حرارتی خالص یا پایین[4]، گزارش می‌شود. در تعیین میزان ارزش حرارتی بالا فرض می‌شود میزان بخار تولید شده در فرایند احتراق، کندانس شده و به دمای اولیه آن بازگردانده می‌شود و در تعیین میزان ارزش حرارتی پایین، فرض می‌شود بخار آب تشکیل شده کندانس نشود.

۴-وزن مخصوص[5]: این پارامتر، به صورت نسبت چگالی سوخت مایع به چگالی آب تعریف می‌شود. این پارامتر آیتم مهمی است زیرا خرید و فروش سوخت به صورت حجمی صورت می‌گیرد و این معیاری برای مقایسه است. معروف‌ترین واحد برای ارائه این کمیت توسط استاندارد API[6] بیان شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$API = \frac{141.5}{(SP.GR.60/60)} - 131.5$$

۵-دمای اشتعال[7]: پایین‌ترین دمایی است که در آن از ماده بخاری قابل احتراق ساطع می‌شود. اندازه‌گیری نقطه اشتعال نیازمند یک منبع احتراق است. با خارج کردن منبع احتراق از محل، بخار مذکور محترق نخواهد شد. نبایستی نقطه اشتعال را با دمای خود احتراقی[8] اشتباه گرفت. در دمای خود احتراقی نیازی به منبع احتراق وجود ندارد. نقطه خود احتراقی، دمای بالاتری است که در آن بخار پس از احتراق به سوختن ادامه می‌دهد. نه نقطه اشتعال و نه نقطه خود احتراقی، به دمای منبع احتراق که بسیار بالاتر است وابسته نیست.

جدول ۱-۲ دمای اشتعال و خود اشتعالی تعدادی از سوخت‌های مایع [5]

Fuel	Flash point	Auto-ignition temperature
Gasoline (petrol)	−43 °C (−45 °F)	280 °C (536 °F)
Diesel (2-D)	>52 °C (126 °F)	256 °C (493 °F)
Jet fuel (A/A-1)	>38 °C (100 °F)	210 °C (410 °F)
Kerosene	>38–72 °C (100–162 °F)	220 °C (428 °F)
Vegetable oil (canola)	327 °C (621 °F)	
Biodiesel	>130 °C (266 °F)	

[1] -Ultimate analysis
[2] -Heat value
[3] -HHV (higher heat value)
[4] -LHV (lower heat value)
[5] -Specific gravity
[6] -American Petroleum Institute
[7] -Flash point:maximum temperature at which a fuel can be handled safely
[8] -Auto-ignition temperature

۶-دمای ژله‌ای شدن[۱]: دمایی است که در آن، سوخت مایع شروع به انجماد و اصطلاحا ژله‌ای شدن می‌نماید. در این حالت پارافین موجود در سوخت شروع به انجماد می‌نماید و به صورت رسوب در قسمت‌های مختلف تجهیزات رسوب می‌نماید.

۷-آب و ناخالصی سوخت: آب و میزان رسوب و ناخالصی‌های دیگر در سوخت، باعث آلوده شدن آن و ایجاد تاثیرات نامناسب بر روی تجهیزات می‌شود. هرچه میزان این رسوبات بیشتر باشد، پتانسیل آسیب دیدگی تجهیزات انتقال و احتراق سوخت افزایش می‌یابد. این رسوبات معمولا شامل کلسیم، سدیم، پتاسیم، منیزیم، آهن، ترکیبات گوگرد و وانادیوم است.

۸-کربن باقیمانده[۲]: میزان کربن باقیمانده بعد از حرارت سوخت، در غیاب هوا را کربن باقی مانده گویند که میزان تمایل سوخت به کک شدن را نشان می‌دهد.

۱-۲ سوخت جامد

سوخت‌های جامد به دو دسته اصلی سوخت‌های طبیعی و سوخت‌های صنعتی تقسیم‌بندی می‌شوند. سوخت‌های طبیعی مانند چوب، زغال سنگ و غیره و سوخت‌های صنعتی مانند سوخت هسته ای، کک، زغال چوب و غیره می‌توان نام برد. از مزایای این سوخت‌ها می‌توان به ۱-حمل و نقل آسان ۲-ذخیره سازی آسان بدون خطر انفجار (به جز سوخت هسته ای) ۳-هزینه پایین تولید ۴-دمای احتراق متوسط (به جز سوخت هسته ای) نام برد. معایب اصلی این سوخت‌ها ۱-مقدار فراوان خاکستر (به جز سوخت هسته ای) ۲-مقدار بیشتر حرارت تولیدی از دست رفته ۳-کنترل دشوار احتراق آن ۴-هزینه بالای حمل و نقل (به جز سوخت هسته ای) نام برد. در این قسمت در گروه سوخت‌های جامد تنها به زغال سنگ پرداخته خواهد شد و از بقیه سوخت‌ها به دلیل مرسوم نبودن در استفاده در توربین گاز صرفه نظر می‌شود.

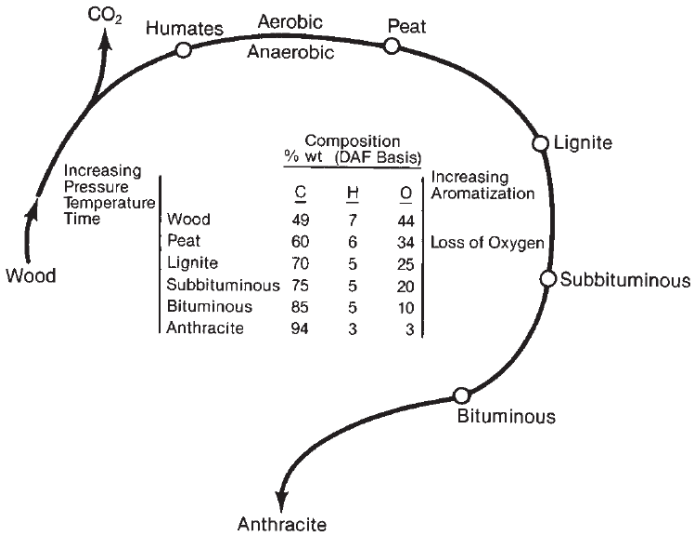
۱-۲-۱ زغال سنگ

این سوخت از تغییرات بیولوژیکی ناشی از افزایش فشار و بالا رفتن دما بر روی گیاهان از روزگاران بسیار دور و در دوره‌های مختلف زمین شناسی به وجود آمده است. به همین دلیل بسته به محل، زمان و شرایط، انواع مختلفی از آن در جهان وجود دارد. چرخه زیر میزان اکسیژن، کربن و هیدروژن موجود در روند تبدیل چوب به زغال سنگ را در دوره‌های مختلف آن نشان می‌دهد.

---

[۱]-حداقل دمایی که سوخت را می توان ذخیر نمود و در آن سوخت بر اثر نیروی گرانش می تواند جریان یابد.

2 -Carbon residue



شکل ۱-۴ چگونگی تشکیل انواع زغال سنگ ها [6]

جدول ۱-۳ زمان تشکیل سه دسته اصلی زغال سنگ‌ها و درصد کربن موجود در آنها [6]

Coal type	Approximate age (years)	Approximate carbon content, %
Lignites	60,000,000	65-72
Subbituminous coals	100,000,000	72-76
Bituminous coals	300,000,000	76-90
Anthracites	350,000,000	90-95

کربن موجود در زغال سنگ به صورت ترکیب‌های مختلف آلی از جمله اسیدهای کربوکسیلیک متراکم شده و به صورت ترکیبات آروماتیک با حلقه‌های ناجور (که علاوه بر کربن، شامل هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد نیز می‌باشند.) در آمده است. زغال‌سنگ به انواع مختلفی طبقه‌بندی می‌شود. در این طبقه‌بندی درصد کربن ثابت، درصد مواد فرار و دیگر خواص فیزیکی و شیمیایی مورد توجه قرار دارد. در جدول زیر تقسیم‌بندی انواع زغال سنگ‌ها براساس استاندارد ASTM D 388 آمده است. میزان پراکندگی انواع زغال سنگ‌های مختلف در جهان و زمینه مصرف آن متفاوت بوده و به طور کلی ۵۲ درصد زغال سنگ‌های دنیا را زغال سنگ قیری تشکیل می‌دهد. در شکل ۱-۵ می‌توان این تقسیم‌بندی را مشاهده کرد.

