

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

تحلیل و مدلسازی عملکرد بویلر بازیاب حرارت با استفاده از سوخت‌های نوین (زیست توده)

با رویکرد کاهش آلاینده‌ها

نگارنده: سروش کلاتی حساری

استاد راهنما:

دکتر محمود چهارطاقی

بهمن ۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه مهندسی تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سروش کلاتی حصاری

تحت عنوان:

تحلیل و مدلسازی عملکرد بویلر بازیاب حرارت با استفاده از سوخت های نوین (زیست توده) با رویکرد کاهش

آلاینده ها

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			محمود چهارطاقی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ داستان زحمکش پدرم،

و قلب مہربان مادرم

## تعهد نامه

اینجانب سروش کلاتی حصارى دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه " تحلیل عملکرد بویلر بازیاب حرارت با استفاده از سوخت های نوین (زیست توده) با رویکرد کاهش آلاینده ها" تحت راهنمایی دکتر چهارطاقی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود هست و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافته ای آن ها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در این پایان‌نامه عملکرد بویلر بازیاب حرارت سه فشاره با گرمایش مجدد در شرایط استفاده از زیست‌توده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و همچنین پارامترهای طراحی آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک باهدف کسب توان و راندمان ماکزیمم سیکل، بهینه‌سازی گردیده است. با توجه به اینکه بویلر عملکرد بویلر بازیاب متأثر از نوع سوخت مصرفی و دمای گازهای ورودی به آن است، لذا با تغییر سوخت سیکل، هم میزان توان و راندمان سیکل قابل تغییر بوده و هم میزان آلاینده‌گی گازهای خروجی از آن نیز تغییر کند. در این پایان‌نامه تکنولوژی تبدیل زیست توده به سوخت گازی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. از جمله عوامل مؤثر در ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده می‌توان به نوع راکتور تولیدکننده گاز از زیست توده، عامل گازساز زیست توده و نوع زیست توده اشاره نمود. در کار حاضر تأثیر تمامی این عوامل بر عملکرد بویلر بازیاب از نظر تغییرات پارامترهای طراحی آن نظیر بخار تولیدی، تغییرات دمای پینچ، تغییرات فشار بخار و نیز توان تولیدی، راندمان سیکل و میزان آلاینده‌گی آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. با تحلیل و بررسی‌های انجام شده پیرامون راندمان سیکل در استفاده از راکتورهای بستر ثابت با جریان‌های بالارونده و پایین‌رونده، بسترسایال حبایی و گردش، مشخص شد که راندمان سیکل در استفاده از سوخت راکتور بستر ثابت با جریان بالارونده، بیش از سوخت سایر راکتورها است. همچنین مشخص شد میزان تولید  $NO_x$  گازهای حاصل از احتراق سوخت راکتور بستر ثابت با جریان پایین‌رونده نسبت به سوخت سایر راکتورها کمتر است. با مقایسه فرایندهای تبدیل به گاز زیست توده مشخص شد گاز تولید شده از زیست توده توسط عامل هوا به دلیل دمای احتراق پایین فاقد توجیه لازم برای استفاده از آن به عنوان سوخت است. توان ماکزیمم سیکل نیز در استفاده از گاز تولیدی عامل بخار، بیش از گاز تولیدی عامل اکسیژن است. همچنین میزان مشخص شد میزان  $NO_x$  تولیدی گازهای حاصل از احتراق سوخت عامل هوا کمتر از سوخت

دیگر عوامل گازساز است. در انتها نیز بین گاز تولید شده از چند نوع رایج زیست توده و گاز طبیعی مقایسه‌های جامعی صورت گرفته است.

**کلمات کلیدی: بویلر بازیاب حرارت، توان تولیدی، راندمان، میزان تولید آلاینده‌گی، گاز**

**تولید شده از زیست توده**

فصل اول: ..... ۱

مقدمه ..... ۱

۱-۱ مقدمه ..... ۱

۲-۱ زیست توده به عنوان یک منبع کربن خنثی انرژی ..... ۴

۳-۱ منابع زیست توده ..... ۶

۴-۱ تکنولوژی‌های استحصال انرژی از زیست توده ..... ۱۱

۱-۴-۱ فناوری تبدیل ترموشیمیایی ..... ۱۱

۱-۴-۱ تکنولوژی تبدیل به گاز ..... ۱۹

۵-۱ راکتورهای بستر ثابت ..... ۲۱

۶-۱ راکتورهای بستریسیال ..... ۲۱

۷-۱ هضم ..... ۲۲

۸-۱ تخمیر ..... ۲۳

۹-۱ مزایا و معایب سوخت‌های زیست توده‌ای ..... ۲۳

۱۰-۱ نیروگاه سیکل ترکیبی ..... ۲۵

۱۱-۱ ملاحظات طراحی بویلر بازیاب ..... ۲۸

۱-۱۱-۱ مولد بخار چند فشاره ..... ۲۸

۲-۱۱-۱ نقطه پینچ (PINCH POINT) ..... ۲۹

۳-۱۱-۱ نقطه‌ی رویکرد (APPROACH POINT) ..... ۲۹

۴-۱۱-۱ تأثیر دمای محیط در عملکرد بویلر بازیاب حرارت ..... ۳۰

۵-۱۱-۱ تأثیر بار توربین گاز در عملکرد بویلر بازیاب حرارت ..... ۳۲

۶-۱۱-۱ تأثیر فشار بخار در عملکرد بویلر بازیاب حرارت ..... ۳۳

۱۲-۱ جمع بندی ..... ۳۵

فصل دوم ..... ۳۷



مروری بر کارهای پیشین..... ۳۷

۱-۲ مقدمه..... ۳۸

۲-۲ مروری بر تعدادی از کارهای انجام شده در زمینه زیست توده..... ۳۸

۳-۲ تحقیقات انجام شده در راستای تبدیل انواع مختلف زیست توده به سوخت گازی..... ۳۸

۴-۲ کارهای انجام شده در زمینه بویلر بازیاب حرارت و سیکل ترکیبی..... ۴۵

۵-۲ هدف از انجام کار حاضر و ضرورت آن..... ۵۳

فصل سوم ..... ۵۵

۱-۳ مقدمه..... ۵۶

۲-۳ فرضیات صورت گرفته..... ۵۶

۳-۳ مدل سازی سیکل ترکیبی سه فشاره با گرمایش مجدد..... ۵۷

۴-۳ مدل سازی انرژی سیکل گازی..... ۶۰

فصل چهارم ..... ۶۷

شبیه سازی و ارائه نتایج..... ۶۷

۱-۴ مقدمه..... ۶۸

۲-۴ بحث و نتیجه گیری..... ۶۹

۱-۲-۴ تأثیر نوع راکتور دستگاه تبدیل کننده گاز زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب..... ۷۲

۲-۲-۴ تأثیر عامل اکسیداسیون زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب..... ۸۰

۳-۲-۴ تأثیر نوع زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب حرارت..... ۹۲

۴-۲-۴ مقایسه زیست توده و گاز طبیعی از نظر توان تولیدی سیکل، راندمان سیکل و میزان آلاینده گی..... ۱۰۳

فصل پنجم ..... ۱۱۱

۱-۵ مقدمه..... ۱۱۲

۲-۵ نتیجه گیری تأثیر نوع راکتور تبدیل کننده گاز زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب حرارت و سیکل..... ۱۱۲

۳-۵ نتیجه گیری تأثیر عامل اکسیداسیون زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب حرارت..... ۱۱۴

- ۴-۵ نتیجه‌گیری تأثیر نوع زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب حرارت ..... ۱۱۵
- ۵-۵ نتیجه‌گیری مقایسه سوخت مشتق زباله ..... ۱۱۶
- ۶-۵ نتیجه‌گیری کلی ..... ۱۱۷
- ۷-۵ پیشنهادات ..... ۱۱۸
- پیوست-الف ..... ۱۱۹
- مراجع ..... ۱۲۵

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): نمودار انرژی مصرفی کل دنیا برحسب تنوع سوخت‌های مصرفی ..... ۲
- شکل (۲-۱): اجزای اصلی نیروگاه سیکل ترکیبی ..... ۴
- شکل (۳-۱): چرخه‌ی کربن ..... ۵
- شکل (۴-۱): منابع زیست توده ..... ۱۰
- شکل (۵-۱): تکنولوژی‌های استحصال انرژی از زیست توده ..... ۱۱
- شکل (۶-۱): طرح شماتیک پالایش زیستی برای تولید انواع سوخت‌های زیستی و شیمیایی ..... ۱۵
- شکل (۷-۱): طرح شماتیک انواع راکتورهای تولید کننده‌ی گاز ..... ۲۰
- شکل (۸-۱): نقطه رویکرد و نقطه‌ی پینچ در دیاگرام دمایی جریان گاز ..... ۳۰
- شکل (۹-۱): عملکرد بویلر بازیاب حرارت تحت شرایط دمایی محیطی مختلف ..... ۳۱
- شکل (۱-۴): دیاگرام دما برحسب نرخ انتقال حرارت در طول بویلر بازیاب ..... ۷۲
- شکل (۲-۴): مقایسه راکتورهای CFB, DOWNDRAFT, UPDRAFT و BFB از نظر بخار تولیدی ..... ۷۷
- شکل (۳-۴): مقایسه راکتورهای CFB, UPDRAFT, DOWNDRAFT و BFB از نظر توان تولیدی ..... ۷۸
- شکل (۴-۴): مقایسه راکتورهای CFB, UPDRAFT, DOWNDRAFT و BFB از نظر راندمان ..... ۷۸
- شکل (۵-۴): مقایسه میزان  $NO_x$  بین راکتورهای BFB, UPDRAFT, CFB و DOWNDRAFT ..... ۷۹
- شکل (۶-۴): مقایسه عوامل اکسیژن هوا و بخار بر حسب دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب ..... ۸۲
- شکل (۷-۴): مقایسه دمای گازهای حاصل از احتراق سوخت تولیدی در سه فرایند تبدیل به گاز ..... ۸۳
- شکل (۸-۴): مقایسه عوامل گازساز هوا و اکسیژن از نظر تبدیل به گاز از نظر بخار تولیدی بویلر بازیاب ..... ۸۶
- شکل (۹-۴): تغییرات دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در استفاده از عوامل گازساز اکسیژن و هوا ..... ۸۷
- شکل (۱۰-۴): تأثیر دمای پینچ فشار بالا در توان تولیدی سیکل بخار ..... ۸۸
- شکل (۱۱-۴): مقایسه توان تولیدی در استفاده از سوخت عوامل گازساز اکسیژن و هوا ..... ۸۹

- شکل (۴-۱۲): مقایسه راندمان سیکل در استفاده از سوخت عوامل گازساز اکسیژن و هوا..... ۹۰
- شکل (۴-۱۳): مقایسه درصد جرمی  $NO_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق انواع زیست توده..... ۹۳
- شکل (۴-۱۴): مقایسه میزان دبی مصرفی انواع رایج و پرکاربرد زیست توده..... ۹۴
- شکل (۴-۱۵): مقایسه توان تولیدی سیکل در استفاده از سه نوع زیست توده..... ۹۷
- شکل (۴-۱۶): مقایسه راندمان سیکل در استفاده از سه نوع زیست توده..... ۹۷
- شکل (۴-۱۷): مقایسه توان تولیدی سیکل در شرایط استفاده از پنج نوع زیست توده..... ۱۰۱
- شکل (۴-۱۸): مقایسه راندمان سیکل در استفاده از پنج نوع زیست توده..... ۱۰۱
- شکل (۴-۱۹): درصد جرمی  $NO_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق پنج نوع زیست توده..... ۱۰۲
- شکل (۴-۲۰): مقایسه توان تولیدی در استفاده از گاز طبیعی و سوخت مشتق زباله به عنوان سوخت..... ۱۰۶
- شکل (۴-۲۱): مقایسه راندمان در استفاده از گاز طبیعی و سوخت مشتق زباله به عنوان سوخت..... ۱۰۷
- شکل (۴-۲۲): مقایسه دبی مصرفی سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی..... ۱۰۸
- شکل (۴-۲۳): مقایسه درصد جرمی  $NO_x$  در گازهای حاصل از احتراق سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی..... ۱۰۹

## فهرست جداول

- جدول (۱-۱) سهم زیست توده در مصرف انرژی نهایی در نقاط مختلف دنیا..... ۵
- جدول (۲-۱): منابع انرژی پسماندی کل دنیا بر حسب EJ در سال ۱۹۸۷..... ۸
- جدول (۳-۱): ترکیبات و ارزش حرارتی گاز تولیدی از یک زیست توده ..... ۱۷
- جدول (۴-۱): اطلاعات عمومی عملکرد توربین گاز LM5000 در شرایط دمایی مختلف..... ۳۰
- جدول (۵-۱): عملکرد یک نمونه توربین گاز در بارهای مختلف..... ۳۲
- جدول (۶-۱): تأثیر فشار بخار بر عملکرد بویلر بازیاب حرارت..... ۳۴
- جدول (۱-۴): پارامترهای ثابت ورودی و محدودیت های طراحی اعمال شده به برنامه ..... ۷۰
- جدول (۲-۴) پارامترهای طراحی و یا متغیرهای تصمیم بویلر بازیاب..... ۷۰
- جدول (۲-۴): متغیرهای تصمیم ورودی به برنامه..... ۷۱
- جدول (۳-۴): تأثیر راکتور در ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده و ارزش حرارتی..... ۷۳
- جدول (۴-۴): مقادیر بهینه پارامترهای طراحی بویلر بازیاب در استفاده از سوخت انواع راکتورها..... ۷۴
- جدول (۵-۴): ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده توسط عوامل اکسیژن، هوا و بخار..... ۸۱
- جدول (۶-۴) مقادیر بهینه پارامترهای طراحی بویلر بازیاب در استفاده از سوخت عوامل اکسیژن و هوا..... ۸۴
- جدول (۷-۴): ترکیبات موجود در گاز تولیدی از زیست توده توسط عامل بخار..... ۹۲
- جدول (۸-۴): مقادیر بهینه پارامترهای بهینه سازی شده بویلر بازیاب در استفاده از سه زیست توده..... ۹۵
- جدول (۹-۴): مقادیر بهینه پارامترهای بهینه سازی شده بویلر بازیاب در استفاده از پنج نوع زیست توده..... ۹۹
- جدول (۹-۴) نتایج حاصل از بهینه سازی بویلر بازیاب در استفاده از سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی..... ۱۰۵

فهرست علائم:

ضریب گرمای ویژه (kJ/kg.K)	$C_p$
اکونومایزر	EC
اوپراتور	EV
آنتالپی (kJ/kg)	h
ارزش حرارتی پایین (kJ/kg)	LHV
جرم مولکولی (kg/mol)	M
دبی جرمی (kg/s)	m
دمای پینچ (K)	PP
فشار (bar)	P
نرخ حرارت (MW)	Q
نسبت تراکم کمپرسور	$r_c$
سوپرهیتر	SH
دما (K)	T
دمای هوای ورودی به کمپرسور	$T_A$
دمای هوای خروجی کمپرسور	$T_B$
دمای گاز ورودی به توربین گاز	$T_C$
دمای گاز ورودی به بویلر بازیاب	$T_D$
توان (MW)	W
کسر مولی	y

علائم یونانی

اختلاف دمای نقاط سوپرهیت (K)	$\Delta T$
راندمان	$\eta$
نسبت هم ارزی	$\phi$
نسبت ضرایب گرمای ویژه	$\gamma$

زیر نویس ها

هوا	a
کمپرسور هوا	AC
سیکل ترکیبی	cc
سوخت	f
گاز	g
سیکل گاز	GC
توربین گاز	GT
فشار بالا	HP
فشار متوسط	IP
فشار پایین	LP
به طور خالص	net

اشباع	S
توربین بخار	ST
آب	W
بخار با کیفیت ۰٪	0%
بخار با فشار ۰,۰۷ بار	0.07
بخار با کیفیت ۸۸٪	88%
نقاط سیکل	۱و۲و۳ ...