جدول ۱-۴ تقسیم‌بندی انواع زغال سنگ‌ها براساس استاندارد ASTM D 388

Class	Group	Fixed Carbon Limits, % (Dry, Mineral-Matter-Free Basis) Equal or Greater Than	Less Than	Volatile Matter Limits, % (Dry, Mineral-Matter-Free Basis) Greater Than	Equal or Less Than	Calorific Value Limits, Btu/lb (Moist,[b] Mineral-Matter-Free Basis) Equal or Greater Than	Less Than	Agglomerating Character
I. Anthracitic	1. Meta-anthracite	98	–	–	2	–	–	Nonagglomerating
	2. Anthracite	92	98	2	8	–	–	
	3. Semianthracite[c]	86	92	8	14	–	–	
II. Bituminous	1. Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	–	–	Commonly agglomerating[e]
	2. Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	–	–	
	3. High volatile A bituminous coal	–	69	31	–	14,000[d]	–	
	4. High volatile B bituminous coal	–	–	–	–	13,000[d]	14,000	
	5. High volatile C bituminous coal	–	–	–	–	11,500	13,000	
						10,500[e]	11,500	Agglomerating
III. Subbituminous	1. Subbituminous A coal	–	–	–	–	10,500	11,500	Nonagglomerating
	2. Subbituminous B coal	–	–	–	–	9,500	10,500	
	3. Subbituminous C coal	–	–	–	–	8,300	9,500	
IV. Lignitic	1. Lignite A	–	–	–	–	6,300	8,300	
	2. Lignite B	–	–	–	–	–	6,300	

a) تقسیم‌بندی فوق شامل تعداد کمی از زغال‌ها، که به طور کلی معمولا دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی غیر معمول هستند و در محدودیت‌های تعداد کربن ثابت یا ارزش حرارتی قیری فرار و شبه قیری مشترک است نمی‌شود. همه این زغال‌ها کمتر از ۴۸ درصد مواد خشک، معدنی، کربن ثابت و آزاد و یا بیشتر از ۱۵۵۰۰ Btu/lb ارزش حرارتی دارند.

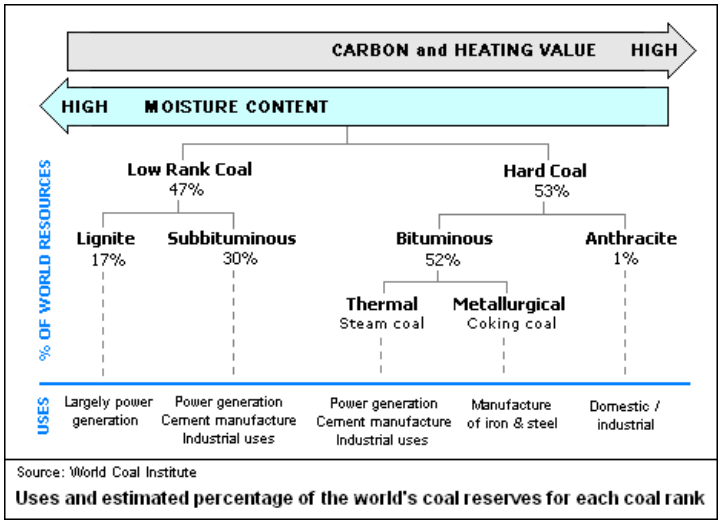
b) رطوبت اشاره شده در زغال شامل رطوبت چسبنده در درون زغال بوده و یک رطوبت قابل مشاهده در روی سطح زغال نیست

c) اگر فرایند متراکم شدن به دسته کم فرار کلاس زغال‌های غیری دسته بندی شود.

d) زغال‌های دارای بینش از ۶۹ درصد کربن ثابت بر اساس کربن ثابت آنها بدون توجه به ارزش حرارتی آنها دسته بندی می‌شوند

e) مشخص شده است ممکن است در این دسته از زغال‌های قیری، دسته‌هایی از زغال‌های غیر مترکم شده وجود داشته باشد و جز استثنا دسته زغال‌های قیری c با میزان فراریت بالا می‌باشد

از زغال سنگ به عنوان سوخت بیشتر در نیروگاه‌های بخاری و IGCC استفاده می‌گردد.



شکل ۱- ۵ تقسیم‌بندی انواع زغال سنگ‌ها و میزان ذخیره آن در جهان و موارد استفاده از آن [5]

۱-۱-۲-۱ زغال سنگ آنتراسیت[1] یا خالص

این نوع زغال سنگ‌ها دارای بیشترین مقدار کربن ثابت (بالای۸۶ درصد) و بالاترین ارزش حرارتی و کمترین مقدار مواد فرار را در بین انواع زغال سنگ‌ها دارند. به دلیل اینکه در تولید این زغال سنگ‌ها به فشار بسیار زیادی احتیاج است و نواحی با چنین ویژگی کمتر یافت می‌شود، این نوع زغال سنگ‌ها به ندرت یافت می‌شوند. گاهی به این زغال سنگ ها، زغال سنگ سخت[2] نیز گفته می‌شود. از آنجا که مواد فرار موجود در زغال سنگ به احتراق کمک می‌کنند، معمولا سوزاندن این نوع زغال‌ها دشوار است. از این نوع زغال سنگ‌ها بیشتر در تولید کک و صنایع فولاد سازی استفاده می‌کنند. فرمول تجربی این زغال سنگ‌ها به صورت $C_{240}H_{97}O_9NS$ بوده و به انواع زیر تقسیم می‌شود:

۱-متا آنتراسیت: دارای ٪۹۸ کربن ثابت و ٪۲ مواد فرار است و کارایی سوختی ندارد.
۲-آنتراسیت: دارای ٪۹۲ تا ٪۹۱ کربن ثابت و ٪۲ تا ٪۸ مواد فرار با رنگ خاکستری است و با شعله آبی کم رنگ کوتاه همراه با بو می‌سوزد.
۳-نیمه آنتراسیت:[3] دارای ٪۸۶ تا ٪۹۲ کربن ثابت و ٪۸ تا ٪۱۴ مواد فرار دارد. به دلیل افزایش درصد مواد فرار در آن، با شعله کوتاه زرد رنگ می‌سوزد و چون سریع‌تر از آنتراسیت می‌سوزد، دارای کارایی و مصرف سوختی بیشتری است.

۲-۱-۲-۱ زغال سنگ قیری[4]

زغال سنگ قیری دارای کربن ثابت بین ۴۶ تا ۸۶ درصد و بین ۲۰ تا ۴۰ درصد مواد فرار می‌باشند. این نوع زغال سنگ‌ها رایج‌ترین نوع مورد استفاده در نیروگاه‌ها است. ارزش حرارتی این نوع زغال سنگ‌ها کمتر از آنتراسیت‌ها و بیشتر از زغال سنگ نارس[5] و لیگنیت[6] می‌باشد. فرمول تجربی این نوع زغال سنگ‌ها به صورت $C_{137}H_{90}O_4NS$ خود به دسته‌های زیر تقسیم می‌شود.