# فصل اول: مقدمه



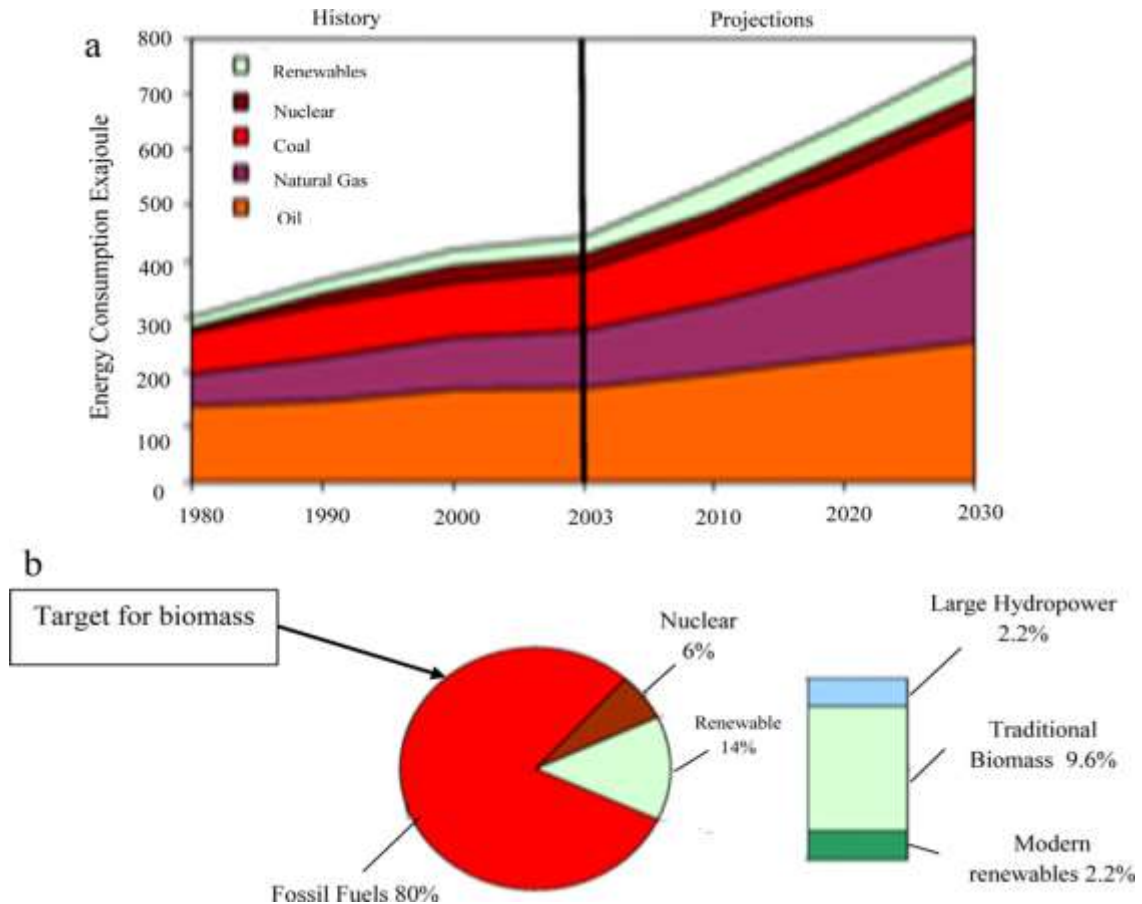
## ۱-۱ مقدمه

در حال حاضر سوخت‌های فسیلی مثل نفت و زغال سنگ و گاز طبیعی منابع اول انرژی در جهان هستند (تقریباً چیزی در حدود ۸۰٪ انرژی مصرفی دنیا، بیش از EJ ۴۰۰ در سال) در شکل (۱-۱) نمودار انرژی مصرفی کل دنیا بر حسب تنوع سوخت‌های مصرفی نشان داده شده است [۱]. با این حال انتظار می‌رود این منابع انرژی طی ۴۰ تا ۵۰ سال آینده به اتمام برسند. علاوه بر این آسیب‌های محیطی که این منابع دارند از جمله گرمایش جهانی، باران‌های اسیدی و دود شهری به سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای این منابع جهان را به کاهش انتشار آلاینده‌های کربنی تا میزان ۸۰٪ و استفاده از منابع متنوع انرژی‌های تجدید پذیر که آلاینده‌گی محیطی کمتری دارند مثل انرژی باد، انرژی خورشیدی، زیست توده<sup>۱</sup> و ... ترغیب می‌کند. منابع انرژی جهان برای چندین دهه است که توسط سوخت‌های فسیلی احاطه شده است. امروزه زیست تأمین کننده‌ی ۱۰-۱۵٪ انرژی مصرفی دنیا است [۲]. در حال حاضر در کشورهای صنعتی زیست توده چیزی در حدود ۹-۱۴٪ انرژی مصرفی را تأمین می‌کند که این میزان در کشورهای در حال توسعه چیزی در حدود یک‌پنجم تا یک‌سوم کل انرژی مصرفی است [۳]. زیست توده به هر ماده آلی که از گیاهان مشتق شده باشد گفته می‌شود و به طور کلی شامل کلیه زباله‌هایی است که منشأ زیستی داشته باشند و از تکثیر سلولی پدید آمده باشند. از منابع زیست توده می‌توان به جنگل‌ها و ضایعات جنگلی، محصولات و ضایعات کشاورزی، باغداری و صنایع غذایی، فضولات دامی، فاضلاب‌های شهری، فاضلاب‌ها، پسماندها و زائدات آلی صنعتی و ضایعات جامد زباله‌های شهری اشاره کرد [۴]. امروزه برای منابع مختلف زیست توده و کاربردهای گوناگون آن، فناوری‌های زیادی توسعه یافته و یا در حال توسعه می‌باشند. فناوری‌های مختلف زیست توده در مراحل مختلف توسعه و معرفی به بازار قرار دارند و طیف وسیعی از توسعه آزمایشگاهی و نمونه سازی تا کاملاً تجاری شده را در بر می‌گیرند. از جمله فناوری‌های استحصال انرژی از زیست توده می‌توان به احتراق، ترموشیمیایی و بیوشیمیایی اشاره نمود. در فناوری احتراق منابع جامد

---

<sup>۱</sup> Biomass

زیست توده نظیر زائدات جنگلی - کشاورزی، زائدات صنایع غذایی و زباله‌های شهری مستقیماً در بویلرهای خاصی سوزانده شده و از حرارت حاصل برای تولید برق، حرارت و یا برق و حرارت استفاده می‌شود [۵].



شکل (۱-۱): نمودار انرژی مصرفی کل دنیا برحسب تنوع سوخت‌های مصرفی [۱]

در روش ترموشیمیایی زیست توده را می‌توان به دو شیوهی گازی کردن<sup>۱</sup> و آتشکافت<sup>۲</sup> به سوخت گازی یا مایع قابل اشتعال تبدیل نمود و آن را به صورت تنها یا با ترکیب کردن با سوخت‌هایی نظیر متان در نیروگاه‌ها استفاده کرد. در فناوری بیوشیمیایی، تولیدکننده انرژی، فرآورده‌هایی هستند که به وسیله عمل سوخت‌وساز موجودات زنده پدید آمده و به خاطر داشتن ارزش گرمایی بالا به عنوان سوخت به کار می‌روند. گاز متان و الکل اتیلیک (اتانول) از مهم‌ترین فرآورده‌های این‌چنینی

<sup>۱</sup> Gasification

<sup>۲</sup> pyrolysis

می‌باشند. گاز متان به وسیله فرآیند هضم بی‌هوازی<sup>۱</sup> و اتانول به وسیله فرآیند تخمیر الکلی<sup>۲</sup> تولید می‌شود [۶۵]. مولد بخار بازیاب حرارت یا بویلر بازیاب حرارت<sup>۳</sup> یک مبدل حرارتی بازیابی انرژی است که از گرمای گازهای داغ خروجی از توربین گاز برای تولید بخار استفاده می‌کند و در واقع دو سیکل تولید توان گازی و بخار را به یکدیگر مرتبط می‌سازد. شکل (۱-۲) اجزای اصلی یک نیروگاه سیکل ترکیبی بر پایه توربین گاز را نشان می‌دهد. در یک نیروگاه سیکل ترکیبی<sup>۴</sup> تجهیزات به کاررفته از جمله کمپرسورها، توربین‌ها، پمپ‌ها و شیرآلات اکثراً به صورت کالاهای استاندارد تجاری در اندازه‌های مختلف وجود دارند و این در حالی است که بویلر بازیاب حرارت از معدود اجزایی است که برای هر نیروگاه خاص و با توجه به شرایط آن ساخته می‌شود و در واقع یک کالای استاندارد نیست و در واقع از دیدگاه کاربردی و نه صرفاً تئوری تنها جزء یک نیروگاه سیکل ترکیبی است که تقریباً تمامی پارامترهای عملکردی سیکل بخار در آن لحاظ شده و قابل بهینه‌سازی است [۷]. اجزای اصلی بویلر بازیاب عبارت‌اند از: صرفه‌جو<sup>۵</sup>، تبخیرکننده<sup>۶</sup>، مافوق گرم‌کن<sup>۷</sup> و پیش گرم‌کن آب<sup>۸</sup> که این اجزا بر اساس شرایط عملکردی مورد نیاز کنار هم قرار می‌گیرند. انواع مدل‌های بویلر بازیاب را می‌توان بر حسب جهت جریان گازهای خروجی از اگزوز یا تعداد سطوح فشار طبقه‌بندی نمود. بر اساس جریان گازهای خروجی از اگزوز، بویلر بازیاب به انواع افقی و عمودی تقسیم می‌شود و همچنین بر اساس سطوح فشار بویلر بازیاب را می‌توان در انواع یک فشاره و چند فشاره طبقه‌بندی نمود [۷]. بر این اساس مدل انتخاب‌شده برای تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی از نوع سه فشاره با گرمایش مجدد است. معمولاً بهینه‌سازی بر اساس توابع هدف متفاوتی مانند افزایش بازدهی، کاهش هزینه‌ها و یا افزایش

---

<sup>۱</sup> Digestion

<sup>۲</sup> Fermentation

<sup>۳</sup> Heat recovery steam generator

<sup>۴</sup> Combined cycle gas turbine

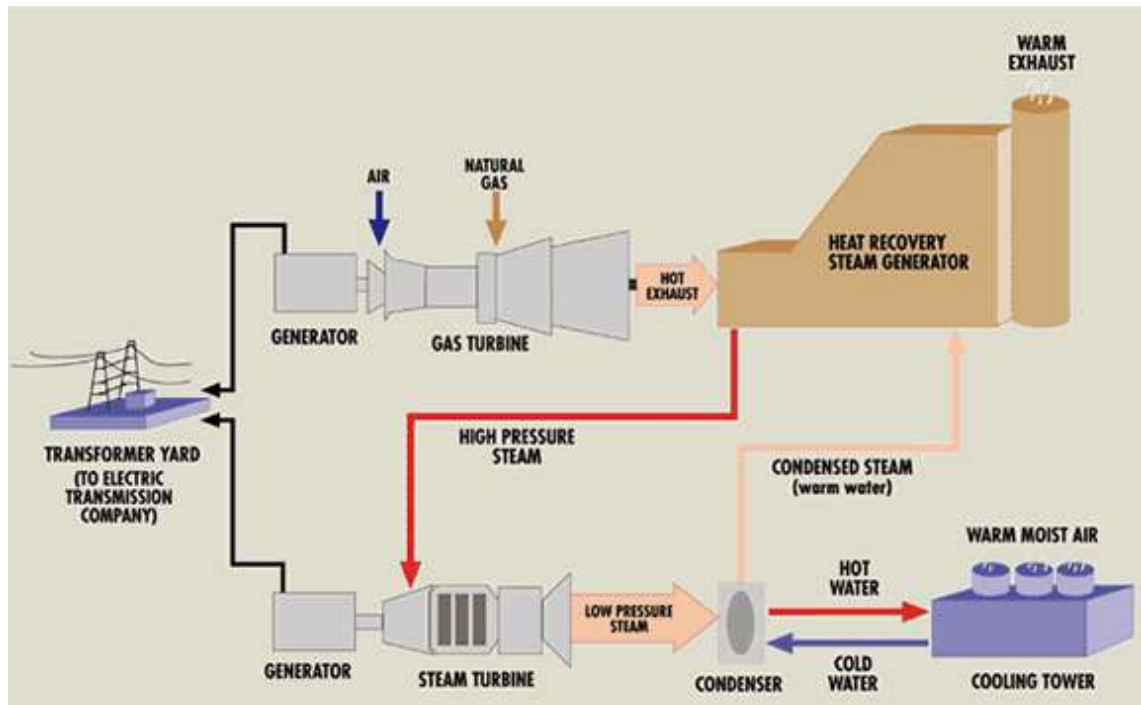
<sup>۵</sup> Economizer

<sup>۶</sup> Evaporator

<sup>۷</sup> Super heater

<sup>۸</sup> Water preheater

سود صورت می‌گیرد و از آنجا که سیستم مورد بررسی یک سیستم تولید توان می‌باشد، لذا هدف‌گذاری در تحلیل این سیستم، تولید توان ماکزیمم می‌باشد.



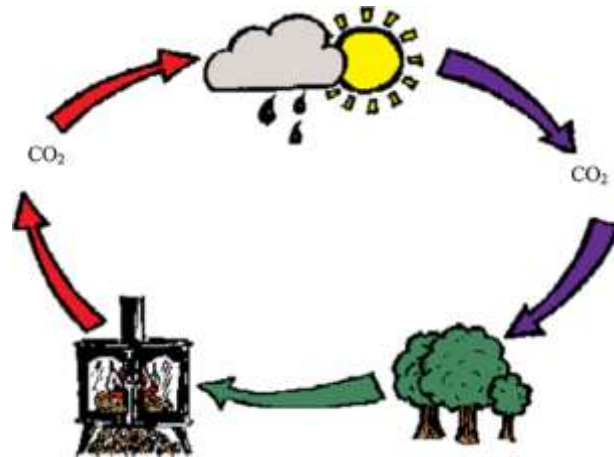
شکل (۲-۱): اجزای اصلی نیروگاه سیکل ترکیبی [۷]

در ادامه‌ی این فصل به معرفی انواع رایج زیست توده، فناوری‌های تولید انرژی از زیست توده، مزایا و معایب استفاده از زیست توده و همچنین معرفی انواع مختلف بویلر بازیاب حرارت و نحوه‌ی عملکرد آن پرداخته خواهد شد. در فصل دوم کارهای پیشین مرور خواهد شد و در فصل سوم، مدل‌سازی و روابط حاکم بر سیکل بیان می‌گردد. در فصل چهارم مطالعه‌ی صورت گرفته تشریح و در فصل پنجم نیز نتایج آورده شده است.

## ۲-۱ زیست توده به عنوان یک منبع کربن خنثی انرژی

هنگامی که زیست توده سوزانده می‌شود و یا بعد از اینکه به انواع دیگر سوخت همانند سوخت جامد، مایع یا گازی (مثل زغال سنگ، اتانول و متان) تبدیل شده و استفاده می‌گردد، کربن زیست توده با هوا واکنش داده و به شکل کربن دی‌اکسید در جو آزاد می‌شود. اگر سیکل به صورت کامل باشد، کربن دی‌اکسیدی که تولید می‌شود برابر با همان مقداری است که از جو گرفته شده است [۸]. این فرایند

به عنوان چرخه‌ی کربن و یا انتشار کربن صفر شناخته شده است. در شکل (۳-۱) این چرخه نشان داده شده است [۹].



شکل (۳-۱): چرخه‌ی کربن [۹]

در مقایسه با دیگر منابع حرارتی تجدید پذیر مثل حرارت خورشیدی یا زمین گرمایی زیست توده هنوز هم به عنوان منبع غالب است و با ۹۶٪ حرارت‌های تجدید پذیر مرتبط است. تقریباً تمام کشورهای آسیا از تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان سوخت‌های چوبی هستند. سرچشمه بیشتر سوخت‌های چوبی نه از جنگل‌های طبیعی بلکه از زمین‌های کشاورزی و سایر زمین‌ها هستند. در جدول (۱-۱) سهم زیست توده در مصرف انرژی نهایی در نقاط مختلف دنیا را نشان می‌دهد [۱۰].

جدول (۱-۱) سهم زیست توده در مصرف انرژی نهایی در نقاط مختلف دنیا [۱۰]

ناحیه	سهم زیست توده در مصرف انرژی نهایی (%)
آفریقا	۶۰
جنوب آسیا	۵۶,۳
شرق آسیا	۲۵,۱
چین	۲۳,۵
آمریکای لاتین	۱۸,۲
اروپا	۳,۵
آمریکای شمالی	۲,۷
خاورمیانه	۰,۳

### ۱-۳ منابع زیست توده

میزان مصرف زیست توده در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به میزان قابل توجهی با هم تفاوت دارد. کشورهای توسعه یافته حدود ۳۵٪ از کل انرژی اولیه خود را از زیست توده تأمین می کنند در حالی که این میزان برای کشورهای در حال توسعه حدود ۳٪ است. بسیاری از مصارف زیست توده جهت تأمین نیاز به انرژی در مناطق روستایی است. همچنین استفاده از آن به نسبت دیگر منابع انرژی راحت تر و در دسترس تر است [۱۰]. زیست توده شامل تمام گیاهان روی سطح زمین می شود. بر اساس برآوردهای انجام شده مقدار آن در کل دنیا در حدود ۲۲۰ میلیارد تن خشک<sup>۱</sup> و میزان انرژی آن در حدود  $4500 \text{ EJ}$  ( $4 \times 10^{18} \text{ J}$ ) است. هر ساله عمل فتوسنتز حدود دوسوم این مقدار انرژی بازسازی کرده و انرژی مورد نیاز را برای رشد سالیانه گیاهان فراهم می آورد. در آغاز قرن بیست و یکم تقریباً دو درصد از این مقدار انرژی (حدود  $55 \text{ EJ}$ ) برای تأمین انرژی دنیا صرف شد. در صورتی که امکان استفاده از  $270 \text{ EJ}$  از این انرژی وجود دارد، هر ساله نزدیک ده درصد از این مقدار بازسازی می شود. این مقدار انرژی می تواند بیش از پنجاه درصد انرژی اولیه دنیا را تا سال ۲۰۵۰ تأمین کند. امروزه فقط اشکالی از زیست توده که توانایی رقابت با زغال سنگ در تولید انرژی داشته باشند تنها می توان به پسماندهای کشاورزی که شامل چوب و محصولات چوبی هستند و گهگاه زباله های شهری اشاره کرد [۱۰]. زباله های شهری نشان دهنده ی یک مورد خاص و از نظر مقادیر در دسترس نسبتاً کوچک هستند. شرایط زباله های شهری نسبت به پسماندهای گیاهی کاملاً متفاوت است زیرا مقادیر عظیمی از آنها بهره برداری نمی شوند و به احتمال زیاد به عنوان منابع اولیه زیست توده در بازار سوخت زیست توده گسترش می یابند. امروزه محصولات گیاهی برای رقابت با سوخت های فسیلی بیش از حد گران هستند اما انگیزه توسعه انرژی های تجدید پذیر وجود دارد و این

---

<sup>۱</sup> Oven dry tone



سرآغازی برای مشارکت در امر تولید انرژی است [۱۰]. در حال حاضر انواع مختلفی از پسماندها در سرتاسر دنیا وجود دارد. مهم‌ترین این پسماندها، پسماند های گیاهی هستند اما از دیگر پسماندهایی که از آنها برای تولید انرژی استفاده می‌شود می‌توان به پسماندهای جنگلی و حیوانی اشاره کرد. برآورد مجموع مقادیر انرژی کل پسماندهای موجود و در دسترس به طور گسترده‌ای متفاوت است اما آنها می‌توانند تا بیش از ۱۰۰ EJ انرژی تأمین کنند. در جدول (۱-۲) منابع انرژی پسماندی در کل دنیا در سال ۱۹۸۷ بر حسب اگزاژول نشان داده شده است [۱۰]. در دنیا محصولات گیاهی زیادی هستند که می‌توانند پسماندهایی به عنوان زیست توده تولید کنند که برای تولید انرژی استفاده شود. گندم و جو هر ساله مقادیر زیادی کاه تولید می‌کند که به صورت سنتی سوزانده می‌شوند (سالانه بین یک تا دو میلیارد تن پسماندهای گیاهی سوزانده می‌شود). اخیراً قانونی در برخی نقاط دنیا وضع شده است که در آن سوزاندن کاه را غیر قانونی می‌داند. از آنجایی که کاه بایستی از مزارع جمع‌آوری شوند، چنین قانونی می‌تواند برای تبدیل این پسماندها به انرژی مؤثر باشد. برنج نیز دو پسماند سبوس برنج را در مزارع کشاورزی و کارخانه‌های فراوری تولید کرده که این پسماندها به راحتی قابل تبدیل به انرژی هستند. زمانی که ذرت از مزارع جمع‌آوری می‌شود مقادیر قابل توجهی از پسماندهای آن در زمین باقی می‌ماند. اگرچه بسیاری از این پسماندها بایستی به خاک باز می‌گردند اما بعد از برداشت ذرت، از چوب آن نیز می‌توان به عنوان پسماندی دیگر استفاده نمود و به عنوان یک زیست توده به راحتی به انرژی تبدیل می‌شود. برداشت نیشکر نیز مقادیر زیادی تفاله و ضایعات در زمین‌های کشاورزی به همراه دارد که یک منبع با ارزش انرژی است. همچنین برداشت نارگیل نیز مقادیر زیادی پوسته و فیبر به همراه دارد که می‌تواند به عنوان انرژی مورد استفاده قرار بگیرد. پوسته بادام نیز از دیگر منابع پسماندی است [۱۰].