۱- زغال سنگ قیری با فراریت کم: دارای ٪۸۶ تا ٪۷۸ کربن ثابت و ٪۱۴ تا٪۲۲ مواد فرار است و بدون دود می‌سوزد.
۲- زغال سنگ قیری با فراریت متوسط: دارای ٪۶۹ تا ٪۷۸ کربن ثابت و ٪۲۲ تا ٪۳۱ مواد فرار است، بدون دود می‌سوزد.
۳- زغال سنگ قیری با فراریت بالا: زغال سنگ‌های قیری زیر ٪۶۹ کربن ثابت و بیشتر از ٪۳۱مواد فرار است.

---

[1] -Anthracite
[2] -Hard coal
[3] -Semi- Anthracite
[4] -Bituminous
[5] -Peat
[6] -Lignite

۳-۱-۲-۱ زغال سنگ نارس

این نوع زغال سنگ نیز به سه دسته با توان گرمایی بین ۸,۸ تا ۱۲,۱ مگاژول تقسیم می‌شود و گاهی «لیگنیت سیاه» نیز نامیده می‌شود. در استاندارد ASTM D 388 این زغال سنگ‌ها به نام شبه قیری[1] آورده شده است که به سه نوع A,B وc دسته‌بندی شده اند.

۴-۱-۲-۱ زغال سنگ لیگنیت یا قهوه ای

این نوع زغال سنگ خود به دو گروه، یکی گروه لیگنیتی و دیگری، گروه زغال سنگ قهوه‌ای تقسیم می‌شود. خواص فیزیکی و شیمیایی و حتی رنگ هر دو گروه خیلی به هم نزدیک است. به طوری که ممکن است به اشتباه یکی به جای دیگری گرفته شود. توان گرمایی لیگنیت‌ها کمتر از ۸,۸ مگاژول است و از انواع دیگر، آلودگی بیشتری را منتشر می‌کنند. در جدول زیر تقسیم‌بندی انواع زغال سنگ‌ها در دو استاندارد DIN و ASTM آورده شده است.

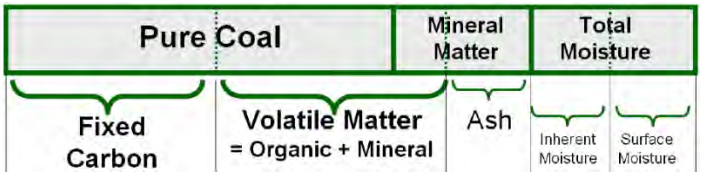
جدول ۱- ۵ تقسیم‌بندی انواع زغال سنگ‌ها براساس دو استاندار ASTM و DIN و ارزش حرارتی آن‌ها (a.f=ash-free ,d.a.f=dry ash-free)[8]

Coal Types and Peat					Total Water Content (%)	Energy Content a.f.* (kJ/kg)	Volatiles d.a.f.** (%)	Vitrinite Reflection in oil (%)
UNECE	USA (ASTM)	Germany (DIN)						
Peat	Peat	Torf						
Ortho-Lignite	Lignite	Weichbraunkohle			75	6,700		
Meta-Lignite		Mattbraunkohle			35	16,500		0.3
Sub-bituminous Coal	Sub-bituminous Coal	Glanzbraunkohle			25	19,000		0.45
Bituminous Coal	High Volatile Bituminous Coal	Flammkohle	Steinkohle	Hartkohle	10	25,000	45	0.65
		Gasflammkohle					40	0.75
		Gaskohle					35	1.0
	Medium Volatile Bituminous Coal	Fettkohle			36,000 Hard Coking Coal		28	1.2
	Low Volatile Bituminous Coal	Eßkohle					19	1.6
		Magerkohle					14	1.9
Anthracite	Semi-Anthracite				3	36,000	10	2.2
	Anthracite	Anthrazit						

[1] -Sub-bituminous

۵-۱-۲-۱ ترکیبات شیمیایی زغال سنگ

به طور کلی ترکیبات موجود در زغال سنگ‌ها بر طبق نوع، محیط و شرایط ایجاد آن متفاوت است. تقسیم‌بندی کلی این موضوع بر اساس میزان کربن ثابت و مواد فرار آن در قسمت قبل انجام گردید ولی میزان ترکیبات معدنی، خاکستر و سولفور موجود در آنها متفاوت است که در این قسمت به طور مختصر به آن پرداخته خواهد شد. شکل بعدی دسته‌بندی ترکیبات و عناصر موجود در زغال سنگ‌ها را نشان می‌دهد.



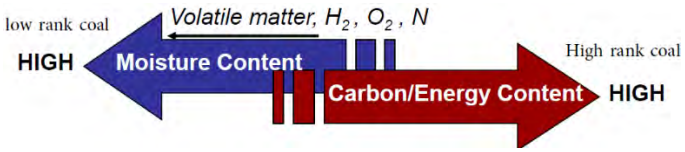
شکل ۱- ۶ دسته‌بندی ترکیبات و عناصر موجود در زغال سنگ‌ها [5]

جدول زیر میزان ترکیبات و عناصر مختلف در هر دسته از زغال سنگ‌ها را نشان می‌دهد. توجه شود این تقسیم‌بندی کلی بوده و ممکن است این مقدار در مراجع و تقسیم بندی‌های مختلف تا حدودی تغییر نماید. به عنوان مثال ممکن است در منابع دیگر میزان سولفور در زغال سنگ قیری تا ۷ درصد نیز ذکر شده باشد. در نیروگاه‌ها مهمترین آیتم در تعیین کیفیت زغال سنگ میزان سولفور و خاکستر موجود در آن است که باعث ایجاد خوردگی در قسمت انتهایی و اکونومایزرهای بویلر و گرفتگی سطوح حرارتی و همچنین آسیب به بدنه گازی سازها در نیروگاه IGCC خواهد شد.

جدول ۱- ۶ آنالیز رایج زغال سنگ‌های مختلف [5]

% weight	Anthracite	Bituminous	Sub-Bituminous	Lignite
Heat Content (Btu/lb)	13,000-15,000	11,000-15,000	8,500-13,000	4,000-8,300
Moisture	< 15%	2 - 15%	10 - 45%	30 - 60%
Fixed Carbon	85 - 98%	45 - 85%	35 - 45%	25 - 35%
Ash	10 - 20%	3 - 12%	≤ 10%	10 - 50%
Sulfur	0.6 - 0.8%	0.7 – 4.0%	< 2%	0.4 – 1.0%
Chlorine (ppm)	340 ± 40ppm	340 ± ppm	120 ± 20ppm	120 ± 20ppm

زغال سنگ را بر اساس میزان کربن و ارزش حرارتی آن نیز تقسیم‌بندی می‌کنند. هرچه میزان کربن و ارزش حرارتی آن بالاتر باشد دارای مرتبه[1] بالاتری خواهد بود.