جدول (۱-۲): منابع انرژی پسماندی کل دنیا برحسب EJ در سال ۱۹۸۷ [۱۰]

ناحیه	سبوس ذرت	کاه گندم	سبوس برنج	تفاله نیشکر	مجموع
آفریقا	۰,۴۸	۰,۲۵	۰,۲	۰,۵۴	۱,۴۷
آمریکا و کانادا	۲,۹۵	۱,۹۳	۰,۱۳	۰,۱۹	۵,۲
آمریکای لاتین	۰,۷۱	۰,۳۸	۰,۲۹	۳,۵۸	۴,۹۴
آسیا	۱,۷۴	۳,۶۵	۸,۹۶	۳,۱۹	۱۷,۵۴
اروپا	۰,۶۱	۲,۳۹	۰,۰۴	۰	۳,۰۴
اقیانوسیه	۰,۲۳	۲,۲۶	۰,۰۶	۰,۲۲	۲,۷۷
مجموع	۶,۷۲	۱۰,۸۶	۹,۶۸	۷,۷۲	۳۱,۹۸

آمار و ارقام در جدول (۱-۲) نشان می‌دهد که آسیا بزرگ‌ترین تولیدکننده‌ی پسماندهای کشاورزی در دنیاست اما به‌طور کلی این پتانسیل در سرتاسر دنیا وجود دارد. جمع‌آوری بهینه کاه گندم و پروژهای اروپایی نشان داده استفاده از آن در نیروگاه‌هایی که بر اساس کاه گندم کار می‌کنند می‌تواند مقرون‌به‌صرفه تر از زمانی باشند که از مزارع برداشت شده و سوزانده می‌شوند. با توجه به ماهیت فصلی برداشت، یک نیروگاه اقتصادی نیاز به یک مرکز ذخیره سازی بزرگ و یا منابع جایگزین سوختی دارد. سوخت‌هایی مثل سبوس برنج و چوب ذرت در طی فراوری این محصولات تولید می‌شود که این اتفاق پس از جمع‌آوری محصولات می‌افتد. تفاله نیشکر نیز از دیگر منابع با ارزش سوختی است که طی فرایند فراوری نیشکر از آن تولید می‌شود [۱۰]. یکی دیگر از منابع بالقوه‌ی انرژی زیست‌توده‌ای را می‌توان در پسماندهای دامی یافت که دارای منابع بسیار گسترده‌ای هستند. بر اساس تخمینی که زده شده است این منابع در کل دنیا دارای انرژی حدود EJ ۴۱ هستند. در کشورهای توسعه یافته با جمع‌آوری فاضلاب‌های دامی که می‌تواند باعث آلودگی محیطی شود اغلب مورد بهره‌برداری اقتصادی قرار می‌گیرند. می‌توان با تبدیل این نوع فاضلاب‌ها به بیوگاز به صورت

مقرون به صرفه تری از آن‌ها برای تولید حرارت و نیرو استفاده کرد [۱۰]. پسماندهای جنگلی شامل مواد بعد از قطع درختان و تراشیدن آن‌ها می‌شوند. از جمله‌ی این مواد می‌توان به خاکاره، پوسته درخت و ضایعاتی که در کارخانه‌های چوب‌بری و الوارسازی تولید می‌شود بعلاوه‌ی ضایعاتی که در طول پروسه‌ی تولید کاغذ تولید می‌شود اشاره کرد. همچنین با جمع‌آوری بوته‌های به هم تنیده زیر درختان و درخت‌های که در جنگل افتاده‌اند هم می‌توان به عنوان پسماندهای جنگلی از آن‌ها استفاده کرد و هم با این کار به حفظ سلامت جنگل و جلوگیری از آتش‌سوزی کمک می‌شود. ظرفیت جهانی تولید پسماندهای جنگلی نیز در حدود ۱۰۰۰۰ مگاوات برآورد می‌شود [۱۰]. زباله‌های خانگی که در شهرها در سرتاسر دنیا تولید می‌شود یک نسبت بزرگی از زیست توده را تشکیل می‌دهند. بسیاری از این زباله‌ها در جایگاه‌های دفن زباله دفن می‌شوند اما قوانین جدید به استراتژی‌های جدیدی همچون استفاده از زباله‌ها در نیروگاه‌ها تشویق می‌کنند. از یک دیدگاه مناسب در زباله‌ها بایستی پلاستیک، کاغذ، مواد فلزی و شیشه باید از هم جدا شده و بازیافت شوند. تفکیک زباله پرهزینه است اما ضایعات پس از اینکه از هم جدا می‌شوند می‌توانند سوزانده شوند، الکتریسیته تولید کنند و آن نیز به فروش برسد. با دفن مداوم زباله‌ها و ضایعات در زمین آن‌ها به تدریج شروع به تجزیه شدن می‌کنند و از آنجایی که این فرایند در غیاب اکسیژن صورت می‌گیرد، یکی از محصولات این تجزیه بی‌هوازی تولید متان است. بنابراین با برداشت متان از مکان‌های دفن زباله می‌توان از آن برای تولید برق در نیروگاه‌ها استفاده نمود. از آنجاکه گاز متان یک گاز گلخانه‌ای بسیار قوی است و حتی قوی‌تر از دی‌اکسید کربن، بسیاری از کشورها قوانینی را جهت برداشت متان از مکان‌های دفن زباله تصویب کرده‌اند [۱۰]. چوب به عنوان یک سوخت خانگی در مناطق روستایی استفاده می‌شود. این نوع سوخت عمدتاً در کشورهای در حال توسعه و برخی از کشورهای توسعه یافته مثل فرانسه، فنلاند و کانادا برای تأمین نیازهای انرژی داخلی استفاده می‌شود. آسیا بزرگ‌ترین تولیدکننده سوخت‌های چوبی و آفریقا بیشترین سرانه مصرف این نوع سوخت‌ها را داراست. در گذشته این چوب‌ها از جنگل‌های طبیعی تأمین می‌شد اما در حال حاضر برداشت چوب از زمین‌های غیر جنگلی به طور فزاینده‌ای رو به

افزایش است که این کار سبب کاهش فشار بر روی جنگل‌های طبیعی می‌شود. در شکل (۴-۱) برخی از منابع مختلف زیست توده نشان داده شده است [۱۱].



شکل (۴-۱): منابع زیست توده [۱۱]

برخی از این منابع رایج زیست توده همان‌طور که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است و قبلاً هم گفته شد مثل سبوس برنج<sup>۱</sup>، پسماند ذرت<sup>۲</sup>، پسماند نخل<sup>۳</sup>، نیشکر<sup>۴</sup> جزو پسماندهای گیاهی و کشاورزی، تراشه‌های چوبی<sup>۵</sup> جزو پسماندهای جنگلی و سوخت مشتق زباله<sup>۶</sup> نیز جزو پسماندها و زباله‌های شهری هستند [۱۱].

<sup>۱</sup> Rice husk

<sup>۲</sup> Corn waste

<sup>۳</sup> Palm waste

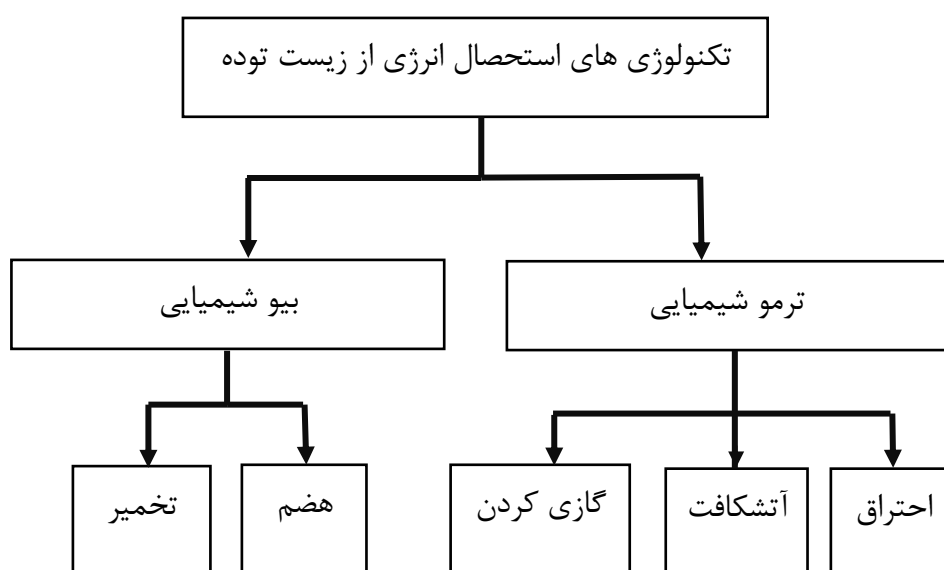
<sup>۴</sup> Sugarcane

<sup>۵</sup> Wooden chip

<sup>۶</sup> Refuse driven fuel

## ۴-۱ تکنولوژی‌های استحصال انرژی از زیست توده

امروزه برای منابع مختلف زیست توده و کاربردهای گوناگون آن، تکنولوژی‌های زیادی توسعه یافته و یا در حال توسعه هستند. تکنولوژی‌های مختلف استحصال انرژی از زیست توده در مراحل مختلف توسعه و معرفی به بازار قرار دارند و طیف وسیعی از توسعه آزمایشگاهی و نمونه سازی تا کاملاً تجاری شده را دربرمی‌گیرند. در شکل (۵-۱) این تکنولوژی‌ها نشان داده شده است [۱۲].



شکل (۵-۱): تکنولوژی‌های استحصال انرژی از زیست توده [۱۲]

## ۴-۱-۱ فناوری تبدیل ترموشیمیایی

این فناوری‌ها با گرما دادن به زائدات زیستی در حضور یا عدم حضور عوامل کمکی، انرژی تولید می‌کنند. انرژی تولید شده می‌تواند به صورت انرژی گرمایی یا انرژی ثانویه باشد که از فرآورده‌های انرژی‌زا به دست می‌آید مانند سوخت‌های جامد، مایع و گازی که این قابلیت را دارند به انرژی جنبشی یا الکتریسیته تبدیل شوند. عوامل کمکی در این فناوری‌ها می‌تواند بخار، هوا، اکسیژن،

هیدروژن و مواد جامد باشند. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است از مهم‌ترین فناوری‌های ترموشیمیایی می‌توان به احتراق<sup>۱</sup>، گازی کردن<sup>۲</sup> و آتشکافت<sup>۳</sup> اشاره کرد [۱۲].

#### ۱-۴-۱ احتراق زیست توده

احتراق مستقیم زیست توده عموماً به صورت سنتی برای تولید گرما و نیرو در فرایندهای صنعتی استفاده می‌شود. با این حال سیستم‌هایی که از احتراق مستقیم زیست توده برای تولید نیرو استفاده می‌کنند دارای بازده پایین و آلاینده‌گی بالایی هستند. این سیستم‌ها که شامل کوره‌ها و بویلر می‌شوند با احتراق مستقیم ضایعات کشاورزی، بخار تولید می‌کنند که از این بخار برای تولید برق استفاده می‌شود. دنباله‌ای از اتفاقاتی که در هنگام احتراق سوخت جامد زیست توده رخ می‌دهد شامل گرم شدن، خشک شدن، حذف مواد فرار<sup>۴</sup>، اشتعال و احتراق مواد فرار و سرانجام احتراق زغال آن است. در واقع اطلاعات اساسی برای توصیف پسماندهای کشاورزی شامل دمای آغاز حذف مواد فرار از سوخت جامد و احتراق زغال آن، تأثیر خشک شدن در فرایند حذف مواد فرار، ترکیبات حاصل از حذف مواد فرار و در نهایت تأثیر آزاد شدن مواد فرار و سوختن آن‌ها در فرایند کلی احتراق است. در حال حاضر چالش‌های عملیاتی و محیطی زیادی پیرامون فناوری احتراق مستقیم زیست توده وجود دارد. این موارد می‌تواند شامل چگالی حجمی پایین ضایعات کشاورزی (بین ۵-۱۰ برابر کمتر از زغال سنگ)، رطوبت بالا، نقطه ذوب پایین خاکستر و محتوای بالای مواد فرار باشد. چگالی کم منجر به مشکلاتی از قبیل حجم زیاد مورد نیاز برای ذخیره سازی، خروجی پایین انرژی بر اساس حجم و هزینه بالای حمل و نقل می‌شود. به طور مشابه دمای ذوب پایین خاکستر موجب تراکم و انباشتگی در یک بستر سیال، ایجاد رسوب و همچنین پوسته پوسته شدن و خوردگی سطوح انتقال حرارت می‌گردد. محتوای بالای مواد فرار که باعث تفاوت‌های قابل توجهی بین مشخصات احتراق و انتشار

---

<sup>۱</sup> combustion

<sup>۲</sup> Gasification

<sup>۳</sup> pyrolysis

<sup>۴</sup> devolatilization

گازهای گلخانه‌ای پسماندهای کشاورزی با سوخت‌های فسیلی می‌گردد. به عنوان مثال حضور مواد فرار موجب افزایش اشتعال پذیری زیست توده و واکنش پذیری آن می‌گردد اما این عامل باعث دشوار شدن کنترل فرایند احتراق نیز می‌گردد. این عوامل چالش‌هایی را برای احتراق پسماندهای کشاورزی در دستگاه‌های احتراق به وجود می‌آورد. علاوه بر این حضور عناصری مثل گوگرد، نیتروژن، کلر و غیره منجر به شکل‌گیری آلاینده‌های گازی مثل  $\text{SO}_x$ ،  $\text{NO}_x$ ،  $\text{N}_2\text{O}$  و  $\text{HCl}$  می‌شود [۱۲].

#### ۱-۴-۲-۱ آتشکافت زیست توده

آتشکافت زیست توده واکنشی است که در اثر تجزیه حرارتی زیست توده در حضور کم اکسیژن و یا عدم حضور اکسیژن اتفاق می‌افتد درحالی که گازی کردن یا تبدیل کردن زیست توده حالتی از آتشکافت است که بر اثر اکسیداسیون جزئی در یک محیط اکسید کننده کنترل شده شکل می‌گیرد. در این فرایند مواد آلی به‌وسیله گرما در غیاب اکسیژن تخریب می‌شوند و بخار آب، گازهای جدید، مواد فرار، قطران و زغال به وجود می‌آید، از این رو به این فرآیند، تقطیر تخریبی نیز می‌گویند. واکنش آتشکافت برای زیست توده در دمای ۳۰۰ تا ۳۷۵ درجه سلسیوس آغاز می‌شوند. زغال، مایعات آلی، گاز و آب با نسبت‌های متفاوتی از این فرآیند به دست می‌آیند و نسبت و مقدار آن‌ها بستگی به دمای عملیاتی، نرخ گرمادهی، زمان ماند، نوع مواد خام و درصد رطوبت آن‌ها دارد. در دماهای بالا و زمان ماند طولانی، گاز بیشتری پدید می‌آید درحالی که زغال و مایعات بیشتر، در دمای پایین‌تر و زمان ماند<sup>۱</sup> کوتاه تولید می‌گردند. مواد جامد پدید آمده در این فرآیند زغال (از نوع کربن فعال) و خاکستر می‌باشد. مایعات به دست آمده، مواد آلی با وزن مولی سبک‌تر از ماده خام اولیه را شامل می‌شود. از جمله این ترکیبات می‌توان اسیدها، الکل‌ها، آلدئیدها، ستن‌ها، استرها، ترکیبات فنلی را نام برد. در گاز به وجود آمده نیز ترکیبات زیر بیشتر به چشم می‌خورند: منواکسید کربن، هیدروژن، دی‌اکسید کربن، متان، اتان، اتیلن، بخار آب و دیگر هیدروکربن‌ها به مقدار ناچیز. راکتورهای گوناگونی برای

---

<sup>۱</sup> Residence Time

فرآیند آتشکافت ساخته شده‌اند که از انواع آن می‌توان به راکتورهای بستر ثابت<sup>۱</sup>، راکتورهای بستر متحرک<sup>۲</sup>، راکتورهای بستر معلق<sup>۳</sup>، راکتورهای بستر سیال<sup>۴</sup>، راکتور ایستا با بستر ساکن<sup>۵</sup>، کوره دوار شیب‌دار<sup>۶</sup> و کوره افقی<sup>۷</sup> اشاره کرد. بسته به متغیرهای فرایند آتشکافت مثل دمای راکتور و زمان ماند، مقادیر مختلفی از محصولات گازی، مایع و جامد با بازده‌های مختلف تولید می‌شود [۱۲]. برای مثال در فرایند آتشکافت سنتی که هزاران سال استفاده مورد استفاده قرار می‌گرفت در شرایط دمای پایین و زمان ماند طولانی این فرایند محصولات جامدی مثل زغال تولید می‌شد. در مقابل در فرایند آتشکافت سریع در شرایط دمایی بالا (حدود ۵۰۰ درجه سیلیسیوس) و زمان ماند کوتاه (حدود ۲ ثانیه) محصولاتی از قبیل یک مایع قهوه‌ای تیره یا روغن زیستی<sup>۸</sup> به همراه دیگر گازها و مایعات و مواد جامد نظیر زغال تولید می‌شود. این فرایند در حال حاضر بسیار بیشتر از آتشکافت سنتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالی که اکثر پسماندهای کشاورزی و جنگلی می‌توانند در این فرایند استفاده شوند، بیشتر کارها بر روی مواد خام مبتنی بر سلولز متمرکز شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد فرایند آتشکافت سریع شامل نرخ انتقال حرارت سریع به زیست توده در دمای واکنش ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، خنک کردن سریع بخارهای حاصل از سوخت مایع زیستی که در فرایند آتشکافت تولید شده و حذف سریع زغال تولید شده به منظور حداقل رساندن کراکینگ بخار تولید شده می‌شود. محصول اصلی فرایند آتشکافت یک مایع قهوه‌ای تیره یا روغن زیستی است که تقریباً ترکیبات عنصری همان زیست توده را دارد. این محصول شامل مخلوطی از هیدروکربن‌های حاوی اکسیژن با مقدار متغیر اما قابل ملاحظه‌ای آب که از رطوبت خود زیست توده و رطوبتی که طی تولید محصول در حین انجام واکنش به دست آمده است می‌شود. البته باید به این نکته اشاره کرد که حضور

---

<sup>۱</sup> Fixed bed reactors

<sup>۲</sup> moving bed reactors

<sup>۳</sup> Suspended bed reactors

<sup>۴</sup> Fluidized bed reactors

<sup>۵</sup> Stationary vertical shift

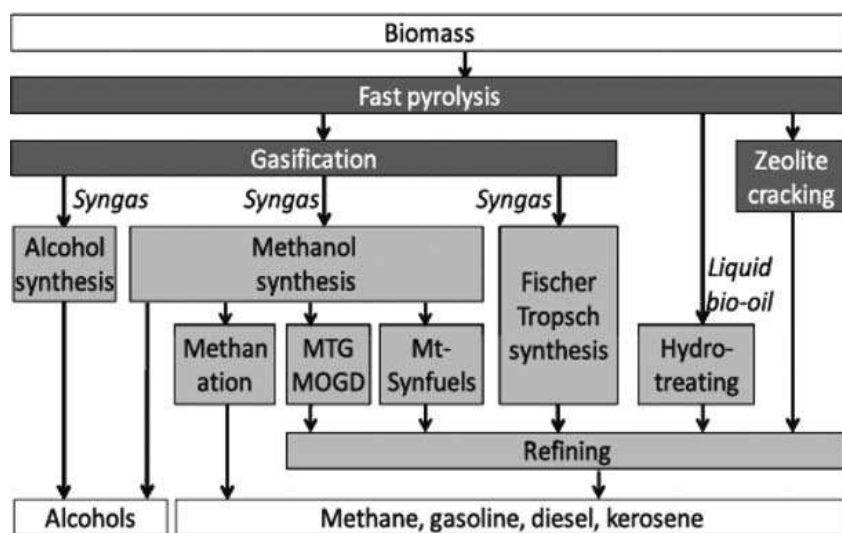
<sup>۶</sup> Inclined Rotating Klin

<sup>۷</sup> Horizontal Klin

<sup>۸</sup> Bio-Oil



آب در محصولات واکنش باعث می‌شود که این روغن زیستی با محصولات نفتی که طی واکنش به وجود می‌آیند قابل اختلاط نباشند. به‌طور کلی فرمول شیمیایی این روغن زیستی را می‌توان به‌صورت  $CH_{1.9}O_{0.7}$  معرفی کرد. ارزش حرارتی این سوخت در حدود ۱۷ مگاژول بر کیلوگرم است که حدود ۴۰ تا ۴۵٪ آن از سوخت‌های هیدروکربنی است. به‌طور خلاصه پتانسیل استفاده از آتشکافت زیست‌توده و پس از آن پالایش روغن زیستی به منظور تولید سوخت‌های زیستی<sup>۱</sup> نسل دوم به‌طور فزاینده‌ای به رسمیت شناخته شده است [۱۲]. شبیه به یک پالایشگاه نفت، مفهوم یک پالایشگاه زیستی نیز می‌تواند روشی پایدار و با ارزش به‌منظور استفاده از زیست‌توده برای تولید انرژی، سوخت و دیگر مواد شیمیایی ارائه دهد. این مفهوم به‌ویژه برای زیست‌توده می‌تواند جذاب باشد و این به علت عدم تجانس شیمیایی و تنوع گسترده منطقه‌ای آن است. با این حال ترکیب شیمیایی زیست‌توده،  $(CH_2O)_n$ ، کاملاً متفاوت از ترکیب نفت،  $(CH_2)_n$  است و در نتیجه مواد شیمیایی اولیه مشتق شده از زیست‌توده و نفت نیز متفاوت خواهند بود. در شکل (۱-۶) طرح شماتیک فرایند آتشکافت بر اساس مفهوم پالایش زیستی نشان داده شده است [۱۲].



شکل (۱-۶): طرح شماتیک پالایش زیستی برای تولید انواع سوخت‌های زیستی و شیمیایی [۱۲]

<sup>۱</sup> Biofuel

همان‌طور که در شکل (۱-۶) نشان داده شده است سوخت‌های زیستی که طی فرایند آتشکافت تولید می‌شوند طی فرایندهایی به انواع سوخت‌های گازی و مایع تبدیل نمود. این سوخت‌ها معمولاً با سوخت‌های معمولی سازگار هستند اما نسبت به آن‌ها پاک‌تر نیز هستند. در نتیجه می‌توان این سوخت‌ها را بدون تغییر قابل توجه در زیرساخت‌های موجود انباشت نمود. علاوه بر این در بخش بعدی تکنولوژی تبدیل به گاز زیست توده که طی آن گازهای سنتزی از زیست توده تولید می‌شوند مورد بحث قرار می‌گیرد. گازهایی که طی این فرایند تولید می‌شوند، ترکیبی از  $H_2$  و  $CO$  هستند که در نتیجه سنتز از هیدروکربن‌ها، الکل‌ها و دیگر مواد شیمیایی به وجود آمده است. با این حال این مسیر ممکن است کاملاً انرژی بر، هزینه‌بر باشد و مزایای زیست محیطی آن نیاز به بررسی داشته باشد. اما تبدیل کردن زیست توده به گاز برای تولید انرژی ممکن است مقرون‌به‌صرفه تر باشد [۱۲].

#### ۱-۴-۱-۳ گازی کردن زیست توده

فرایند گازی کردن یا تبدیل به گاز زیست توده شامل آتشکافت و اکسیداسیون جزئی در یک محیط اکسیدکننده که به‌خوبی کنترل شده است می‌شود. محصولات آن که طی این فرایند تولید می‌شوند گازهایی از قبیل  $H_2$ ،  $CO$ ،  $CO_2$  و  $H_2O$  و برخی از گونه‌های هیدروکربنی هستند. گرمای مورد نیاز برای خشک کردن، گرمایش و آتشکافت زیست توده از طریق اکسیداسیون جزئی آن تأمین می‌شود. گازی کردن زیست توده به عنوان یک فناوری قابل اتکا برای تولید انرژی تجدید پذیر و کربن آزاد تلقی می‌شود که قابلیت تطابق فوق‌العاده‌ای را با توجه به مواد اولیه و سوخت تولیدی ایجاد می‌کند. به‌طور کلی فرایند تبدیل به گاز مقادیر کمی از زیست توده را به مخلوطی از گازهای سنتز شده ( $H_2$  و  $CO$ ) و مقادیر مختلفی از  $CH_4$  و  $CO_2$  تبدیل می‌کند. همچنین مقادیری از هیدروکربن‌ها به ویژه در درجه حرارت‌های پایین تولید می‌شود. عوامل اکسیدکننده می‌توانند  $O_2$ ، هوا، بخار،  $CO_2$  و یا مخلوطی از این گازها باشند. ترکیبات گاز تولید شده در این فرایند بر حسب استفاده از هر یک عوامل اکسیدکننده هوا و بخار می‌تواند متفاوت باشد. علاوه بر این حضور  $CO_2$  جزو عوامل

اکسیدکننده می‌تواند موجب افزایش  $H_2$  و  $CO$  را در ترکیبات گاز تولیدی شود [۱۲]. برای تغییر شکل زغال، قیر و  $CH_4$  به  $H_2$  و  $CO$  نیز می‌توان از کاتالیزگرهایی مثل  $Ni/Al$  استفاده نمود. همان‌طور که قبلاً گفته شد استفاده از هر یک از عوامل اکسیدکننده به عنوان عامل تبدیل به گاز زیست توده تأثیرات مختلفی روی ترکیبات گاز تولیدی و همچنین ارزش حرارتی زیست توده دارد. به عنوان مثال اگر از عامل بخار به عنوان عامل گازی کننده<sup>۱</sup> زیست توده استفاده شود، ارزش حرارتی گاز تولیدی معمولاً بین  $10$  تا  $15$   $MJ/Nm^3$  و در صورتی که از عامل هوا استفاده شود این میزان بین  $3$  تا  $6$  خواهد بود. در جدول (۳-۱) ترکیبات و ارزش حرارتی گاز تولیدی از زیست توده در ازای تزریق سه عامل اکسیژن، هوا و بخار به عنوان عوامل گازی کننده زیست توده به داخل راکتور تبدیل کننده گاز نشان داده شده است [۱۳].

جدول (۳-۱): ترکیبات و ارزش حرارتی گاز تولیدی از یک زیست توده توسط سه عامل اکسیژن، هوا و

#### بخار [۱۳]

عامل	هوا	اکسیژن	بخار
ارزش حرارتی گاز تولید شده ( $MJ\ Nm^{-3}$ )	۴-۶	۱۰-۱۵	۱۵-۲۰
محصولات فرایند	$CO, H_2, CO_2, N_2, HC$ آب، قیر	$HC, CO_2, CO, H_2$	$CH_4, light\ HC, CO, H_2$ قیر
میانگین ترکیبات گاز تولیدی	$H_2 - 15\%$ $CO - 20\%$ $CH_4 - 2\%$ $CO_2 - 15\%$ $N_2 - 48\%$	$H_2 - 40\%$ $CO - 40\%$ $CO_2 - 20\%$	$H_2 - 40\%$ $CO - 25\%$ $CH_4 - 8\%$ $CO_2 - 25\%$ $N_2 - 2\%$
دمای راکتور $^{\circ}C$	۹۰۰-۱۱۰۰	۱۰۰۰-۱۴۰۰	۷۰۰-۱۲۰۰
هزینه	ارزان	گران	متوسط

<sup>۱</sup> Gasifying agent

دو پارامتری که جهت توصیف نرخ جریان عوامل اکسیدکننده (اکسیژن، هوا یا بخار) استفاده می‌شود نسبت هم ارزی (ER)<sup>۱</sup>، و سرعت سطحی (SV)<sup>۲</sup> هستند. (ER) به صورت نسبت نرخ جریان هوا، اکسیژن یا بخار به نرخ موردنیاز برای احتراق استوکیومتریک زیست توده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی میزان احتراق جزئی است و (SV) به صورت نسبت جریان هوا، اکسیژن یا بخار به سطح مقطع دستگاه تبدیل کننده گاز تعریف می‌شود که با نرمالایز کردن ابعاد دستگاه، بی بعد شده‌اند [۱۳]. در صورتی که از هوا به عنوان عامل گازی کردن استفاده شود، هوا اکسیژن لازم را برای فرایند احتراق تأمین می‌کند و به عنوان مثال تغییر در جریان هوا در راکتورهای بستر سیال، در درجه احتراق تأثیر خواهد گذاشت. همچنین این عامل در دمای فرایند تبدیل به گاز نیز تأثیر می‌گذارد. نرخ جریان بیشتر هوا موجب افزایش درجه حرارت شده و در نتیجه آن نرخ تبدیل زیست توده به گاز بیشتر می‌شود. افزایش نرخ تبدیل به گاز زیست توده تا زمانی امکان پذیر است که اکسیژن اضافی عرضه نشود زیرا موجب افزایش دمای بیش از حد احتراق زیست توده شده و باعث کاهش انرژی گاز تولیدی می‌شود. در صورتی که از جریان هوای بیشتری استفاده شود، زمان ماند کوتاه‌تر خواهد شد که این عامل ممکن است باعث کاهش تبدیل زیست توده به گاز شود. دیگر برگ خریدهایی که اهمیت دارند در تأثیر نسبت ER بر روی گاز تولیدی می‌توان به دما و نسبت بخار به زیست توده اشاره کرد. استفاده از عامل بخار موجب افزایش گاز H<sub>2</sub> در ترکیبات گاز تولیدی شود. دمای بخار معمولاً کمتر از دمای فرایند تبدیل به گاز است و در نتیجه حرارت زیادی برای بالا بردن دمای بخار نیاز است و البته این عامل شاید باعث کاهش دما در دستگاه تبدیل کننده و کاهش میزان تولید گاز شود. بنابراین می‌توان با پیش گرم کردن بخار و یا هر عامل گازی کننده قبل از ورود به تبدیل کننده‌ی گاز، دمای فرایند تبدیل به گاز را افزایش داد. دما یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ترکیبات گاز تولیدی در فرایند تبدیل به گاز

---

<sup>۱</sup> Equivalence ratio

<sup>۲</sup> Superficial velocity

زیست توده است [۱۲]. درجه حرارت بالاتر موجب بازده بالاتر تبدیل و در نتیجه آن افزایش بازده گاز تولیدی در ازای کاهش اجزای قیری خواهد شد.

## ۱-۴-۱ تکنولوژی تبدیل به گاز

انواع راکتورهای مناسب برای تبدیل زیست توده به گاز می‌توان به انواع بستر ثابت<sup>۱</sup> و بستر سیال<sup>۲</sup> بسته به حرکت نسبی بین جامد و گاز و چگالی توده فاز جامد در راکتور بستگی دارد. از انواع متداول دستگاه‌های تبدیل به گاز می‌توان از: راکتورهای بستر ثابت با جریان پایین‌رونده یا جریان موازی<sup>۳</sup>، بستر ثابت با جریان بالا رونده<sup>۴</sup>، بستر سیال حبابی<sup>۵</sup> و بستر سیال گردشی<sup>۶</sup> نام برد [۱۲]. به‌طور کلی یک تکنولوژی زیست توده برای همه کاربردها مناسب نیست. برای هر نوع دستگاه تبدیل‌کننده‌ی گاز یک محدوده‌ی کاربردی وجود دارد. تبدیل‌کننده‌های گاز بستر ثابت معمولاً در ابعاد کوچک برای شرایط عملکردی ۱۰ کیلووات تا ۱۰ مگاوات مناسب هستند. تبدیل‌کننده‌های گاز بالا رفت بستر ثابت اصولاً برای تبدیل کردن زغال سنگ به گاز در حدود ۱۵۰ سال استفاده می‌شدند. در شرایط تبدیل به گاز زیست توده، زیست توده به عنوان سوخت به بالای تبدیل‌کننده و هوا و اکسیژن به پایین تبدیل‌کننده تغذیه می‌شوند. سوخت (و در نتیجه زغال) توسط گرانش به آرامی به سمت پایین تبدیل‌کننده حرکت کرده و از میان نواحی خشک شدن<sup>۷</sup>، آتشکافت، گازی شدن و احتراق عبور می‌کنند [۱۲]. در شکل (۷-۱) طرح شماتیک چهار نوع تبدیل‌کننده گاز نشان داده شده است [۱۲].

---

<sup>۱</sup> Fixed bed

<sup>۲</sup> Fluidized bed

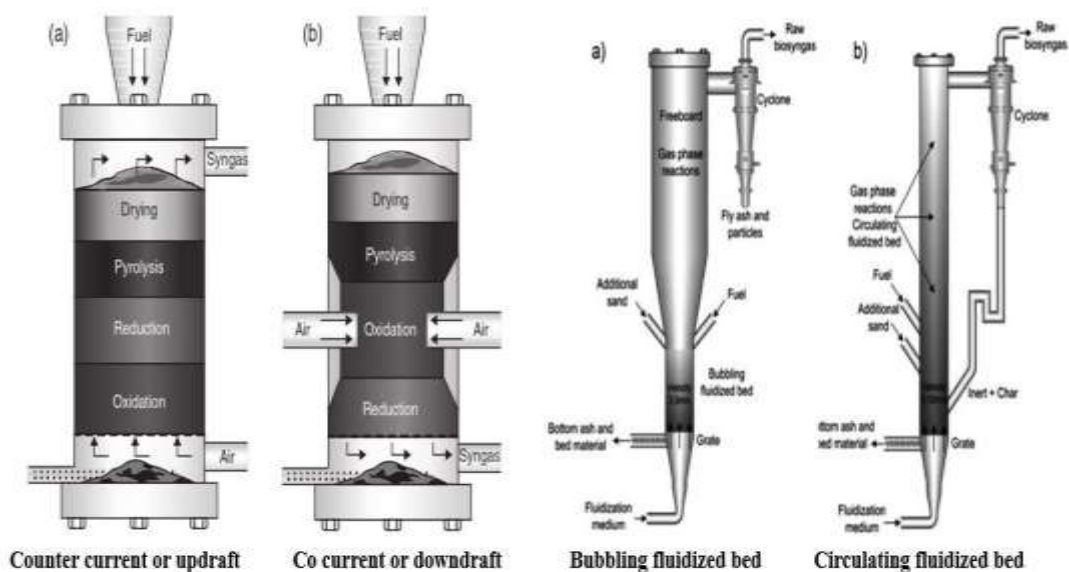
<sup>۳</sup> Downdraft or co-current fixed bed

<sup>۴</sup> Updraft or counter-current fixed beds

<sup>۵</sup> Bubbling fluidized beds or circulating fluidized beds

<sup>۶</sup> Circulating fluidized beds

<sup>۷</sup> Drying



شکل (۷-۱): طرح شماتیک انواع راکتورهای تولید کننده گاز به ترتیب از سمت راست: بستر سیال گردشی، بستر سیال حبابی، بستر ثابت با جریان بالا رونده و بستر سیال با جریان پایین رونده [۱۲] بخارهای تولید شده طی فرایند آتشکافت توسط گازهای داغ تولیدی به صورت موازی به سمت بالا حرکت می کنند و خاکسترها توسط یک سیستم تخلیه در پایین تبدیل کننده، تخلیه می شوند. در پایین ناحیه تبدیل به گاز، توسط هوا یا اکسیژن ورودی به دستگاه، فرایند اکسیداسیون جزئی روی زغال جامد از فرایند آتشکافت و قیر کراکینگ شده صورت می گیرد. بخار نیز ممکن است به منظور بیشتر نمودن مقادیر گاز  $H_2$  در گاز تولیدی در این فرایند اضافه شود. گرمای محسوس گازهای داغ تولیدی توسط خوراک سوخت ورودی به دستگاه دریافت شده و بنابراین فرایندهای خشک شدن، پیش گرم شدن و آتشکافت یا تجزیه در اثر حرارت، قبل از ورود به دستگاه روی آن انجام می شود. دمای گاز تولیدی به طور نسبی کم و در حدود ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد است. بنابراین از این گرما برای پیش گرم کردن، آتشکافت و خشک کردن سوخت ورودی استفاده می شود. بخش قابل توجهی از گاز تولیدی تبدیل کننده گاز بالارفت از قیرها و هیدروکربن ها تأمین می شود و این به ارزش حرارتی نسبتاً بالای گاز کمک می کند. در صورتی که فرایندهای بیشتری روی گاز تولیدی انجام شود، این گاز به میزان قابل توجهی نیاز به تصفیه شدن دارد. گاز تولید شده حاوی گردوغبار است. هرچند به واسطه تأثیر فیلترینگ فرایندهای خشک شدن، آتشکافت و در نتیجه سرعت پایین گاز مقدار آن کم است.

## ۱-۵ راکتورهای بستر ثابت

راکتورهای بستر ثابت با جریان پایین رونده اصولاً به منظور تولید گاز از زیست توده‌های با مواد فرار بالا توسعه داده شده‌اند. در راکتورهای با جریان پایین رونده سوخت زیست توده از بالای راکتور به داخل آن تزریق می‌شود. از ویژگی‌های این راکتور، هم‌جهت بودن حرکت مواد جامد و گاز تولیدی از آن‌ها داخل راکتور، دارای ساختار ساده و گاز تولیدی از آن‌ها نسبتاً تمیز است. اصولاً این راکتورها برای زیست توده‌های با درصد وزنی رطوبت بیش از ۲۵٪ و اندازه ذرات بین ۱۰ تا ۳۰۰ مناسب هستند و گاز تولیدی از زیست توده در این راکتورها دارای دمایی حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند. در راکتورهای بستر ثابت با جریان بالارونده مواد خام زیست توده از بالای راکتور و عوامل گازساز اکسیژن، هوا و بخار از ناحیه پایین راکتور به داخل آن تزریق می‌شوند. مواد خام زیست توده در این راکتورها، با تبادل حرارت با جریان گاز تولیدی راکتور در قسمت بالای آن، پیش گرم و خشک می‌شود و در نتیجه گاز خروجی از این راکتورها دارای درصد رطوبت بالاتر و دمایی پایین‌تری نسبت به گاز تولیدی از راکتورهای با جریان پایین رونده (۳۰۰-۶۰۰ سانتی‌گراد) هستند. راکتورهای با جریان بالارونده برای سوخت‌های با اجزای رطوبتی بالای ۶۰٪ با اندازه ذرات بین ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین این راکتورها برای طیف وسیعی از سوخت‌ها می‌تواند استفاده شود. از مزایای این نوع تبدیل‌کننده گاز می‌توان به ساختار ساده و بازده حرارتی بالای آن اشاره نمود [۱۲].