شکل ۱- ۷ دسته‌بندی ترکیبات و عناصر موجود در زغال سنگ‌ها [2]

۳-۱ سوخت مایع

سوخت‌های مایع یکی از اصلی‌ترین منابع تامین انرژی در جهان می‌باشند. این سوخت‌ها نیز به دو دسته طبیعی و صنعتی تقسیم می‌شوند. از مزایای سوخت مایع می‌توان موارد زیر را نام برد ۱- با هزینه نسبتاً کم و به سادگی می‌توان آنها را به مراکز مصرف حمل کرد ۲- پس از احتراق، خاکستر چندانی از خود بر جای نمی‌گذارند و بر خلاف سوخت‌های جامد تولید غبار نمی‌کنند ۳- کنترل احتراق آنها آسان است و با کم و زیاد کردن جریان سوخت می‌توان گرمای حاصل از احتراق را افزایش یا کاهش داد ۴- ارزش گرمایی آنها زیاد است و می‌توان در حجم کم، مقدار زیادی انرژی ذخیره کرد ۵ - می‌توان سوخت‌های مایع را در محوطه‌ای دور از مصرف و به صورت‌های مختلف ذخیره کرد ۶- خود به خود مشتعل نمی‌شوند. معایب اصلی این دسته از سوخت‌ها عبارتند از ۱- ذخیره کردن مقادیر زیاد سوخت، احتمال بروز آتش سوزی را در پی دارد ۲- مقدار گوگرد در اغلب سوخت‌های مایع زیاد است و خطر آلودگی هوا و خوردگی تجهیزات محفظه احتراق وجود دارد ۳- قیمت سوخت‌های مایع از سوخت‌های جامد بالاتر است. بر اساس استاندارد ASTM D 396 سوخت‌های مایع را می‌توان به شش دسته تقسیم‌بندی کرد. این تقسیم‌بندی از شماره ۱ شروع شده و با افزایش شماره آن سوخت نیز سنگین‌تر و ویسکوزتر می‌شود. جدول ۱-۷ تقسیم‌بندی سوخت‌های مختلف در استاندارد ASTM D 396 را نشان می‌دهد. در این تقسیم‌بندی سبک‌ترین سوخت‌های مایع در ردیف اول قرار می‌گیرند و مناسب مشعل‌های با سیستم تبخیری هستند. میزان سولفور این دسته حداکثر نیم درصد است. در ردیف دوم سوخت‌هایی قرار می‌گیرند که بیشتر برای گرمایش ساختمان‌های مسکونی استفاده می‌شوند. سوخت گازوئیل در این دسته از سوخت‌ها قرار می‌گیرند. میزان سولفور در این دسته از سوخت‌ها حداکثر ۰٫۷درصد است. سوخت‌های شماره چهار از دو دسته قبلی سنگین‌تر هستند ولی احتراق و جابه‌جایی این سوخت‌ها به پیش گرمایش احتیاج ندارند. در دسته پنجم سوخت‌هایی قرار می‌گیرند که بسته به شرایط آب و هوایی و تجهیزات برای انتقال و جابه جایی و احتراق سوخت ممکن است به پیش گرمایش سوخت احتیاج باشد. سوخت‌های دسته ششم سنگین‌ترین

[1] -Rank

سوخت‌ها هستند و برای احتراق و حمل و نقل آن حتما به پیش گرمایش احتیاج است. میزان سولفور به جز دو دسته اول و دوم در بقیه موارد محدودیتی ندارد.

جدول ۱– ۷ تقسیم‌بندی سوخت مایع براساس استاندارد ASTM D 396

NO.5 (سبک) ممکن است یک پیش گرم بسته به شرایط آب و هوایی احتیاج داشته باشد

NO.5 (سنگین) ممکن است یک پیش گرم برای مشعل در شرایط آب و هوایی سرد یا انتقال احتیاج داشته باشد.

NO.6 پیش گرم برای انتقال و احتراق در مشعل نیاز دارد

NO.1 سوخت های تقطیر شده تمایل دارند در مشعل های **Pot –type** تبخیر شوند و اکثر مشعل ها به این نوع از سوخت احتیاج دارند

NO.2 سوخت تبخیر شده برای اهداف کلی مانند گرمایش منازل و استفاده در مشعل هایی که به سوخت **NO.1** نیاز ندارد.

NO.4 در این سوخت ها معمولا پیش گرمایش برای انتقال یا مصرف در مشعل ها نیز ندارد

Grade of Fuel Oil[b]	Flash Point, F (C)	Pour Point, F (C)	Water and Sediment, % by vol	Carbon Residue on 10% Bottoms, %	Ash % by wt	Distillation Temperatures, F (C)			Saybolt Viscosity, s				Kinematic Viscosity, centistokes				Gravity, deg API	Copper Strip Corrosion
						10% Point	90% Point		Universal at 100F (38C)		Furol at 122F (50C)		At 100F (38C)		At 122F (50C)			
	Min	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
No. 1	100 or legal (38)	0	trace	0.15	—	420 (216)	—	550 (288)	—	—	—	—	1.4	2.2	—	—	35	No. 3
No. 2	100 or legal (38)	20[c] (-7)	0.10	0.35	—	[d]	540[c] (282)	640 (338)	(32.6)[f]	(37.93)	—	—	2.0[e]	3.6	—	—	30	—
No. 4	130 or legal (55)	20 (-7)	0.50	—	0.10	—	—	—	45	125	—	—	(5.8)	(26.4)	—	—	—	—
No. 5 (Light)	130 or legal (55)	—	1.00	—	0.10	—	—	—	150	300	—	—	(32)	(65)	—	—	—	—
No. 5 (Heavy)	130 or legal (55)	—	1.00	—	0.10	—	—	—	350	750	(23)	(40)	(75)	(162)	(42)	(81)	—	—
No. 6	150 (65)	—	2.00[g]	—	—	—	—	—	(900)	(9000)	45	300	—	—	(92)	(638)	—	—

توجه:

a. لازم است سطح سولفور برای فرایندهای مانند عملیات حرارتی، مواد غیر آهنی، شیشه و کوره های سرامیکی و دیگر کاربردهای ویژه مشخص گردد. میزان سولفور و محدوده مجاز آن بر هر دسته از سوخت ها به صورت زیر است:

گرید سوخت	حداکثر میزان سولفور ٪
N0.1	0.5
N0.2	0.7
N0.4	no limit
N0.5	no limit
N0.6	no limit

دیگر محدودیت های سولفور ممکن است در قراردادهای دوجانبه بین خریدار و فروشنده مشخص شود.

b. در تقسیم بندی جدول این هدف وجود دارد که هرگونه انحراف از نیازمندی های اعلام شده از گرید داده شده به معنی جا داده شدن سوخت در گرید پایین تر نمی باشد مگر اینکه در واقع این سوخت همه نیازمندی های گرید پایین تر را بر آورده کند.

c. نقطه ژله ای شدن بالاتر یا پایین تر برای شرایط ذخیره یا استفاده مشخص گردد.

d. ۱۰ درصد از دمای نقطه تقطیر در دمای حداکثر ۲۲۶ درجه سانتی گراد ممکن است در مشعل های پاششی اتمیزر استفاده شود.

e. هنگامی که دمای ژله ای شدن زیر صفر درجه فارنهایت باشد، ویسکوزیته حداقل باید ۱،۸ سانتی استوک باشد و حداقل ۹۰ درصد نقطه چشم پوشی شود.

f. مقادیر ویسکوزیته در پرانتز برای اطلاع بوده و یک محدوده ضروری نمی باشد.

g. میزان آب حاصل از تقطیر بعلاوه آب ته نشیت و تخلیه شده نباید بالای ۲ درصد باشد. میزان آب ته نشین شده و تخلیه شده نباید بالای نیم درصد باشد

منبع **ASTM D 396**

در میان سوخت‌های مایع، از آنجا که نفت خام منشا اصلی دیگر سوخت‌های فسیلی می‌باشد در این قسمت به طور خلاصه بررسی می‌شود و در ادامه به سوخت‌های مایعی که در توربین‌ها مصرف می‌شود پرداخته خواهد شد. جدول ۱–۸ به طور خلاصه محصولات هیدروکربنی مورد استفاده در نیروگاه‌ها و مشخصات فیزیکی آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ۸ محصولات هیدروکربنی حاصل از تقطیر نفت خام[1] [2]