## ۱-۶ راکتورهای بسترسیال

اساس کار راکتورهای بسترسیال بر مبنای اصول سیال سازی است. در این راکتورها بخشی از بستر را با مواد دانه‌ای شکل مانند سیلیس یا ماسه‌های مقاوم پر می‌کنند و سرعت ورود عامل گاز ساز به داخل راکتور به گونه‌ای است که بستر راکتور حالت سیال به خود پیدا کند. بر اساس سرعت متوسط سیال سازی، راکتورهای بسترسیال به انواع راکتورهای بسترسیال حبابی و بسترسیال گردشی تقسیم می‌شوند. راکتورهای بسترسیال حبابی در سرعت‌های پایین جریان عامل گاز ساز عمل می‌کنند

(معمولاً کمتر از ۱ متر بر ثانیه). در صورتی که این میزان برای راکتورهای بسترسیال گردشی بیشتر است (بین ۳ تا ۱۰ متر بر ثانیه). در راکتورهای بسترسیال گردشی مواد جامد و گردوغبار موجود در گاز توسط سی کلون، جداسده و به پایین راکتور هدایت می‌شوند. از ویژگی‌های راکتورهای بسترسیال می‌توان به نرخ انتقال حرارت سریع به جرم، سرعت بالاتر گازی سازی زیست توده نسبت به راکتورهای بستر ثابت، مناسب برای زیست توده‌های با اندازه ذرات کمتر از ۵۰ میلی‌متر، محتوای بالای گردوغبار در گاز تولیدی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری پایین نسبت به راکتورهای بستر ثابت اشاره نمود [۱۲].

## ۱-۷ هضم

هضم بی‌هوازی یک فرایند بیولوژیکی است که منجر به تولید بیوگاز می‌شود. عملیاتی که بر روی زباله‌ها طی این فرایند توسط دو نوع باکتری در دمای ۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد یا ۵۰ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود: تجزیه مجموعه‌ی مواد آلی موجود در زباله‌ها توسط اسیدهایی که توسط باکتری‌ها تولید می‌شود به ترکیبات ساده‌تر که این مواد شامل اسیدهای فرار مثل استیک اسید و پروپیونیک می‌شوند و تبدیل این اسیدها توسط متان تولیدی باکتری‌ها به  $CO_2$  و  $CH_4$  که بیوگاز نامیده می‌شود. هر دو مرحله عمده‌تاً در یک تانک انجام شده و بیوگاز تولیدی اساساً شامل  $CH_4$  (۶۰٪)،  $CO_2$  (۳۵٪) و مخلوطی از  $H_2$ ،  $N_2$ ،  $NH_3$ ،  $CO$  و  $H_2S$  که حدود ۵٪ می‌شود. ارزش حرارتی بیوگاز تولیدی حدود  $22350 \text{ KJ/m}^3$  است. بازده هاضم<sup>۱</sup> تولیدکننده بیوگاز به صورت نسبت مواد فرار جامد تبدیل شده به گاز به مواد فرار جامد تغذیه شده به هاضم تعریف می‌شود. به عنوان مثال برای پسماندهای پیاز بازده هاضم در حدود ۵۴٪ است [۱۲]. هاضم‌ها یک سوخت تجدید پذیر در قالب  $CH_4$  که دارای پتانسیل بالاتری نسبت به  $CO_2$  برای گرمایش جهانی است، تولید می‌کنند. همه موادی که برای تولید بیوگاز در فرآیند هضم بی‌هوازی مورد استفاده

---

<sup>۱</sup> Digester



قرار می‌گیرند باید از دسته مواد آلی باشند که اساساً این مواد شامل پروتئین‌ها چربی‌ها و کربوهیدرات‌ها هستند. این مواد آلی توسط گروهی از باکتری‌ها در عدم حضور اکسیژن تجزیه می‌شوند که بازدهی فرایند هضم نیز متأثر از درجه حرارت هاضم، PH، نسبت کربن به نیتروژن، زمان ماند و وجود مواد سمی برای باکتری‌ها می‌باشد. از منابع اولیه برای تولید بیوگاز می‌توان به فضولات دامی، بقایای گیاهی، پسماندهای غذایی و مواد آلی فسادپذیر، مواد آلی فاضلاب‌ها و پسماندها و پساب‌های فرآورده‌های کشاورزی اشاره کرد [۱۲].

## ۸-۱ تخمیر

زیست توده همچنین می‌تواند در صورت تخمیر به سوخت‌های الکلی تبدیل شود. اگر فرض کنیم که ۵۰٪ زیست توده سلولز است و تمامی این سلولز به گلوکز قابل تخمیر باشد، پس از آن با واکنش  $C_6H_{12}O_6 + 3H_2O (L) = 3C_2H_5OH (L) + 3O_2$  or  $1\text{ kg cellulose} + 0.3\text{ kg of } H_2O = 0.77\text{ kg ethanol} + 0.53\text{ kg } O_2$ ، از هر تن زیست توده، ۱۲۴ گالن اتانول تولید می‌شود. با توجه به اینکه اندازه هر هکتار ۱۰۰۰۰ متر مربع است و تشعشع خورشیدی معادل  $1200\text{ W/m}^2$  و با در نظر گرفتن بازده فتوسنتز حدود ۶٪، ۱۴۶۰ تن زیست توده با ارزش حرارتی تقریبی  $2800000\text{ kJ/kmol}$  و وزن مولکولی  $180\text{ kg/kmol}$ ، هرساله در یک هکتار زمین تولید می‌شود. با مقایسه آن با Switchgrass که حدود ۳۷ تن در هکتار در هرسال تولید می‌شود، ماکزیمم اتانول تولیدی از آن حدود ۴۸,۱ مترمکعب (۱۸۳۰۰۰ گالن) در هر هکتار بارزش حرارتی  $7,37\text{ kJ/m}^3$  است. ارزش حرارتی بالای گازوئیل حدود  $32,9\text{ kJ/m}^3$  (۱۲۵۰۰۰ kJ/gallon) است. یک لیتر اتانول معادل ۰,۲۲ لیتر گازوئیل است [۱۲].

## ۹-۱ مزایا و معایب سوخت‌های زیست توده‌ای

از جمله مزایای استفاده از سوخت‌های زیست توده‌ای می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۱۶-۱۴]:

- دارا بودن منابع سوختی بی‌پایان و تجدید پذیر
- محتوای کم خاکستر و عناصر کربن، گوگرد، نیتروژن و عناصر کمیاب

- غلظت به طور معمول بالای مواد فرار، کلسیم، منیزیم، هیدروژن، اکسیژن و پتاسیم
- واکنش پذیری زیاد هنگام تبدیل
- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مثل  $CH_4$ ،  $CO_2$ ،  $NO_x$  و  $SO_x$
- حذف برخی از عناصر خطرناک توسط خاکستر در طول احتراق
- منابع به نسبت ارزان
- تنوع در عرضه سوخت و امنیت انرژی
- ایجاد مشاغل جدید
- پتانسیل استفاده از اقیانوس‌ها و خاک‌های با کیفیت پایین و احیاء و ترمیم زمین‌های تخریب‌شده و بلااستفاده
- کاهش پسماندهای حاوی زیست توده
- قابلیت احتراق هم‌زمان با سوخت‌های فسیلی به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهره‌برداری از مزایای اقتصادی
- زمینی که ممکن است برای اهدافی مثل کشاورزی، مسکن، رفت‌وآمد و دیگر مصارف استفاده شود می‌تواند به منظور بهره‌برداری از انرژی محصولات آن‌ها استفاده گردد.
- استفاده از مواد زباله‌ای به عنوان سوخت زیست توده‌ای موجب کاهش این مواد و ضایعات و دورریزها شده و فضای بیشتری را برای هر استفاده دیگری فراهم می‌کند.

از جمله معایب استفاده از سوخت‌های زیست توده‌ای نیز می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- سوخت‌های زیستی از نظر اقتصادی قابل رقابت با سوخت‌های معمولی مثل نفت، گاز، زغال سنگ نیستند همچنین هزینه‌های تولید برق از زیست توده نسبت به زغال سنگ نیز بیشتر است.
- غلظت انرژی پایین

- رقابت بالقوه با مواد غذایی و محصولات غذایی
- اگر به صورت مستقیم سوزانده شود می تواند به گرم شدن کره زمین کمک کند
- منابع زیست توده کاملاً پراکنده هستند و ممکن است مقادیر آنها برای ایجاد یک تغییر مهم به اندازه کافی نباشند.
- فرسایش خاک و از دست رفتن تنوع زیستی
- هزینه های زیاد جمع آوری، برداشت، ذخیره سازی و حمل و نقل

## ۱-۱۰ نیروگاه سیکل ترکیبی

نیروگاه سیکل ترکیبی تشکیل شده است از: یک توربین گاز، یک مولد بخار بازیاب گرما یا بویلر بازیاب حرارت، توربین های بخار، یک کندانسور، یک برج خنک کن و پمپ ها. در یک نیروگاه سیکل ترکیبی چرخه برایتون و برایتون با یکدیگر به منظور برآوردن تقاضای انرژی به طور مؤثر و کارآمد کار می کنند. یک نیروگاه گازی که با سیکل برایتون کار می کند، به دلیل محدودیت های دمایی که در ورود به توربین گاز وجود دارد، بازده حرارتی در حدود ۳۹٪ دارد. هر برنامه ای برای افزایش بازده نیروگاه به بیش از ۵۰٪ منجر به استفاده از سیکل دوتایی و ترکیبی که در آن دمای ورودی به توربین گاز می تواند تا ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد نیز باشد می شود. یک سیکل ترکیبی می تواند بازده ای بالاتر از جفت بازده سیکل برایتون با سیکل رنکین به دست آورد [۱۷]. سیکل ترکیبی در واقع از سیکل برایتون که در یک رژیم دمایی بالا و یک سیکل رنکین که در دمای پایین کار می کند بهره می برد. ضرورت کاهش آلاینده های گلخانه ای باعث شده تا نیروگاه سیکل ترکیبی به عنوان یکی از بهترین گزینه ها برای تولید انرژی به واسطه بازده بالاتر آن نسبت به دیگر نیروگاه های احتراقی انتخاب شود. توربین گاز همانند دیگر دستگاه های تولید نیرو است که گازهایی با دمای خروجی حدود ۴۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی گراد تولید می کند. پتانسیل بازیابی حرارت آشکار است و بسیاری از مطالعات تحقیقاتی به استفاده از پتانسیل گرمای تلف شده از سیکل برایتون انجام شده است. مولد

بخار بازیاب گرما به منظور تولید بخار برای سیکل رنکین یا بخار مصرفی فرایندهای صنعتی و یا سیستم‌های گرمایش محلی و خنک‌کنندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین بویلر بازیاب نقطه اصلی تمرکز سیکل ترکیبی است. برای یک توربین گاز معمولی تلفات حرارتی از گازهای خروجی آن ممکن است بیش از ۶۰٪ ارزش حرارتی پایین سوخت باشد. اگر بخشی از این حرارت اتلافی را بتوان به انرژی مفید تبدیل نمود، هم می‌توان بازده فرایند را بالاتر برد و هم از مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی آن بهره برد. بازیابی حرارت اتلافی اثر مستقیم بر بازده سیکل ترکیبی دارد. توسط این فناوری (مولد بخار بازیاب گرما) می‌توان هزینه تولید برق هر کیلووات ساعت را کاهش داد همچنین در مصرف انرژی اولیه صرفه جویی نمود [۱۸]. در یک سیکل ترکیبی، توربین گاز حدود ۶۶٪ از کل برق تولیدی را تولید می‌کند و باقی آن توسط توربین‌های بخار تأمین می‌شود. بخار نیز در مولد بخار بازیاب گرما در سطوح مختلف فشار، بسته به طراحی آن تولید می‌گردد [۱۷].

## ۱-۱۱ بویلر بازیاب حرارت

بویلر بازیاب حرارت یا مولد بخار تولیدکننده بخار یکی از مهم‌ترین اجزای نیروگاه سیکل ترکیبی است که تأثیر بسزایی روی بازده و هزینه کل نیروگاه دارد. بویلر بازیاب حرارت یک رابط بین سیکل گاز و سیکل بخار در نیروگاه سیکل ترکیبی است. با استفاده از بویلر بازیاب حرارت می‌توان گرمای حاصل از گازهای داغ خروجی از توربین گاز را جذب و از آن برای تولید بخار استفاده نمود. بویلر بازیاب از چهار جزء اصلی صرفه جو، تبخیرکننده، مافوق گرم‌کن و پیش گرم‌کن آب تشکیل شده است. این اجزا بر اساس شرایط عملکردی مورد نیاز کنار هم قرار می‌گیرند. انواع مدل‌های بویلر بازیاب را می‌توان برحسب جهت جریان گازهای خروجی از اگزوز یا تعداد سطوح فشار طبقه‌بندی نمود. بر اساس جریان گازهای خروجی از اگزوز، بویلر بازیاب به انواع افقی و عمودی تقسیم می‌شود و همچنین بر اساس سطوح فشار بویلر بازیاب را می‌توان در انواع یک فشاره و چند فشاره طبقه‌بندی نمود. در نوع افقی، جریان گازهای خروجی (از توربین گاز) به صورت افقی از روی لوله‌های عمودی عبور می‌کند

در حالی در نوع عمودی آن، جریان گازهای خروجی به صورت عمودی از روی لوله‌های افقی عبور می‌کند. در بویلر بازیاب تک فشاره تنها یک درام<sup>۱</sup> بخار وجود دارد و بخار در یک سطح فشار تولید می‌شود در حالی که بویلر های بازیاب چند فشاره از دو (دو فشاره) یا سه (سه فشاره) درام بخار استفاده می‌کنند. یک بویلر بازیاب سه فشاره از سه بخش فشار پایین، باز گرمایش / فشار متوسط و فشار بالا تشکیل شده است. هر بخش دارای یک درام بخار و اواپراتور است که آب را به بخار تبدیل می‌کنند سپس این بخار تولیدی توسط سوپرهیترها به دمایی بالاتر از دمای اشباع می‌رسد. دمای گازهای خروجی از بویلر بازیاب میزان انرژی جذب شده از جریان گازهای خروجی از توربین گاز را تخمین می‌زند و در واقع نشانگر عملکرد بویلر بازیاب است. بنابراین تلاش‌ها اغلب در راستای کاهش دمای دودکش بویلر بازیاب تا حدودی که هم از نظر هزینه‌ای مؤثر واقع شود و هم به لحاظ خوردگی مشکلی به وجود نیاید صورت می‌گیرد. اصلاح و تغییر شکل بویلر بازیاب حرارت تک فشاره به چند فشاره موجب افزایش بازده انرژی آن می‌گردد. برای همین منظور برای بازیابی گرمای بیشتر از گازهای خروجی از توربین گاز از بویلرهای بازیابی که بیش از یک سطح فشار دارند استفاده می‌شود [۱۹-۲۳]. با یک بویلر بازیاب تک فشاره، ۳۰٪ کل نیروی خروجی نیروگاه توسط توربین بخار تأمین می‌شود. در نوع دو فشاره می‌توان این نیروی تولیدی توسط سیکل بخار را تا ۱۰٪ افزایش داد. این میزان نیز در صورت استفاده از نوع سه فشاره تا ۳٪ افزایش پیدا می‌کند [۲۴]. از جمله عواملی که در عملکرد بویلر بازیاب تأثیر دارد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۵].

- دبی جرمی جریان گاز و جریان آب، دماها، فشار و ترکیبات گاز که در ازای هر سوخت متفاوت است.
- تغییرات دمای آب و هوا با توجه به تغییرات روزانه و فصلی دما
- رسوب از سطوح انتقال حرارت که با زمان تغییر می‌کند و منجر به تغییرات قابل توجهی در نرخ انتقال حرارت و افت فشار می‌گردد.

---

<sup>۱</sup> Drum

- هندسه بویلر بازیاب حرارت

- تغییرات و نوسان در شرایط گازهای خروجی از توربین گاز

دمای پایین گازهای خروجی از توربین گاز منجر به تولید کم بخار در اواپراتور بویلر بازیاب می‌گردد. بویلر بازیاب حرارت در صنایع مختلفی مثل صنایع نفتی، فرایندی و تولید نیرو کاربرد دارد. توسعه و بهینه سازی بویلر بازیاب حرارت موجب افزایش تولید نیرو و ضریب تأثیر هزینه در نیروگاه سیکل ترکیبی می‌شود. بهینه سازی دقیق بویلر بازیاب یک کار دشوار و وابسته به چندین متغیر است. این متغیرها شامل تعداد سطوح فشار، اختلاف دماها، فشارها، نسبت دبی جریان و دمای ورودی به بویلر بازیاب می‌شود. یکی از روش‌های نظری پیشنهادی برای ماکزیمم کردن راندمان بویلر بازیاب، افزایش دمای ورودی به توربین گاز است. برخی از انواع بویلرهای بازیاب حرارت دارای آتش مکمل<sup>۱</sup> یا مجزا<sup>۲</sup> هستند. این مشعل‌های اضافی، انرژی بیشتری برای بویلر بازیاب فراهم می‌کند که موجب افزایش تولید بیشتر بخار و در نتیجه افزایش توان تولیدی توربین بخار می‌شود.

## ۱-۱۱ ملاحظات طراحی بویلر بازیاب

در طراحی یک بویلر بازیاب نکات مهمی که بایستی در نظر گرفته شوند در زیر آورده شده است [۲۶].

### ۱-۱۱-۱ مولد بخار چند فشاره

این عامل به طور فزاینده‌ای در حال عمومی شدن است. در یک بویلر تک فشاره محدودیت برای بازیابی گرما وجود دارد زیرا در این حالت دمای گازهای خروجی نمی‌تواند به پایین‌تر از دمای اشباع (آب) کاهش پیدا کند. این مشکل با استفاده از سطوح فشار چندگانه برطرف می‌شود [۲۶].

---

<sup>۱</sup> Duct firing

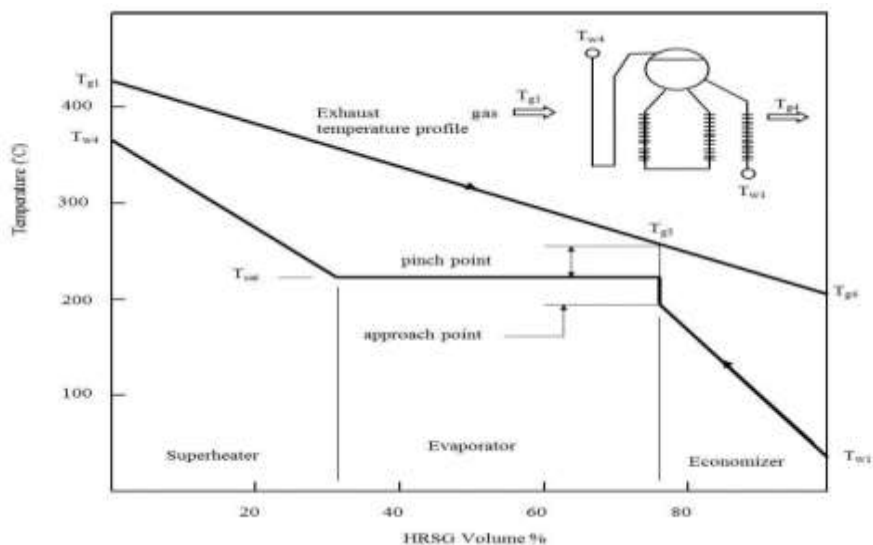
<sup>۲</sup> Supplemetary firing

### ۱-۱۱-۲ نقطه پینچ (Pinch point)

نقطه پینچ به عنوان اختلاف دمای جریان گاز خروجی از بخش اواپراتور با دمای بخار اشباع تعریف می‌شود. در حالت ایده آل نقطه در صورتی که نقطه پینچ پایین‌تر باشد، گرمای بیشتری بازیابی می‌شود. اما این امر به سطوح انتقال حرارت بیشتری نیاز دارد و در نتیجه آن میزان افت فشار و هزینه افزایش خواهد یافت و همچنین نقطه پینچ بیش از حد پایین می‌تواند به معنی تولید ناکافی بخار در اثر انرژی کم گازهای خروجی از بویلر بازیاب حرارت (دبی جرمی پایین یا دمای پایین گازهای خروجی) باشد. [۲۶].

### ۱-۱۱-۳ نقطه رویکرد (Approach point)

نقطه رویکرد به صورت اختلاف دمای بخار اشباع با آب ورودی تعریف می‌شود. نقطه رویکرد پایین‌تر می‌تواند منجر به افزایش تولید بخار شود اما در این صورت مقدار هزینه افزایش پیدا می‌کند. اما در دمای رویکرد بالا این اطمینان حاصل می‌شود که هیچ بخاری در صرفه‌جو تولید نمی‌شود. در شکل (۸-۱) نقطه رویکرد و نقطه پینچ در دیاگرام دمایی جریان گاز و جریان آب-بخار بویلر بازیاب تک فشاره نشان داده شده است [۲۶].



شکل (۸-۱): نقطه رویکرد و نقطه‌ی پینچ در دیاگرام دمایی جریان گاز و جریان آب- بخار بویلر بازیاب [۲۷]

مقادیر کم نقطه پینچ و نقطه رویکرد به معنی کاهش دیفرانسیل دما در اواپراتور و صرفه‌جو است. این عامل باعث نیاز به سطوح انتقال حرارت بیشتر و افزایش میزان افت فشار گاز و در نهایت افزایش هزینه بویلر بازیاب می‌شود. با این حال دمای پایین‌تر گازهای خروجی می‌تواند منجر به تولید بیشتر بخار شود. با استفاده از ارزیابی‌های اقتصادی می‌توان به ترکیب بهینه‌تری از سطوح انتقال حرارت، افت فشار گاز و تولید بخار (منعکس‌کننده‌ی هزینه‌های عملکردی/نگهداری) دست یافت [۲۶].

### ۱۱-۴ تأثیر دمای محیط در عملکرد بویلر بازیاب حرارت

توان خروجی توربین گاز بدون سرمایه‌ش و یا تهویه هوای ورودی به آن باعث کاهش آن می‌گردد زیرا در دمای هوای بالا چگالی هوا کاهش پیدا کرده و در نتیجه از میزان دبی جرمی ورودی به توربین گاز کاسته شده و باعث کاهش توان خروجی توربین گاز می‌شود. این توان خروجی می‌تواند بین ۱۵٪ تا ۲۵٪ از سردترین دما تا گرم‌ترین دما کاهش پیدا کند. جریان گازهای خروجی از توربین گاز و همچنین تجزیه تحلیل آن با تغییرات دمای محیط، تغییر پیدا می‌کند که این عامل بر روی عملکرد بویلر بازیاب تأثیر می‌گذارد [۲۸]. در جدول (۴-۱) اطلاعات عملکرد توربین گاز LM5000 نشان داده شده است.

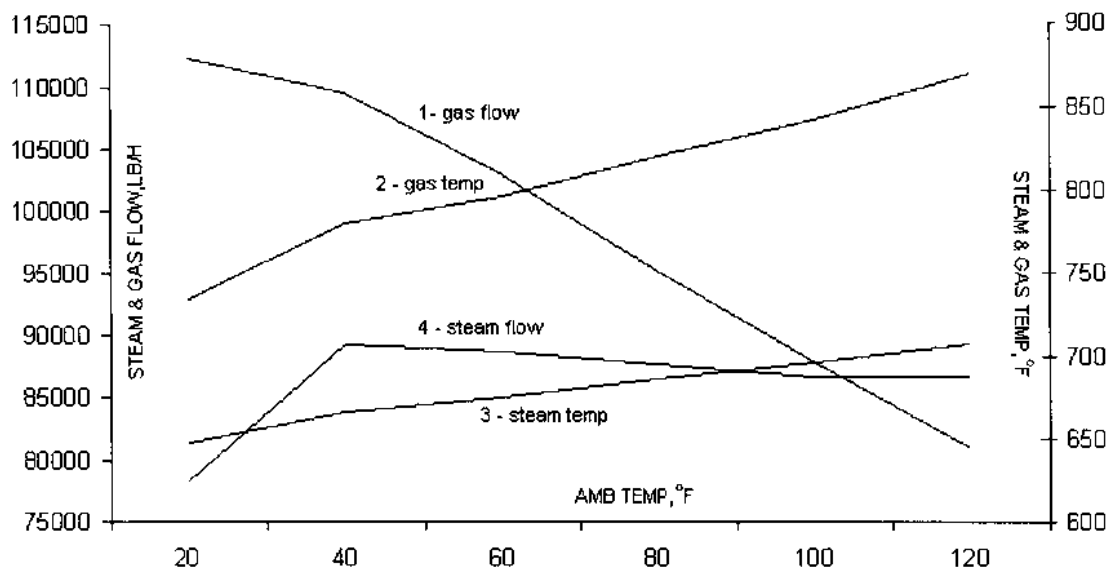
جدول (۴-۱): اطلاعات عمومی عملکرد توربین گاز LM5000 در شرایط دمایی مختلف [۲۸]

دما (°F)	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
توان تولیدی (kW)	۳۸۱۵۰	۳۸۶۰۰	۳۵۰۲۰	۳۰۸۲۰	۲۷۳۶۰	۲۴۰۴۰
نرخ انتقال حرارت (BTU/kWh)	۹۳۸۴	۹۴۴۲	۹۶۴۹	۹۹۶۰	۱۰۲۵۷	۱۰۵۹۸
دمای گازهای خروجی (°C)	۳۹۰	۴۱۵،۵	۴۲۵	۴۳۷،۷	۴۵۰،۵	۴۶۵



جریان گازهای خروجی (lb/h)	۸۱۰۰۰۰	۸۷۸۴۰۰	۹۵۰۴۰۰	۱۰۲۹۶۰۰	۱۰۹۴۴۰۰	۱۱۲۳۲۰۰
%vol CO <sub>2</sub>	۲,۷	۲,۷	۲,۸	۲,۸	۲,۹	۲,۷
%vol H <sub>2</sub> O	۱۲,۸	۱۰,۵	۹,۲	۸,۵	۸,۲	۷,۶
%vol N <sub>2</sub>	۱۳,۷	۱۴	۱۴,۲	۱۴,۳	۱۴,۳	۱۴,۶
%vol O <sub>2</sub>	۷۰,۸	۷۲,۸	۷۳,۸	۷۴,۴	۷۴,۷	۷۵,۱

عملکرد بویلر بازیاب حرارت تحت شرایط دمایی محیطی مختلف در شکل (۹-۱) نشان داده شده است [۲۸].



شکل (۹-۱): عملکرد بویلر بازیاب حرارت تحت شرایط دمایی محیطی مختلف، جریان گاز نشان داده شده در عامل ۰,۱ ضرب شده است [۲۸]  
 نتایج در شکل (۹-۱) نشان‌دهنده تغییرات زیاد در عملکرد بویلر بازیاب حرارت بین ماه‌های زمستان و تابستان است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است جریان گاز ورودی به بویلر بازیاب و همچنین بخار تولیدی توسط آن با افزایش دمای محیط کاهش پیدا کرده است [۲۸].

## ۱-۱۱-۵ تأثیر بار توربین گاز در عملکرد بویلر بازیاب حرارت

به‌طور کلی توربین‌های گاز در بارهای کم کار می‌کنند. این عامل نه تنها عملکرد خود آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد بلکه در عملکرد بویلر بازیاب حرارت که پشت آن قرار دارد نیز تأثیر می‌گذارد. زیرا در شرایط دمایی پایین گازهای خروجی (از توربین گاز) که در نتیجه شرایط بار پایین است، بویلر بازیاب بخار کمتری تولید می‌کند. به علاوه در این شرایط پتانسیل تولید بخار در صرفه‌جو وجود دارد. جدول (۱-۵) جریان گازهای خروجی از یک توربین گاز کوچک و دمای آن‌ها برحسب تابعی از شرایط بار توربین گاز نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به دمای پایین گازهای خروجی از توربین گاز و دبی جرمی پایین گازهای خروجی از آن، در بارهای پایین عملکرد بویلر بازیاب نیز ضعیف‌تر خواهد بود [۲۸].

جدول (۱-۵): عملکرد یک نمونه توربین گاز در بارهای مختلف [۲۸]

بار %	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۱۰۰
توان تولیدی (kW)	۴۱۵	۸۳۰	۱۲۴۴	۱۶۵۹	۴۱۴۷
نرخ انتقال حرارت (BTU/kWh)	۴۸۶۰۵	۲۸۵۹۵	۲۱۹۶۰	۱۸۶۴۹	۱۲۸۸۲
بازده %	۷	۱۲	۱۵،۵۴	۱۸،۳	۲۶،۵
جریان گازهای خروجی (lb/h)	۱۴۷۹۶۰	۱۴۸۰۶۸	۱۴۸۱۷۰	۱۴۸۳۲۰	۱۴۸۷۶۸
دمای گازهای خروجی (°C)	۲۹۴	۳۲۲	۳۵۰	۳۷۷	۵۴۸
%vol CO <sub>2</sub>	۱،۱۸	۱،۳۸	۱،۵۹	۱،۷۹	۳،۰۴
%vol H <sub>2</sub> O	۳،۷۶	۴،۱۴	۴،۵۳	۴،۹۳	۷،۳۳
%vol N <sub>2</sub>	۱۸،۱۸	۱۷،۷۸	۱۷،۲۸	۱۶،۶۸	۱۴،۱۳
%vol O <sub>2</sub>	۷۶،۹	۷۶،۷	۷۶،۶	۷۶،۴	۷۵،۵

با مشاهده جدول (۸-۱) می‌توان به این نکته پی برد که با کاهش میزان بار توربین گاز از مقدار دبی جرمی جریان گاز به میزان ناچیزی کاسته شده است در صورتی که دمای گازهای خروجی کاهش قابل توجهی داشته است [۲۸]. عملکرد بویلر بازیاب حرارت در شرایط ۱۰۰٪ بار و ۴۰٪ بار در اشکال (۱۴-۱) و (۱۵-۱) نشان داده شده است. بویلر بازیاب برای شرایط ۱۰۰٪ بار طراحی شده است و تخمین عملکرد بویلر بازیاب در شرایط ۴۰٪ بار با استفاده از برنامه‌ی بویلر بازیاب انجام شده است. در شرایط بار کم ممکن است در صرفه‌جو ممکن است بخار تولید شود. همچنین دمای گازهای خروجی از بویلر بازیاب در بارهای کم نسبت به حالت عادی بسیار بالا است. این بدان معنی که بخار کمتری در این شرایط در اواپراتور تولید شده و بنابراین مقدار جریان نیز در صرفه‌جو کم است و این منجر به افت دمای کوچکی (در صرفه‌جو) می‌شود [۲۸]. در شرایط بار کم توربین گاز، جذب حرارت از گازهای داغ خروجی از بویلر بازیاب توسط صرفه‌جو آن قدر نیست که بتواند تا دماهای پایین آن را خنک کند. بنابراین توصیه می‌شود که بویلر بازیاب در شرایط بارهای کم توربین گاز برای مدت طولانی کار نکند. در صورت نیاز به کارکرد بویلر بازیاب در شرایط بار کم می‌توان از دمپر گاز استفاده نمود [۲۸].

### ۱-۱۱-۶ تأثیر فشار بخار در عملکرد بویلر بازیاب حرارت

نیروگاه‌های سیکل ترکیبی امروزه در فشارهای متغیر عمل می‌کنند. اگر بخار خروجی (از به ویلر بازیاب) در یک فشار معین و مناسب برای روند فرایند باشد آنگاه ممکن است یک فشار ثابت برای ورود به توربین بخار باشد مورد نیاز باشد. تغییرات زیاد در فشار بخار بر روی حجم مخصوص بخار تأثیر گذاشته و این عامل نیز به نوبه خود در سرعت جریان و افت فشار در لوله‌های سوپرهیتر ولوله‌ها و شیرآلات و غیره تأثیر می‌گذارد. همچنین تغییرات زیاد در فشار بخار بر روی دمای اشباع در درام بخار تأثیر گذاشته و این عامل موجب تنش‌های دمایی در هدر<sup>۱</sup> سوپرهیتر و درام شده و باعث محدود کردن تغییرات سرعت تغییر بار می‌شود [۲۸]. عملکرد فشار متغیر باعث افزایش راندمان توربین در

---

<sup>۱</sup> header

بارهای پایین به علت کاهش میزان تلفات آن و همچنین کاهش هزینه پمپاژ کردن در صورت استفاده از پمپ‌های سرعت متغیر می‌گردد. فشار بخار در ورود به توربین بخار به صورت خطی با افزایش میزان بار افزایش می‌یابد در صورتی که بخار خروجی از بویلر بازیاب حرارت با افزایش میزان فشار بخار کاهش می‌یابد. با تطبیق ویژگی‌های بویلر بازیاب حرارت و توربین بخار می‌توان به نقاط عملکردی واحد در بارهای مختلف رسید. از آنجایی که در طول شرایط عملکردی فشار متغیر تغییرات زیادی در فشار درام رخ می‌دهد، بایستی از طریق جبران فشار، سطح درام را کنترل نمود. به عنوان مثال با استفاده از برنامه‌ی شبیه سازی شده بویلر بازیاب حرارت اثرات فشار بخار روی عملکرد یک بویلر بازیاب تک فشاره محاسبه شده و نتایج آن در جدول (۶-۱) نشان داده شده است [۲۸].

جدول (۶-۱): تأثیر فشار بخار بر عملکرد بویلر بازیاب حرارت [۲۸]

فشار (psia)	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰
جریان بخار (lb/h)	۶۹۹۰۰	۶۸۲۲۵	۶۷۳۲۰	۶۶۸۰۰
دمای بخار (°C)	۴۲۶	۴۲۷	۴۲۶	۴۲۶
دمای گازهای خروجی (°C)	۱۷۸	۱۸۹	۱۹۷	۲۰۵
نرخ انتقال حرارت (BTU/h)	۸۵,۲	۸۲,۹	۸۱	۷۹,۶

با مشاهده نتایج جدول (۶-۱) می‌توان به نکات زیر پی برد [۲۸]:

- با افزایش فشار بخار که باعث افزایش دمای اشباع و در نتیجه محدودتر شدن پروفیل دمایی می‌گردد میزان بخار تولیدی نیز کاهش پیدا می‌کند.
- دمای گازهای خروجی به علت افزایش دمای بخار اشباع در فشارهای بالاتر، افزایش پیدا می‌کند.
- دمای بخار تغییر چندانی پیدا نمی‌کند.

- میزان انرژی و حرارت جذب شده توسط بخار با افزایش فشار بخار به علت افزایش دمای گازهای خروجی از بویلر بازیاب حرارت کاهش پیدا می کند.

## ۱-۱۲ جمع بندی

در قسمت های پیشین ابتدا در مورد زیست توده، منابع زیست توده، تکنولوژی های استحصال انرژی از زیست توده و مزایا و معایب آن گفته شد. در ادامه بویلر بازیاب حرارت معرفی شده و عوامل مؤثر در عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. در فصل بعد بخشی از کارهای پیشین در زمینه های زیست توده، تکنولوژی های استحصال انرژی از آن و همچنین بویلر بازیاب حرارت ارائه شده است.



فصل دوم

مروری بر کارهای پیشین

## ۱-۲ مقدمه

در این فصل در ابتدا، به تحقیقات انجام شده در زمینه زیست توده و تکنولوژی‌های استحصال انرژی از زیست توده و سپس قسمتی از نتایج مطالعات صورت گرفته در زمینه بهینه سازی انواع بویلر بازیاب حرارت پرداخته شده است. در پایان نیز کار بررسی شده در این تحقیق معرفی شده است.

## ۲-۲ مروری بر تعدادی از کارهای انجام شده در زمینه زیست توده

در این قسمت مقالات مختلف در زمینه زیست توده و تکنولوژی‌هایی که توسط آنها می‌توان زیست توده را به سوخت گازی تبدیل نمود پرداخته شده است. انواع مختلف زیست توده که توسط دستگاه‌های مختلف تبدیل به گاز و توسط سیال‌های عامل متنوع طی شرایط متفاوت تبدیل به گاز، به سوخت گازی تبدیل شده‌اند در مقالات مختلف بررسی شده‌اند.