Product	Lower Carbon Limit	Upper Carbon Limit	Lower Boiling Point °C	Upper Boiling Point °C	Lower Boiling Point °F	Upper Boiling Point °F
Refinery gas	C_1	C_4	−161	−1	−259	31
Liquefied petroleum gas	C_3	C_4	−42	−1	−44	31
Naphtha	C_5	C_{17}	36	302	97	575
Gasoline	C_4	C_{12}	−1	216	31	421
Kerosene/diesel fuel	C_8	C_{18}	126	258	302	575
Aviation turbine fuel	C_8	C_{16}	126	287	302	548
Fuel oil	C_{12}	$>C_{20}$	216	421	>343	>649
Lubricating oil	$>C_{20}$		>343		>649	
Wax	C_{17}	$>C_{20}$	302	>343	575	>649
Asphalt	$>C_{20}$		>343		>649	
Coke	$>C_{50}$*		>1000*		>1832*	

۱-۳-۱ نفت خام

نفت خام تنها سوخت مایع طبیعی است و بقیه سوخت‌های مایع از این ماده مشتق می‌گردند. نفت خام در حالت طبیعی به صورت مایع غلیظ بوده و رنگ آن قهوه‌ای زرد مایل به سیاه، قهوه‌ای سیر یا سبز تیره‌است و در برابر نور، انعکاس سبز رنگ به‌خصوصی از خود نشان می‌دهد. نفت خام به جهت وجود ترکیبات گوگرد بوی نامطلوبی دارد. بخش اعظم نفت خام از هیدرات‌های کربن تشکیل شده و مقدار کمی عناصر دیگر نیز در آن مخلوط است. نفت، مایع افروختنی است که در لایه‌های بالایی بخش‌هایی از پوسته کره زمین یافت می‌شود و شامل آمیزه پیچیده‌ای بیش از ۳۰۰۰ هیدروکربن گوناگون است. بیشتر این هیدروکربن‌ها از زنجیره آلکان هستند ولی ممکن است از دید ظاهر، ترکیب یا خلوص، تفاوت‌های زیادی داشته باشند. زمان تشکیل این ماده به ۱ تا ۶۰ میلیون سال قبل باز می‌گردد و احتمالا منشا ارگانیکی[2] داشته است. این سوخت به طور متوسط دارای ۷۹,۵ تا ۸۷,۱ درصد وزنی کربن و ۱۰ تا ۱۴,۸ درصد وزنی هیدروژن و ۰.۱ تا ۸ درصد وزنی گوگرد و ۰.۱ تا ۴ درصد وزنی اکسیژن و نیتروژن می‌باشد. تقسیم‌بندی نفت خام متفاوت بوده و معمولا بر اساس تعیین چهار ویژگی

[1] -Crude oil
[2] -Organic

فیزیوشیمی: ۱-چگالی و گرانروی[1] ۲-میزان سولفور[2] ۳-میزان رزین[3] و قیرهای معدنی[4] موجود در آن ۴-میزان پارافین[5] آن تقسیم‌بندی می‌شود. جدول زیر خلاصه‌ای از محدوده ترکیبات مختلف در نفت خام را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ۹ محدوده ترکیبات مختلف و متوسط آن در نفت خام (در خصوص زنجیره هیدروکربنی ترکیبات فوق به مراجع مربوطه مراجعه گردد) [2]

Composition by weight		Hydrocarbon	Average	Range
Element	**Percent range**	Paraffins	30%	15 to 60%
Carbon	79 to 87%			
Hydrogen	10 to 14.8%	Naphthenes	49%	30 to 60%
Nitrogen	.1 to 2%			
Oxygen	.05 to 1.5%	Aromatics	15%	3 to 30%
Sulfur	.01 to 8%			
Metals	.1%	Asphaltics	6%	----------

در صنایع نفتی حداقل دمایی که سیال قابلیت جاری شدن در شرایط تست را داشته باشد به عنوان دمای ریزش[6] شناخته می‌شود. دمای ریزش نشان دهنده میزان پارافین موجود در سیال می‌باشد. هر چه میزان پارافین در محصولات نفتی بیشتر باشد دارای دمای ریزش بالاتر بوده و پمپاژ آن در دماهای پایین‌تر مشکل خواهد شد. گوگرد موجود در محصولات نفتی یکی از مهمترین پارامترها در تقسیم‌بندی نفت خام است. وجود گوگرد در نفت خام باعث ایجاد حالت اسیدی و تشکیل اسید سولفوریک شده و باعث خوردگی اسیدی نواحی در تماس خواهد شد. میزان سولفور موجود در نفت خام به طور کلی به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود.

جدول ۱- ۱۰ تقسیم‌بندی نفت خام بر اساس میزان سولفور

نفت ترش[7]	نفت نیمه شیرین[8]	نفت شیرین[9]
۰.۸– ۵ درصد وزنی	**۰.۵–تا ۰.۸ درصد وزنی**	**۰.۱–۰.۵ درصد وزنی**

[1] -Gravity
[2] -Sulfur content
[3] -Resin
[4]- Asphalts group
[5] -Paraffines
[6] -Pour point
[7] -Sour crude oil
[8] -Semi-sweet crude oil
[9] -Sweet crude oil

در صنایع نفتی به جای چگالی از پارامتر وزن مخصوص استفاده می‌کنند. این میزان بین ۸۲. برای تولیدات سبک تا ۱ برای تولیدات سنگین متغیر است. در استاندارد API میزان گرانروی از ۴۱ برای تولیدات سبک تا ۱۰ برای تولیدات بسیار سنگین متغیر می‌باشد. بر اساس استاندارد API تقسیم‌بندی نفت خام بر اساس میزان گرانروی به صورت زیر است.

جدول ۱- ۱۱ تقسیم‌بندی نفت خام بر اساس میزان گرانروی

نفت سنگین	نفت متوسط	نفت سبک
۱۲ تا ۲۸ درجه API	**۲۸ تا ۳۸ درجه API**	**۳۸ تا ۴۸ درجه API**

خاکستر موجود در نفت خام نیز به صورت نمک‌های فلزی ثابت مانند اکسید فلزات و اکسیدهای سیلیس در آن مشاهده می‌شود. به طور کلی استفاده از سوخت گاز طبیعی در مصرف کننده‌های بزرگ مانند نیروگاه بهترین و مناسب‌ترین گزینه می‌باشد ولی به دلایلی خاص مانند در دسترس بودن منبع گاز طبیعی و یا ارزان بودن سوخت‌های سنگین ممکن است بعضی از مصرف کننده‌ها به سمت استفاده از سوخت مایع سبک یا سنگین بروند. در زیر به طور خلاصه قیمت سوخت‌های مختلف در بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ جهت مقایسه آورده شده است.

جدول ۱- ۱۲ مقایسه قیمت سوخت‌های مختلف بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ [2]

Approximate fuel price comparison $/million Btu			
	2004 avg	2005 avg	2006 avg
No.2 distilate	8.1	12	15.1
No.6 distilate	4.4	6.6	8.0
Price ratio No.2/No.6	1.8	1.8	1.9
Natural gas	6.1	8.6	7.2
Crud oil	2.9	4.1	5.3
coal	1.3	1.5	1.6

توجه:

۱. **قیمت‌های سوخت گازوئیل و مازوت بر اساس میانگین قیمت در رفرنس‌های مختلف می‌باشد.**
۲. **قیمت گاز طبیعی نیز بر اساس قیمت میانگین جهانی می‌باشد .**
۳. **قیمت نفت خام بر اساس قیمت WTI قیمت نفت برنت می‌باشد**

همان طور که قبلا نیز بیان گردید سوخت‌های فسیلی بر اساس شرایط و محیط تشکیل آن دارای ترکیبات و عناصر مختلفی است. در زیر به طور خلاصه آنالیز نفت خام سبک و سنگین ایران و چهار ناحیه مختلف دیگر دنیا جهت مقایسه آورده شده است. بر این اساس حداکثر میزان سولفور در نفت خام سنگین ایران در حدود ۲ درصد و در نفت سبک ایران در حدود ۱,۳۶ درصد است. برای مقایسه میزان ترش بودن نفت خام سبک و سنگین ایران می‌توان به داده‌های جدول ۱- ۱۳ مراجعه نمود.