## ۳-۲ تحقیقات انجام شده در راستای تبدیل انواع مختلف زیست توده به سوخت گازی

سایدور<sup>۱</sup> و همکاران [۲۹] به جنبه‌های مختلف زیست توده که در ارتباط با سوزاندن آن در بویلر است پرداخته‌اند. از جمله موارد بررسی شده توسط آنها می‌توان به: ترکیبات زیست توده، تخمین ارزش حرارتی زیست توده، مقایسه زیست توده و دیگر سوخت‌ها، احتراق زیست توده، احتراق هم‌زمان زیست توده و زغال سنگ، اثرات زیست توده، تجزیه و تحلیل اجتماعی زیست توده، حمل و نقل زیست توده، غلظت زیست توده و مشکلات و آینده زیست توده اشاره کرد. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از زیست توده در بویلر بسیاری مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی مثل

---

<sup>۱</sup> R. Saidur



صرفه‌جویی اقتصادی، حفاظت از منابع سوخت‌های فسیلی، ایجاد فرصت‌های شغلی و کاهش انتشار  $\text{CO}_2$  و  $\text{NO}_x$  دارد. هرچند که بایستی به دیگر اثرات زیست محیطی زیست توده مثل زمین و منابع آبی، فرسایش خاک، از دست رفتن تنوع زیستی، جنگل‌زدایی، بازاریابی، ارزش حرارتی پایین آن، ذخیره و نگهداری که از مشکلات پیرامون احتراق زیست توده در بویلرهاست توجه نمود.

مایون هی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴] استحصال گاز غنی شده از هیدروژن از تبدیل کردن زباله‌های شهری جامد توسط عامل بخار را مورد بررسی قرار دادند و تأثیر کاتالیزور و دما را روی بازده و ترکیبات گاز تولیدی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها گازی کردن زباله‌های شهری جامد را توسط عامل بخار به‌منظور تولید گاز غنی شده از هیدروژن ( $\text{H}_2 + \text{CO}$ )، با کاتالیزور دولومیت آهکی شده در یک تبدیل‌کننده‌ی گاز بستر ثابت با جریان پایین‌رونده مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. در این تحقیق تأثیر کاتالیزور و دمای راکتور تبدیل‌کننده گاز روی بازده و گاز تولیدی در محدوده دمایی ۷۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت بخار به زباله جامد شهری ۰٫۷۷، در شرایط سرعت دوره‌ای  $1,29 \text{ h}^{-1}$  انجام شده است. در خارج از شرایط آزمایشگاهی آن‌ها نشان دادند که دولومیت آهکی عملکرد بهتری به عنوان کاتالیزور در حضور بخار دارد و قیر (حاصل از زیست توده در طی فرایند تبدیل به گاز) در این شرایط و با افزایش دما از ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد به طور کامل تجزیه می‌شود. نتایج کار آن‌ها نشان داد که افزایش دما (دمای راکتور) منجر به افزایش گاز هیدروژن و مونواکسید کربن در محصولات گاز تولیدی، بازده بیشتر تبدیل کربن و گاز خشک تولیدی بیشتر می‌شود. بیشترین میزان گاز هیدروژن در ترکیبات گاز تولیدی ۵۳٫۲۹٪ مولی و بیشترین میزان تولیدی این گاز، ۳۸٫۶ مول گاز هیدروژن در ازای یک کیلوگرم زباله شهری جامد در بالاترین سطح دمایی (۹۵۰ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. گاز تولید شده از زباله شهری جامد در این فرایند توسط عامل بخار در محدوده‌ی بین ۳۶٫۳۵٪ مولی تا ۷۰٫۲۱٪ مولی متغیر است.

---

<sup>۱</sup> Maoyun He

دوناتلی<sup>۱</sup> و همکاران [۳۰] تحقیقات عددی و تجربی را به منظور تولید گازی با انرژی و ارزش حرارتی بالا از تبدیل ضایعات لاستیک به گاز توسط عامل بخار در دستگاه تبدیل کننده گاز کوره دوار انجام داده‌اند. آن‌ها نتایج عددی و تجربی حاصل از تبدیل ضایعات لاستیک خودرو به سوخت گازی توسط عامل بخار در تبدیل کننده گاز کوره دوار را ارائه کردند. در این تحقیق عملکرد فرایند و ویژگی‌های گاز در شرایط مختلف نسبت تغذیه (FR) که به صورت نسبت جرمی بخار بخش بر جرم لاستیک (جرم لاستیک/جرم بخار) تعریف می‌شود، ارزیابی شده است. آن‌ها در ابتدا چندین آزمون تجربی انجام داده‌اند سپس نتایج تجربی بدست آمده به منظور بررسی سازگاری با یک مدل عددی توسعه یافته شده توسط کد تجاری Chemcad استفاده کرده‌اند. آن‌ها همچنین اثر افزایش نسبت تغذیه را بر میزان انرژی گاز تولیدی محاسبه نموده‌اند. نتایج عددی آن‌ها نشان داد که با افزایش میزان نسبت تغذیه میزان انرژی گاز تولیدی نیز افزایش می‌یابد. بیشترین انرژی گاز تولیدی در نسبت تغذیه ۰,۳۳ بدست آمد که در این نسبت گاز تولیدی دارای ترکیباتی با نسبت حجمی  $\text{H}_2 = 52.7\% \text{ vol}$ ,  $\text{CO} = 18.1\% \text{ vol}$ ,  $\text{CO}_2 = 7\% \text{ vol}$ ,  $\text{CH}_4 = 22.2\% \text{ vol}$  است ضمن اینکه ارزش حرارتی پایین گاز تولیدی نیز معادل ۲۹,۵ مگاژول بر کیلوگرم محاسبه شده است. نسبت بالاتر تغذیه نیز منجر به افزایش بیشتر محتوای انرژی گاز نمی‌شود.

گالوانگو<sup>۲</sup> و همکاران [۳۱] فرایند تبدیل به گاز ضایعات لاستیک خودرو، سوخت مشتق زباله و چوب صنوبر را توسط عامل بخار مورد تحلیل و بررسی و مقایسه قرار دادند. آن‌ها این سه نوع سوخت را با هدف میزان گاز تولیدی، ترکیبات گاز تولیدی و باارزش‌ترین ترکیبات گاز تولیدی مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. آن‌ها به منظور مقایسه دقیق بین این سه زیست توده شرایط تبدیل به گاز را برای هر سه یکسان در نظر گرفتند. داده‌های تجربی حاصل از کار آن‌ها نشان داد که با ثابت در نظر گرفتن تمامی پارامترهای عملکردی فرایند، محصول تولیدی و ترکیبات تشکیل دهنده آن تا حد زیادی

---

<sup>۱</sup> Donatelli

<sup>۲</sup> Galvagno

وابسته به ماده اولیه است. آن‌ها برای مقایسه ترکیبات گاز تولیدی بین این سه زیست توده از واحد متر مکعب گاز بر جرم زیست توده‌ی جامد ( $m^3$  of gas/ kg of feed) استفاده نمودند. نتایج تجربی کار آن‌ها نشان داد که محتوای انرژی گاز تولیدی از ضایعات لاستیک حدود ۲۵,۳۳ مگاژول بر متر مکعب و برای سوخت مشتق زباله و چوب صنوبر به ترتیب برابر با ۱۷,۸ و ۱۳,۴ مگاژول بر متر مکعب به دست آمد.

پراکاش<sup>۱</sup> و شیبا<sup>۲</sup> [۳۲] تولید هیدروژن از فرایند تبدیل به گاز زیست توده توسط عامل بخار و تأثیر پارامترهای فرایند روی هیدروژن تولیدی را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. آن‌ها طی تحقیقات خود به این نکته پی بردند که استفاده از عامل بخار در فرایند تبدیل زیست توده به سوخت گازی یکی از کارآمدترین و مؤثرترین روش‌ها به منظور تولید هیدروژن از زیست توده است. از بین فرایندهای ترموشیمیایی، تبدیل به گاز زیست توده توسط عامل بخار بیشترین بازده استوکیومتریک یا محصول تولیدی هیدروژن را ارائه می‌دهد. آن‌ها همچنین تأثیر عوامل متعددی که در محصول هیدروژن در فرایند تبدیل به گاز زیست توده توسط عامل بخار وجود دارد بررسی نموده‌اند. برخی از این عوامل برجسته عبارت‌اند از: نوع زیست توده، اندازه ذرات مواد زیست توده، دمای واکنش، نسبت بخار به زیست توده، استفاده از کاتالیزگر و مواد جذب کننده نسبت به زیست توده. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کاهش اندازه ذرات زیست توده موجب بازده هیدروژن تولیدی بیشتر و همچنین بازده گاز خشک بیشتر و بازده تبدیل کربن بیشتر می‌گردد. همچنین افزایش دما نیز موجب افزایش بازده هیدروژن تولیدی می‌گردد. نسبت بخار به زیست توده نیز تأثیر مهمی در ترکیبات گاز تولیدی دارد و افزایش میزان بخار موجب تشکیل هیدروژن و متان بیشتر در محصولات گاز تولیدی می‌گردد.

---

<sup>۱</sup> Prakash Parthasarathy

<sup>۲</sup> Sheeba Narayanan

کونگ<sup>۱</sup> و سونگ<sup>۲</sup> [۳۳] احتراق و انتشار NO<sub>x</sub> از گاز سنتز شده از زیست توده در شرایط مختلف گازی کردن آن توسط عوامل اکسیژن غنی شده هوا و بخار را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. آن‌ها هدف از تحقیق خود را پیرامون بررسی انتشار NO<sub>x</sub> از احتراق گاز تولید شده از سه زیست توده چوب کاج، چوب افرا-بلوط و دانه ذرت در شرایط مختلف تبدیل به گاز توسط عوامل اکسیژن، هوا و بخار انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق گازی کردن این سه زیست توده در سه حالت مختلف استفاده از عوامل اکسیژن، هوا و بخار مورد آزمون قرار دادند و نتایج حاصل از گاز سنتز شده را در نه مجموعه مختلف طبقه‌بندی نمودند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که انتشار NO<sub>x</sub> از گاز سنتز شده از زیست توده‌های چوبی به صورت خطی با کاهش مخلوط احتراق و کاهش نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در مقایسه با گاز طبیعی، گاز تولید شده از زیست توده‌های چوبی NO<sub>x</sub> بیشتری تا زمانی که نرخ انتقال حرارت آن‌ها قابل مقایسه باشد تولید می‌کنند. این نشان می‌دهد که تشکیل NO<sub>x</sub> از گاز سنتز شده از زیست توده یک عامل مهم در احتراق آن‌ها محسوب می‌شود. در بین سه زیست توده مقایسه شده دانه ذرت دارای بیشترین محتوای نیتروژن و دارای بیشترین میزان غلظت آمونیاک در گاز تولیدی و در نتیجه بیشترین میزان انتشار NO<sub>x</sub> در تمامی شرایط آزمون بود. آن‌ها میزان NO<sub>x</sub> منتشر شده از احتراق گاز سنتز شده از دانه‌های ذرت را در محدوده بین ۴۵۰ تا ۹۰۰ ppm بدست آوردند که این میزان در مقایسه با دو زیست توده چوبی دیگر بالاتر بود.

سرجیو<sup>۳</sup> و همکاران [۳۴] تأثیر دما روی محصول و ترکیبات گاز تولیدی از سوخت مشتق زباله را توسط عامل بخار مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌ها تجربی را پیرامون گازی کردن سوخت مشتق زباله در محدوده دمای بین ۸۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد در تبدیل‌کننده گاز کوره دوار در مقیاس آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که با افزایش دما بازده گاز تولیدی و در نتیجه آن محتوای هیدروژن در ترکیبات گاز تولیدی نیز افزایش می‌یابد.

---

<sup>۱</sup> Cuong

<sup>۲</sup> Song

<sup>۳</sup> Sergio

چانچال<sup>۱</sup> و همکاران [۳۵] تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی تولید هیدروژن غنی شده از گاز سنتز شده از سبوس برنج در تبدیل کننده گاز بسترسیال انجام دادند. در این تحقیق یک مدل تعادلی بر اساس یک ثابت تعادل و موازنه مواد به منظور پیش بینی ترکیبات گاز توسعه داده شده است. ترکیبات گاز با داده‌های تجربی و همچنین منابع موجود مقایسه شده‌اند. آن‌ها تجزیه و تحلیل‌های انرژی و اگزرژی فرایند در نسبت‌های مختلف بخار به زیست توده (۱/۱) در محدوده ۰,۱ تا ۱,۵ و محدوده دمایی فرایند تبدیل به گاز ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که بازده‌های انرژی و اگزرژی در نقطه مرزی کربن (CFB) ماکزیمم هستند هرچند که تولید هیدروژن در حوالی نقطه مرزی کربن افزایش می‌یابد. نتایج آن‌ها نشان داد که ارزش حرارتی بالا با افزایش میزان نسبت بخار به زیست توده می‌یابد در صورتی که تولید هیدروژن از همان ابتدا با افزایش دما تا بیش از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و پس از آن تقریباً یکنواخت می‌گردد. همچنین ارزش حرارتی بالای گاز تولیدی به سرعت با افزایش دما کاهش می‌یابد و انرژی ورودی نیز در این شرایط افزایش می‌یابد. بنابراین تبدیل به گاز در شرایط دمایی پایین هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است هم از لحاظ ارزش حرارتی بالای گاز تولیدی.

چادھاری<sup>۲</sup> و همکاران [۳۶] تولید هیدروژن و یا (H<sub>2</sub>+CO) از زغال مشتق شده از زیست توده را توسط عامل بخار مورد تحقیق و بررسی قراردادند. آن‌ها گازی کردن زغال تفاله نیشکر که از پسماندهای طبیعی کانادا به دست آمده و زغال تجاری که از آشکافت سریع زیست توده طی یک فرایند خاص به دست آمده است در دماهای ۷۰۰، ۷۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در میکرو راکتور تبدیل کننده گاز در نسبت‌های مختلف جریان بخار به زیست توده مورد ارزیابی قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ماکزیمم تبدیل برای زغال تفاله نیشکر حدود ۸۰٪ در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و در نسبت جریان بخار به زغال ۱۰ (10 g/h/g of coal) در حالی که برای زغال تجاری ماکزیمم تبدیل حدود ۶۹٪ و در

---

<sup>۱</sup> Chanchal

<sup>۲</sup> Chaudhari

دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت جریان بخار به زغال ۵ و ۱۰ به‌دست‌آمده است. گاز تولید شده طی این فرایندها مخلوطی از گازهای  $H_2$ ،  $CO$ ،  $CO_2$  و  $CH_4$  است. نسبت مولی گاز هیدروژن به مونواکسید کربن از گاز سنتز شده از زغال تفاله نیشکر حدود  $\frac{4}{7}$  و برای زغال تجاری  $\frac{9}{15}$  است. مجموع درصد مولی گازهای هیدروژن و مونواکسید کربن سنتز شده زغال تفاله نیشکر حدود ۸۸-۸۰٪ است که این میزان برای زغال تجاری حدود ۸۴-۷۷٪ به‌دست‌آمده است.

جیانفن<sup>۱</sup> و همکاران [۳۷] تولید هیدروژن غنی شده از گاز تولید شده از ضایعات روغن نخل در حضور عامل بخار توسط کاتالیزگر  $\gamma$  (nano-Ni-La-Fe/ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) در تبدیل‌کننده‌ی گاز بستر ثابت مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در صورت استفاده از این نوع کاتالیزگر بازده هیدروژن تولیدی و همچنین گاز تولیدی از ضایعات روغن نخل نسبت به استفاده از دولومیت آهکی به‌عنوان کاتالیزگر طی فرایند تبدیل به گاز بیشتر بوده است. آن‌ها تحقیقات تجربی را پیرامون تأثیر اندازه ذرات زیست توده، دمای فرایند و نسبت بخار به زیست توده روی ترکیبات گاز تولیدی، بازده گاز تولیدی، ارزش حرارتی گاز تولیدی و بازده هیدروژن تولیدی انجام دادند. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که تأثیر دما، مهم‌ترین فاکتور در این فرایند است. در دماهای بالاتر بازده گاز و هیدروژن تولیدی بیشتر بوده هرچند که ارزش حرارتی پایین با این افزایش دما کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین نشان دادند که هرچه اندازه ذرات کوچک‌تر باشد کیفیت گاز و بازده گاز تولیدی بیشتر می‌شود. ارزش حرارتی پایین گاز تولیدی نیز با افزایش نسبت بخار به زیست توده و کاهش اندازه ذرات زیست توده، کاهش می‌یابد.

پنگمی<sup>۲</sup> و همکاران [۳۸] تولید گاز غنی شده از هیدروژن از فرایند تبدیل به گاز زیست توده توسط عوامل هوا و اکسیژن/بخار در تبدیل‌کننده گاز پایین رفت مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که در مقایسه با تبدیل به گاز زیست توده توسط عامل هوا، استفاده از عامل

---

<sup>۱</sup> Jianfen

<sup>۲</sup> Pengmei

اکسیژن/بخار برای تبدیل زیست توده به گاز منجر به بازده تولید گاز بیشتر و هیدروژن تولیدی بیشتری می‌گردد. همچنین در حالت استفاده از عامل اکسیژن/بخار ارزش حرارتی گاز تولیدی نیز دو برابر ارزش حرارتی گاز تولیدی از زیست توده توسط عامل هوا است. ماکزیمم ارزش حرارتی پایین گاز تولیدی نیز  $11,11 \text{ MJ/Nm}^3$  در تبدیل به گاز زیست توده توسط عامل اکسیژن/بخار به دست آمد. آن‌ها همچنین در نتایج خود نشان دادند که محتوای  $\text{H}_2$  و  $\text{CO}$  در گاز تولیدی توسط عامل اکسیژن/بخار حدود  $63,27\%$  تا  $72,56\%$  و این میزان در استفاده از عامل هوا بین  $52,19\%$  تا  $63,31\%$  است. نتایج تجربی و مقایسه‌ای آن‌ها همچنین نشان داد میزان مصرف انرژی تبدیل‌کننده گاز پایین رفت برای تولید گاز غنی شده از هیدروژن در استفاده از عامل اکسیژن/بخار کمتر از عامل هوا است.