جدول ۱- ۱۳ مشخصات نفت خام سنگین ایران (مرجع شرکت ملی نفت)

GENERAL DATA			
SPECIFICATION		RESULT	TEST METHOO
SPECIFIC GRAVITY @ 15.56/15.56 °C		0.8789	ASTM D-4052
API		29.5	" D-1298
SULPHUR CONTENT (Total)	Wt%	1.99	" D-2622
** H2S CONTENT	PPM	80	RIPI
NITROGEN CONTENT (Total)	Wt%	0.25	ASTM D-4629
BASE SEDIMENT & WATER	Vol%	TRACE < 0.05	" D-1796
WATER CONTENT	Vol%	TRACE < 0.05	" D-4006
SALT CONTENT	P.T.B	16.0	" D-3230
KINEMATIC VISCOSITY @10 °C	*mm^2/Sec	29.42	" D-445
" " @20 °C	*mm^2/Sec	21.50	" D-445
" " @40 °C	*mm^2/Sec	16.56	" D-445
POUR POINT	°C	-8	" D-5853
** R.V.P.	PSI	8.10	" D-323
ASPHALTENES	Wt%	3.90	IP-143
WAX- CONTENT	Wt%	6.0	BP-237
DROP MELTING POINT OF WAX	°C	56	IP-133
CARBON RESIDUE CONRADSON	Wt%	5.96	ASTM D-189
ACIDITY, TOTAL	mgKOH/gr	0.18	UOP-565
NICKEL CONTENT	PPM	23.0	UOP-800
VANADIUM CONTENT	PPM	90.0	UOP-800
IRON CONTENT	PPM	4.5	UOP-800
LEAD CONTENT	PPM	< 1.0	UOP-391
SODIUM CONTENT	PPM	20.0	UOP-391

* Equal to c.St. ** Tested on site

DATE : July 2007

WORKED BY : CRUDE EVALUATION GROUP
APPROVED BY : H. TALACHI

جدول ۱- ۱۴ مشخصات نفت خام سبک ایران (مرجع شرکت ملی نفت)

GENERAL DATA			
SPECIFICATION		RESULT	TEST METHOO
SPECIFIC GRAVITY @ 15.56/15.56 °C		0.8579	ASTM D-4052
API		33.4	" D-1298
SULPHUR CONTENT (Total)	Wt%	1.36	" D-2622
** H2S CONTENT	PPM	50	RIPI
NITROGEN CONTENT (Total)	Wt%	0.26	ASTM D-4629
BASE SEDIMENT & WATER	Vol%	TRACE < 0.05	" D-1796
WATER CONTENT	Vol%	TRACE < 0.05	" D-4006
SALT CONTENT	P.T.B	16.0	" D-3230
KINEMATIC VISCOSITY @10 °C	*mm^2/Sec	15.97	" D-445
" " @20 °C	*mm^2/Sec	10.43	" D-445
" " @40 °C	*mm^2/Sec	5.838	" D-445
POUR POINT	°C	-8	" D-5853
** R.V.P.	PSI	8.90	" D-323
ASPHALTENES	Wt%	1.45	IP-143
WAX- CONTENT	Wt%	5.7	BP-237
DROP MELTING POINT OF WAX	°C	57	IP-133
CARBON RESIDUE CONRADSON	Wt%	3.67	ASTM D-189
ACIDITY, TOTAL	mgKOH/gr	0.11	UOP-565
NICKEL CONTENT	PPM	11.0	UOP-800
VANADIUM CONTENT	PPM	44.0	UOP-800
IRON CONTENT	PPM	< 2.0	UOP-800
LEAD CONTENT	PPM	< 1.0	UOP-391
SODIUM CONTENT	PPM	30.0	UOP-391

* Equal to c.St. ** Tested on site

DATE : June 2007

WORKED BY : CRUDE EVALUATION GROUP
APPROVED BY : H. TALACHI

جدول ۱- ۱۵ مشخصات نمونه نفت خام در چهار ناحیه مختلف دنیا [2]

	Arab Extra Light*	Alameen Egypt	Arab Heavy	Bakr-9 Egypt
Gravity, °API	38.5	33.4	28.0	20.9
Carbon residue (wt %)	2.0	5.1	6.8	11.7
Sulfur content (wt %)	1.1	0.86	2.8	3.8
Nitrogen content (wt %)	0.04	0.12	0.15	—
Ash content (wt %)	0.002	0.004	0.012	0.04
Iron (ppm)	0.4	0.0	1.0	—
Nickel (ppm)	0.6	0.0	9.0	108
Vanadium (ppm)	2.2	15	40.0	150
Pour point (°F)	≈Zero	35	−11.0	55
Paraffin wax content (wt %)	—	3.3	—	—

** Ali, M. F et al., Hydrocarbon Processing, Vol. 64, No. 2, 1985 p. 83.*

در توربین‌ها و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی میزان عناصر فلزی یکی از پارامترهای مهم در خوردگی داغ پره‌های توربین و نازل‌های مشعل و لوله‌های بویلر است. مقدار این عناصر مانند کلسیم، سدیم، منیزیم، آلومینیوم، آهن، وانادیوم و نیکل یکی از پارامترهای مهم در آنالیز سوخت‌های ارائه شده در نیروگاه‌ها می‌باشد. به عنوان مثال جدول زیر محدوده مجاز آلاینده‌های موجود در سوخت توربین گاز V94.2 زیمنس را نشان می‌دهد. چنانچه سوخت ورودی در محدوده مجاز نباشد می‌بایست از سیستم‌های تصفیه سوخت استفاده شود. تصفیه سوخت معمولا به روش‌های مختلف و در پالایشگاه‌های نفت به صورت کلان صورت می‌گیرد. چنانچه مشخصات سوخت تحویلی از پالایشگاه در ورودی نیروگاه خارج از محدوده مجاز باشد از سیستم‌های تصفیه و شستشوی سوخت که در انتهای همین فصل آورده شده است استفاده می‌شود.

جدول ۱- ۱۶ محدوده مجاز آلاینده‌های موجود در سوخت توربین گاز V94.2 زیمنس [8]

No	contaminant	Determined as per	UNIT	Upper limit	Effect if limit is exceeded
1	Vanadium	Din 51 790 ASTM D3605	ppm(w/w)	0.5	Corrosion of hot gas path components
2	Sodium+Potassium	DIN 51 797 ASTM D 3605	ppm(w/w)	0.5	Corrosion of hot gas path components when the vanadium content of the fuel exceeds 50 ppm and the inhibitor is used (Mg/V=3:1) the upper limit of sodium + potassium is extended to 1 ppm
3	lead	ASTM D 3605	ppm(w/w)	1	Corrosion of hot gas path components. Prevention of additive effect in the case of vanadium
4	Calcium	ASTM D 3605	ppm(w/w)	10	Deposits on turbine blades
5	ash	DIN 51 575 ASTM D 482	ppm(w/w)	100	Deposits on turbine blades (when using the inhibitor according to the recommended dosing ratio the ash produced is of course higher)

جهت اطلاع از محدوده مجاز آلاینده‌ها در سوخت توربین گاز می‌توان به استاندارد ASTM 2880 مراجعه نمود که در ادامه همین فصل، در جدول ۱-۳۰ این محدوده مجاز برای تعدادی از آلاینده‌ها آورده شده است. میزان نمک[1] موجود در نفت خام نیز یکی از پارامترهای مهم در نفت خام می‌باشد. در صنایع نفتی نمک باعث گرفتگی مبدل‌ها و در صنایع نیروگاهی باعث خوردگی داغ در محفظه‌های احتراق و پره‌های توربین گاز می‌شود. در صنایع نفتی چنانچه میزان نمک از ۰.۱ پوند در هر بشکه بیشتر شوند می‌بایست از فرایندهای جداسازی نمک برای جلوگیری از گرفتگی در مبدل‌ها استفاده شود. در واقع در توربین‌های گاز احتمال خوردگی داغ به دلیل وجود نمک در حالت سوخت مایع سبک بیشتر از حالت سوخت سنگین است. زیرا در حالت سوخت سنگین، به دلیل پیش بینی رسوب خاکستر بر روی پره‌ها و خوردگی داغ، از یک پوشش محافظ برای جلوگیری از خوردگی داغ بر روی پره‌های توربین استفاده می‌شود ولی در حالت سوخت‌های مایع سبک، معمولا به دلیل فرض پاک بودن سوخت، این لایه محافظ ایجاد نمی‌شود. از آنجا که احتمال رسوخ ترکیبات نمک به خصوص سدیم و پتاسیم در هنگام انتقال سوخت از دریا بسیار وجود دارد و با توجه به محدوده ppm ۰,۱ تا ۱ ترکیبات فلزات قلیایی[2] مانند سدیم و پتاسیم در سوخت توربین گاز، نباید هیچ گونه ورود آب دریا به سوخت وجود داشته باشد. به عنوان مثال وارد شدن ۸ گالن آب دریا در یک میلیون گالن سوخت سبک باعث می‌شود که میزان سدیم بعلاوه پتاسیم سوخت به ppm ۰,۱۱ برسد. همچنین اثر وجود ذرات نمک در هوای ورودی به توربین گاز در نواحی ساحلی و سکوهای دریایی دقیقا مانند حالت سوخت، باعث ایجاد خوردگی داغ در توربین خواهد شد و نصب فیلترها جهت جلوگیری از این پدیده بسته به میزان این نمک‌ها در هوای ورودی می‌تواند الزامی باشد. در خصوص سیستم فیلتراسیون هوا و روش‌های فیلتر کردن نمک‌های موجود در هوا در فصل‌های بعدی صحبت خواهد شد.

همچنین وجود ترکیبات سرب و روی در سوخت مایع باعث ایجاد خوردگی داغ در توربین گاز خواهد شد. البته این ترکیبات، مواد رایج در سوخت مایع نیستند ولی ممکن است به دلیل تماس با بنزین سرب دار یا تجهیزات گالوانیزه در مسیر انتقال، وارد سوخت شوند. به عنوان مثال مخلوط شدن ۳۳ گالن بنزین سرب دار در ۱۰۰۰۰ گالن سوخت مایع باعث افزایش میزان سرب سوخت مایع در حدود ppm ۱,۰۳ می‌شود. از آنجا که در توربین‌های گاز به طور متوسط حد مجاز وجود سرب در سوخت بین ppm ۰,۵ تا ۱ است می‌توان به اهمیت وجود این فلزات در سوخت پی برد. در فصل پوشش‌های حرارتی، به طور مبسوط به مکانیزم‌های خوردگی فلزات قلیایی موجود در سوخت و نحوه تخریب آنها پرداخته خواهد شد.

[1] -NaCl
[2] -Alkali metals

۲-۳-۱ سوخت سنگین[1] یا مازوت[2]

سوخت سنگین ترکیبی از پسماند برج‌های تقطیر و فرایندهای شکست مولکولی در پالایشگاه‌های نفت خام است. این مواد پسماند به صورت سیالات بسیار ویسکوز بوده و برای احتراق و انبار کردن نیازمند حرارت و پیش گرمایش است (جزو دسته سوخت‌های شماره ۶ قرار می‌گیرند) و بیشتر به عنوان سوخت صنایع نیروگاهی، کشتی‌ها، موتورهای دیزل و کوره‌ها استفاده می‌شود. برای اینکه بتوان این پسماندهای سنگین را به راحتی پمپاژ و ذخیره نمود آن را با مقداری گازوئیل و سوخت سبک‌تر مخلوط می‌کنند تا ویسکوزیته آن کاهش یابد. سوخت سنگین را معمولا بر اساس میزان ویسکوزیته آن تقسیم‌بندی می‌کنند. در جدول زیر این تقسیم‌بندی نشان داده شده است.

جدول ۱- ۱۷ تقسیم‌بندی سوخت سنگین بر اساس ویسکوزیته آن و مقدار چگالی و درصد نوع ترکیبات موجود در آن[3][9]

Sub-categories / Naming	IFO grades	Density (kg/l)	Distillate ("flux") (Vol%)	Heavy residue (Vol%)
Marine diesel	-	0.84	100	<5
Light Fuel Oil (LFO)	IFO 30	0.93	35 - 40	60 - 65
Medium Fuel Oil (MFO) (e.g.*John R, Sonatra*, Norway)	IFO 80	0.93 – 0.96	18 - 30	70 - 80
	IFO 180	0.94 – 0.97	5 - 20	80 - 92
Heavy Fuel Oils (HFO) (e.g. *Baltic Carrier/ Fu Shan Hai, Rocknes*)	IFO 240	0.96 – 0.98	3 - 12	90 - 95
	IFO 380	0.97 - 0.99	0 - 10	90 - 100
Very Heavy Fuel Oils (VHFO / LAPIO) *Erika/Prestige*	IFO 460 - 650	1.0 – 1.05	0 - 10	90 - 100

سوخت‌هایی که در نیروگاه‌ها معمولا مورد استفاده قرار می‌گیرد دو دسته آخر این جدول هستند. ترکیب سوخت مازوت بسیار وابسته به ترکیب‌بندی و آرایش پالایشگاه و نفت خامی است که در آن پالایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد به عنوان مثال چنانچه در نفت خام مصرفی پالایشگاه میزان پارافین زیاد باشد سوخت سنگین پالایشگاه مذکور نیز دارای درصد زیادی از پارافین خواهد بود و در نتیجه دمای ریزش بالاتری نیز خواهد داشت. ولی در حالت کلی این سوخت شامل مخلوطی از زنجیره مولکولی سنگین هیدروکربنی است که در دمای بین ۳۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد به جوش می‌آیند. در این سوخت هیدروکربن‌هایی از C_{20} تا C_{50} قابل مشاهده است.

---

[1] -Heavy Fuel Oil (HFO)

[2] -Mazut

[3]- سوخت با گرید متوسط یا Intermediate Fuel Oil (IFO) که ویسکوزیته در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد به عنوان یک شاخص برای امکان انتقال توسط پمپ یا ذخیر سازی آن شناخته می شود. به عنوان مثال IFO-180 به معنی ویسکوزیته ۱۸۰ سانتی استوک در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد است

البته به غیر از هیدروکربن ترکیباتی مانند سولفور، نیتروژن، اکسیژن و انواع فلزات مانند وانادیوم، سدیم، پتاسیم، نیکل، آهن، آلومینیوم و کلسیم و غیره نیز مشاهده می‌شود. در زیر محدوده ترکیبات مختلف در مازوت و آنالیز نمونه آن آورده شده است. در ایران آنالیز سوخت سنگین بسته به پالایشگاه تولید کننده آن دارای آنالیزهای متفاوت است. این آنالیز برای مازوت تولیدی پالایشگاه‌های مختلف کشور در جدول صفحه بعد آورده شده است. بر اساس جدول زیر حداکثر میزان سولفور در مازوت تولیدی پالایشگاه‌های ایران ۳ درصد گزارش شده است. میزان وانادیوم و فلزات معدنی و خاکستر موجود در سوخت از دیگر پارامترهای مهم در سوخت است که می‌بایست مورد توجه قرار گرفته و با محدودیت‌های اعلام شده در تجهیزات نیروگاهی مطابقت داده شود. استفاده از سوخت سنگین به طور معمول در توربین‌های گاز کلاس F و بالاتر مجاز نبوده ولی امکان استفاده از آن در توربین‌های کلاس E وجود دارد. زیرا در توربین‌هایی که می‌بایست سوخت سنگین مصرف کنند جهت جلوگیری از رسوب بسیار سخت و فشرده بر روی پره‌ها که به سختی قابل جداسازی هستند دمای حداکثر ورودی به توربین را کاهش می‌دهند (در حدود ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و کمتر) و استفاده از توربین‌های کلاس بالا که دمای ورودی به توربین بالا است توجیهی ندارد. همچنین چنانچه از سوخت سنگین به عنوان سوخت مصرفی استفاده شود، عملیات شستشوی پره‌های توربین گاز و مسیر داغ به صورت هفتگی توصیه می‌شود.

جدول ۱- ۱۸ آنالیز نمونه سوخت مازوت [2]

Property	Unit	Test method	Typical range
Kinematic viscosity at 100°C (1)	mm^2/s	ISO 3104	6.0 to 55.0
Density at 15°C	kg/m^3	ISO 3675 or ISO 12185	950 to 1010 (2)
Flash point	°C	ISO 2719	> 60
Pour point	°C	ISO 3016	< 30
Carbon residue	% (m/m)	ISO 10370	< 22 (2)
Ash	%(m/m)	ISO 6245	< 0.20
Water	% (v/v)	ISO 3733	< 1.0
Sulphur (3)	% (m/m)	ISO 8754	Inland < 3.5 Marine < 5.0
Vanadium	mg/kg	ISO 14597	< 600
Aluminium plus silicon	mg/kg	ISO 10478	< 80

جدول ۱- ۱۹ آنالیز سوخت مازوت در پالایشگاه‌های مختلف ایران[10]

Item	unit	نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نفت کوره تولیدی پالایشگاه‌های کشور (اردیبهشت ۹۱)							
		پالایشگاه آبادان	پالایشگاه اراک	پالایشگاه اصفهان	پالایشگاه بندر عباس	پالایشگاه تبریز	پالایشگاه تهران	پالایشگاه شیراز	پالایشگاه کرمانشاه
Density@15 C	Kg/m3	958.9	959	946.9	964.2	959.7	959.1	954.9	903.9
Flash point	C	91	92	73	72	109	82	108	81
Kin viscosity @50°C	cSt	274.4	270.6	230.7	285.2	210.5	198.8	161.1	29.4
Vis.Red Wood @37.8°C	C	2444	2406	2007	2552	1805	1688	1311	197
Pour Point	Wt%	10	10	4.4	-1.1	15.6	10	21.1	23.9
Total sulfur	Wt%	2.991	2.950	2.709	3.0	2.706	2.781	2.302	1.690
Carbon R.	Wt%	9.7	10.4	9.68	12.3	8.9	9.4	5.41	4.2
Ash	Wt%	0.057	0.03	0.027	0.047	0.035	0.047	0.034	0.008
Water @ sediment	Vol%	Zero	Zero	0.05	Zero	Zero	0.04	0.05	Zero
Calorific Value	Mj/kg	42.78	42.8	43.06	42.64	42.87	42.83	43.21	44.13
Vanadium content	ppm	117	123*	190*	105	149	222*	321*	38*

***اعداد وانادیوم گزارش شده مربوط به اندازه‌گیری بر روی VB[1] برج‌های تقطیر می‌باشد که در سال ۱۳۸۵ اندازه‌گیری شده است . نفت کوره از اختلاط VB و ۲۰ الی ۲۵ درصد کاتر حاصل می‌گردد. از این رو مقدار وانادیوم را می‌توان در حدود ۲۰ الی ۲۵ درصد کمتر از مقدار گزارش شده در نظر گرفت**

۳-۳-۱ گازوئیل[2]

گازوئیل از پالایش نفت خام و از طبقات میانی برج تقطیر حاصل می‌شود. این سوخت شامل هیدروکربن‌هایی در محدوده C9 تا C20 با نقطه جوش بین ۱۶۳ تا ۳۵۷ درجه سانتی گراد است. البته ممکن است در بعضی تقسیم بندی‌ها میزان عدد کربن تا C28 و نقطه جوش به ۳۹۰ درجه سانتی گراد نیز افزایش یابد. سوخت گازوئیل بر اساس استاندارد ASTM D975 جهت سه دسته موتورهای دیزل مختلف تقسیم‌بندی شده است. در جدول ۱-۲۰ این تقسیم‌بندی آورده شده است. از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی گازوئیل مرتبه یک بسیار شبیه نفت سفید است. در درجه‌بندی سوخت دیزل مانند بنزین عددی با نام عدد ستان[3](CN) وجود دارد که مشابه عدد

[1] -Vacuum Bottom

[2] -Diesel fuel or fuel oil

[3]- عدد ستان به انگلیسی Cetane number :یک معیار اندازه‌گیری برای نشان دادن زمان تاخیر احتراق سوخت در موتورهای دیزل است. این عدد زمان تاخیر میان شروع پاشش به داخل محفظه احتراق و شروع احتراق سوخت را نشان می‌دهد. در طی این تاخیر

اکتان[1] بوده و با افزایش آن کیفیت سوخت افزایش می‌یابد. این عدد یک معیار جهت نشان دادن زمان تاخیر در احتراق سوخت است، بدان معنی که زمان تاخیر میان شروع پاشش به داخل محفظه احتراق و شروع احتراق سوخت را نشان می‌دهد. هرچه این زمان کمتر باشد زمان بیشتری برای تکمیل فرایند احتراق وجود خواهد داشت و بازده احتراق افزایش خواهد یافت. در حالت کلی موتورهای دیزل در عدد ستانی بین ۴۰ تا ۵۵ عملکرد مناسبی خواهند داشت. این عدد همچنین معیاری جهت نشان دادن چگالی و میزان سولفور موجود در گازوئیل نیز است. در صنایع نیروگاهی میزان محدوده مجاز ترکیبات موجود در سوخت بر طبق نظر سازنده تعیین و محدود می‌شود.

جدول ۱- ۲۰ تقسیم‌بندی سوخت گازوئیل در موتورهای دیزل بر اساس استاندارد ASTM D975

Grade of diesel fuel oil	Flash point C (min)	Water and sediment vol% (max)	Carbon residue on 10% residue% (max)	Ash weight% (max)	Distillation temperature C (90% point)		viscosity				Sulfur weight & (max)	Copper strip corrosion	Cetane number (min)
							Kinematic cSt t 40 C		Seybolt universal sec at 38 C [b]				
					min	max	min	max	min	max			
No 1 -D A volatile distillate fuel oil for engines in services requiring frequent speed and load	38	0.05	0.15	0.01	-	288	1.3	2.4	-	34.4	0.5	No.3	40
No 2- D A distillate fuel oil of lower volatility for engines in industrial and heavy mobile service	52	0.05	0.35	0.01	282	338[a]	1.9	4.1	32.6	40.1	0.5	No.3	40
No 4-D a fuel oil for low and medium speed engine	55	0.5	-	0.10	-		5.5	24.0	45.0	125	2.0	-	30

در جدول زیر آنالیز نمونه سوخت گازوئیل و محدوده تغییرات آن آورده شده است. شرایط درج شده در ستون طراحی مربوط به حالت استفاده در توربین گاز می‌باشد. در بویلرهای بخار و موتورهای رفت و برگشتی میزان حساسیت نسبت به ترکیبات سوخت کمتر بوده و از اهمیت کمتری برخوردار است.

زمان، سوخت جمع شده و سپس محترق می گردد و این احتراق به صورت انفجار صورت می‌گیرد تا بتواند یک ضربه قدرت تولید نماید. هر چه زمان تاخیر کمتر باشد احتراق یکنواخت تر خواهد بود

[1] -Octane number