## ۴-۲ کارهای انجام‌شده در زمینه بویلر بازیاب حرارت و سیکل ترکیبی

باسیلی<sup>۱</sup> [۳۹] افزایش بازده و نیروی تولیدی سیکل ترکیبی سه فشاره با گرمایش مجدد را از طریق گرمایش مجدد گاز، بهبود<sup>۲</sup> گاز و کاهش بازگشت‌ناپذیری‌ها در بویلر بازیاب مورد تحلیل و بررسی قراردادند. از روش‌های اصلی برای پیشرفت بازده و نیروی تولیدی سیکل ترکیبی می‌توان به: افزایش دمای ورودی به توربین گاز، خنک کردن هوای ورودی، استفاده از گرمایش مجدد گاز، تزریق بخار یا آب به داخل توربین گاز و کاهش بازگشت‌ناپذیری‌های بویلر بازیاب حرارت اشاره کرد. در این مقاله بازگرمایش گاز با دیدگاه بهبود عملکرد آن در سیکل ترکیبی عادی سه فشاره گرمایش مجدد با جایگزینی واحد توربین گاز با واحد بهبود یافته شده توربین گاز گرمایش مجدد (که نیاز به دو توربین گاز، بهبوددهنده گاز و دو محفظه احتراق دارد) به‌کاربرده شده است. همچنین سیکل عادی با گرمایش مجدد و بهبوددهنده گاز به همراه جزئیات دقیق احتراق و فرایندهای سرمایه‌گذاری توربین گاز مدل‌سازی شده و یک تکنیک عملی به منظور کاهش بازگشت‌ناپذیری بویلر بازیاب حرارت معرفی شده است. باسیلی در این مقاله سیکل عادی بازگرمایش گاز که بازگشت‌ناپذیری‌های بویلر بازیاب حرارت

<sup>۱</sup> Bassily

<sup>۲</sup> recuperation

آن کاهش یافته است را با یک سیکل عادی که دارای طراحی معمولی برای اکثر سیکل‌های تجاری است مقایسه نموده. تأثیر دماهای متفاوت ورودی به توربین گاز در عملکرد کل سیکل مورد بحث و بررسی قرار گرفته و ارائه شده است. نتایج کار باسیلی نشان داد که بازده و کار مخصوص سیکلی که برگشت ناپذیری‌های آن کاهش یافته به ترتیب ۱,۹ تا ۲,۱۵٪ و ۳,۵٪ بیشتر از سیکل گرمایش مجدد عادی و همچنین بازده آن نسبت به سیکل عادی ۳,۳ تا ۳,۶٪ و کار مخصوص آن ۲۲ تا ۲۶٪ بیشتر است. سیکل گرمایش مجدد و سیکل با کاهش برگشت ناپذیری‌های آن دارای بازده ای به ترتیب ۱,۱۸٪ و ۳,۱۶٪ بالاتر نسبت به بازده سیکل‌های تجاری موجود در یک دمای مشابه ورودی به توربین گاز هستند. تجزیه تحلیل‌های اقتصادی باسیلی همچنین نشان داد که کاربرد باز گرمایش گاز به همراه بهبود سیکل عادی می‌تواند صرفه‌جویی اقتصادی سالیانه بین ۱۰,۲ تا ۱۱,۲ میلیون دلار آمریکا برای یک واحد سیکل عادی با توان تولیدی ۳۳۹ تا ۳۴۸ مگاواتی و ۱۱,۸ میلیون دلار آمریکا برای یک واحد گرمایش مجدد گاز با تولید توان ۴۳۹ مگاوات به همراه داشته باشد.

احمدی و دینسر<sup>۱</sup> [۴۰] بهینه سازی ترمودینامیکی و اقتصادی نیروگاه سیکل ترکیبی دو فشاره با واحد آتش مکمل را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تعریف تابع هدف پارامترهای طراحی نیروگاه سیکل ترکیبی را بهینه نمودند. علاوه بر این روش یک روش ترمو-اقتصادی به منظور بهینه سازی پارامترهای آن به کار گرفته شده است. در این تحقیق تابع هدف به نمایندگی از کل هزینه نیروگاه در شرایط دلار در هر ثانیه تعریف می‌شود و به عنوان مجموع هزینه‌های عملیاتی مربوط به مصرف سوخت و سرمایه گذاری برای هزینه‌های خرید تجهیزات و تعمیر و نگهداری است. بخش‌های مختلف تابع هدف نیز به صورت متغیرهای تصمیم بیان شده‌اند و در نهایت مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم از طریق مینیمم سازی تابع هدف در الگوریتم ژنتیک به دست آمده‌اند. آن‌ها به منظور اعتبار سنجی، نتایج کد شبیه سازی شده را با داده‌های واقعی مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین تفاوت نتایج مدل سازی با داده‌های واقعی حدود ۱,۴۱٪ است. علاوه

---

<sup>۱</sup> Dincer



بر این موارد مختلفی برای تعیین چگونگی کاهش تابع هدف (هزینه، دبی جرمی و غیره) به منظور بهینه سازی طراحی و پارامترهای عملکردی (هزینه سوخت، نیروی خروجی و غیره) مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است.

والدز<sup>۱</sup> و همکاران [۴۱] پارامترهای عملکردی بویلر بازیاب حرارت را روی عملکرد ترمو - اقتصادی نیروگاه سیکل ترکیبی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. آن‌ها هدف خود را بر مبنای روشی به منظور شناسایی پارامترهایی که بر روی بازده حرارتی و نتایج اقتصادی نیروگاه سیکل ترکیبی تأثیر می‌گذارند قرار دادند. در این مقاله تجزیه و تحلیل‌ها با تمرکز کردن بر روی طراحی بویلر بازیاب حرارت و به‌خصوص پارامترهای عملکردی آن که تأثیر مستقیم روی نتایج اقتصادی نیروگاه دارند انجام شده است. آن‌ها همچنین دو مدل ترمو اقتصادی به منظور انتخاب بهترین نقطه طراحی به عنوان هدف انتخاب کرده و آن‌ها را باهم مقایسه نموده‌اند، نخست تجزیه و تحلیل هزینه تولید انرژی و دوم هزینه جاری سالیانه نیروگاه. در این تحقیق این دو مدل ترمو اقتصادی به همراه اشکال مختلف بویلر بازیاب حرارت مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هزینه‌های تولید انرژی و هزینه‌های جاری بهینه سازی منجر به یک نقطه طراحی مشابه نمی‌شود. بنابراین مهم این است که هدف بهینه‌سازی انتخاب شود. در حالت رقابت قوی بازار برق بایستی هدف بهینه‌سازی هزینه‌های برق تولیدی انتخاب شود اما در یک بازار عادی بایستی هدف بهینه سازی هزینه‌های جاری سالیانه انتخاب شود زیرا این راهی است برای کسب درآمد بیشتر که به واسطه نیروی تولیدی بیشتر ایجاد می‌شود.

محقق و شایگان [۴۲] بهینه سازی ترمودینامیکی پارامترهای طراحی و چیدمان مبدل‌های حرارتی بویلر بازیاب در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. آن‌ها در این تحقیق به ارائه روشی جدید برای مدل‌سازی سیکل بخار در سیکل‌های ترکیبی

---

<sup>۱</sup> Valdes

پیشرفته با استفاده از تشکیل دستگاه معادلات غیر خطی و حل همزمان آن با استفاده از روش‌های ترکیبی نیوتون پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از بویلر بازیاب چند فشاره موجب افزایش نیروی تولیدی در سیکل بخار و همچنین استفاده از گرمایش مجدد در بویلر بازیاب سه فشاره بسیار سودمند خواهد بود.

سایدوم<sup>۱</sup> و همکاران [۴۳] پارامترهای طراحی بویلر بازیاب حرارت دو فشاره در جنگل‌های استوایی بهینه‌سازی نمودند. آن‌ها از نرم افزار Hysys برای مدل‌سازی دما در سرتاسر سطوح انتقال حرارت و از نرم افزار متلب برای تعیین ضریب انتقال حرارت، نرخ انتقال حرارت، جریان بخار و ضریب تأثیر بویلر بازیاب استفاده کردند. روش بهینه‌سازی در این تحقیق از طریق تغییر جریان گازهای خروجی، دمای گازهای خروجی، فشار بخار و مقدمه‌ای بر آتش مستقیم به عنوان آتش مکمل انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بین دماهای ۴۹۰ تا ۵۲۶ درجه سانتی‌گراد میزان حرارت جذب شده توسط بویلر بازیاب، ۳۷،۳۹٪ افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین نشان دادند که برای افزایش جریان گازهای خروجی تا ۸۰ کیلوگرم بر ثانیه، تولید بخار تا ۱۹،۲۹٪ و سطوح فشار بالا و پایین نیز ۱۸،۱۸٪ افزایش پیدا می‌کند. نتایج کلی آن‌ها نشان‌دهنده‌ی بهبود بازده انرژی بویلر بازیاب و تولید بخار است. آن‌ها برای برآوردن و ارضای هدف تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش جریان گازهای خروجی و افزایش دما، بخار تولیدی و ضریب تأثیر سیستم تحت ملاحظات و شرایط مختلف به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

باسیلی [۴۴] مدل‌سازی، بهینه‌سازی عددی و کاهش بازگشت ناپذیری سیکل ترکیبی سه فشاره با گرمایش مجدد را انجام داده است. او حداقل اختلاف دمای جریان گاز و آب (نقطه پینچ)، اختلاف دمای نقاط سوپرهیت، دما و فشار ورودی به توربین بخار، دمای دودکش و کیفیت بخار خروجی از توربین بخار را به عنوان محدودیت در نظر گرفت و سیکل ترکیبی سه فشاره با گرمایش مجدد را در

---

<sup>۱</sup> Sidum

۴۱ مقدار ماکزیمم دمای ورودی به توربین گاز با استفاده از دو روش متفاوت جستجوی مستقیم و متغیرهای متریک بهینه سازی کرد. در این تحقیق همچنین یک روش عملی برای کاهش برگشت ناپذیری بویلر بازیاب در سیکل ترکیبی معرفی شده است. او با استفاده از دماهای متفاوت ورودی به توربین گاز عملکرد کل سیکل ترکیبی را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که بازده سیکل ترکیبی بهینه شده سه فشاره با گرمایش مجدد ۱,۷٪ بیشتر از بازده سیکل ترکیبی سه فشاره با گرمایش مجدد است که برگشت ناپذیری های آن کاهش یافته و همچنین بازده آن حدود ۱,۹ تا ۲,۱٪ بالاتر از بازده سیکل سه فشاره گرمایش مجدد عادی در شرایط مشابه دمای پینچ و دمای ورودی به توربین گاز است. او در این تحقیق نتایج سیکل ترکیبی بهینه شده و برگشت ناپذیری کاهش داده شده را با اکثر سیکل های ترکیبی تجاری در یک دمای مشابه ورودی به توربین گاز مقایسه نموده است.

فرانکو<sup>۱</sup> و روسو<sup>۲</sup> [۴۵] بازده نیروگاه سیکل ترکیبی را از طریق بهینه سازی پارامترهای عملکردی بویلر بازیاب حرارت افزایش دادند. آن ها هدف از بهینه سازی ترمودینامیکی و ترمو-اقتصادی بویلر بازیاب را کاهش تلفات انرژی، اگرژی و کاهش هزینه های آن قرار دادند. نتایج حاصل از تحلیل ترمو-اقتصادی آن ها نشان داد که با افزایش سطوح انتقال حرارت و کاهش دماهای پینچ، بازده حرارتی نیروگاه تا میزان ۶۰٪ افزایش می یابد.

سرینیواس<sup>۳</sup> [۴۶] مطالعاتی را بر روی مکان هوازدا<sup>۴</sup> در سیکل ترکیبی سه فشاره گرمایش مجدد انجام داده است. هوازدا یک گرمکن باز آب تغذیه است در انتهای سیکل بخار است که موجب بهبود بازده و حذف گازهای محلول در آب تغذیه می شود. با توجه به اینکه بویلر بازیاب حرارت نقش مهمی را در عملکرد سیکل ترکیبی ایفا می کند، سرینیواس در این تحقیق به بهبود عملکرد سیکل ترکیبی سه

---

<sup>۱</sup> Franco

<sup>۲</sup> Russo

<sup>۳</sup> Srinivas

<sup>۴</sup> deaerator

فشاره با استفاده از مکان هوا زدا پرداخته است. در این تحقیق دو گزینه برای محل هوا زدا انتخاب شده است: نخست در کندانسور و دوم بین هیترهای فشار پایین و فشار متوسط به منظور بازیابی حرارت از جریان گازهای خروجی. نتایج کار او نشان داد که در صورت قرار دادن هوازدا بین هیترهای فشار پایین و فشار متوسط بازده بالاتری نسبت به آرایش کندانسور-هوازدا به دست می آید. شرایط بهینه بویلر بازیاب، هوازدا و گرمایش مجدد بخار نیز طی مطالعات انجام شده در این تحقیق، محاسبه و ارائه شده است.

فنگ<sup>۱</sup> و همکاران [۴۷] تأثیر پارامترها روی عملکرد ترمودینامیکی بویلر بازیاب حرارت را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. آن‌ها برای بویلر بازیاب تک فشاره با ساختار معلوم و مقادیر مشخص دمای ورودی، دبی جرمی و ترکیبات گاز، دبی جرمی بخار و دمای گازهای خروجی از بویلر بازیاب را به عنوان تابعی از چندین پارامتر مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها پارامترهایی مثل دما و فشار بخار مافوق گرم، دمای آب تغذیه و دمای پینچ را به عنوان پارامترهای طراحی و بهینه سازی در نظر گرفتند و نشان دادند که با انتخاب مناسب پارامترهای آب / بخار و اختلاف دمای پینچ می‌توان دمای گازهای خروجی از بویلر بازیاب حرارت را تا حدودی کاهش داد. پی بردن به تأثیر فشار بخار مافوق گرم روی دمای گاز خروجی و ماکزیمم بخار خروجی از بویلر بازیاب حرارت، بیشتر بودن تأثیر دمای بخار مافوق گرم و دمای آب تغذیه روی دمای گاز خروجی در دماهای بالای گاز ورودی (بالتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) از دیگر نتایج این تحقیق است.

فرانکو<sup>۲</sup> و نیکولا<sup>۳</sup> [۴۸] یک روش عمومی و کلی به منظور بهینه سازی طراحی بویلر بازیاب حرارت معرفی کردند. آن‌ها هدف از بهینه سازی را به دو سطح طبقه بندی نمودند: نخست بدست آوردن پارامترهای اصلی عملکردی بویلر بازیاب حرارت و دوم طراحی دقیق مؤلفه‌های مربوط به متغیرهای

---

<sup>۱</sup> Feng

<sup>۲</sup> Franco

<sup>۳</sup> Nicola

هندسی بخش انتقال حرارت. خروجی سطح اول بهینه سازی ورودی سطح دوم است و به طور خاص سطح دوم بهینه سازی را می توان در دو بخش بیان کرد: بخش اول با هدف به حداقل رساندن افت فشار در یک جریان حرارتی معلوم و بخش دوم که منجر به کاهش ابعاد کلی، با حفظ عملکرد بویلر بازیاب از نظر جریان گرما و افت فشار می شود. آن ها نشان دادند که با افزایش ۵ الی ۶٪ در لوله های مورد استفاده از طریق افزایش تعداد سطوح فشار ( از دو سطح فشار به سه سطح فشار) و افزایش حجم کلی تا میزان ۸٪ می توان تا ۲۵٪ کاهش در تلفات انرژی داشت.

حاج عبداللهی، احمدی و دینسر [۴۹] بهینه سازی چند هدفه بویلر بازیاب حرارت را بر پایه انرژی در نیروگاه سیکل ترکیبی با استفاده از الگوریتم تکاملی انجام دادند. آن ها بویلر بازیاب حرارت چند فشاره با یک هندسه معمولی را در نیروگاه سیکل ترکیبی مدل سازی کرده و نتایج حاصل از مدل سازی را با داده های واقعی واقع در نیروگاهی در نزدیک دریای خزر مقایسه نمودند. نتایج آن ها تطابق خوبی با داده های واقعی داشت. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل انرژی آن ها نشان داد که افزایش فشار در درام فشار بالا و فشار پایین منجر به افزایش بازده انرژی بویلر بازیاب می شود. این در حالی است که افزایش دمای پینچ موجب کاهش میزان بازده انرژی می گردد. آن ها تابع دو هدفه خود را به صورت ماکزیمم کردن بازده انرژی در ازای مینیمم کردن مجموع هزینه های سالیانه بر انرژی بخار تولیدی تعریف نمودند. آن ها همچنین به این نتیجه رسیدند که به دست آوردن دمای پینچ کوچکتر مستلزم سطح انتقال حرارت بزرگتر و هزینه بیشتر بخار تولیدی است. همچنین این عامل موجب بازده بالاتر انرژی و هزینه های عملیاتی کمتر می گردد.

گنجه کویری و همکاران [۵۰] بهینه سازی انرژی - محیطی بویلر بازیاب حرارت را در نیروگاه سیکل ترکیبی با استفاده از تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی انجام داده اند. آن ها یک نیروگاه سیکل ترکیبی دو فشاره با آتش ماکمل را به منظور بهینه سازی و فشار درام، اختلاف دماهای پینچ، دبی جرمی بخار و سطوح فشار بالا و پایین بویلر بازیاب را به عنوان متغیرهای تصمیم تابع هدف خود انتخاب نمودند.

آن‌ها تأثیر دمای گاز ورودی به بویلر بازیاب را بر بازده سیکل مورد بحث و بررسی قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دمای ورودی به بویلر بازیاب تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش بازده حرارتی و اگزرژی سیکل خواهد شد و بعد از آن مقادیر بازده شروع به کم شدن می‌کنند. علاوه بر این طی تجزیه و تحلیل‌های اگزرژی مشخص شد که اواپراتور فشار بالا و دومین سوپرهیتر فشار بالا در بویلر بازیاب بیشترین تلفات اگزرژی دارند.

ژوان<sup>۱</sup> و همکاران [۵۱] ترکیب بهینه و طراحی بویلر بازیاب حرارت را با استفاده از برنامه نویسی ریاضی انجام داده‌اند. آن‌ها با استفاده از برنامه MINLP<sup>۲</sup>، آرایش تجهیزات، طراحی هندسی و شرایط عملکردی نیروگاه سیکل ترکیبی را بهینه‌سازی کردند و با استفاده از نرم افزار مدل‌سازی جبری سیستم (GAMS) به عنوان ابزاری برای پیاده‌سازی و حل مدل ریاضی سیستم استفاده نمودند.

بهبهانی نیا و همکاران [۵۲] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، بویلر بازیاب حرارت لوله آتشی را برای نیروگاه‌های تولید هم‌زمان بهینه‌سازی کردند. آن‌ها سیستم بویلر بازیاب حرارت را در یک نیروگاه تولید هم‌زمان با یک میکرو توربین گاز با استفاده از دو تابع هدف متفاوت مورد بهینه‌سازی قراردادند. مجموع تلفات اگزرژی گاز خروجی از دودکش و اگزرژی‌های تخریب شده به علت بازگشت‌ناپذیری‌ها به عنوان تابع هدف اول و هزینه‌های سالیانه سرمایه‌گذاری و هزینه‌های تلفات انرژی به عنوان تابع هدف دوم انتخاب شد. هزینه‌های تلفات انرژی در این تحقیق شامل هزینه‌های تلفات انرژی گازهای خروجی از دودکش و هزینه کاهش نیروی تولیدی در میکرو توربین که به علت افت فشار در بویلر بازیاب ایجاد می‌شود می‌گردد. آن‌ها نشان داد که نتایج حاصل از بهینه‌سازی ترمودینامیکی منجر به یک بهبود عمده در مجموع هزینه‌های بویلر بازیاب نخواهد شد. هرچند که روش‌های بهینه‌سازی ترمو اقتصادی و چند هدفه موجب پیشرفت در کاهش هزینه‌های سیستم به علت کاهش هزینه‌های تلفات انرژی و کاهش در دماهای پینچ می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Juan

<sup>۲</sup> Mixed integer non-linear programming

## ۲-۵ هدف از انجام کار حاضر و ضرورت آن

در حال حاضر در اکثر نیروگاه‌ها از سوخت‌های فسیلی به منظور تولید برق استفاده می‌شود. اما با توجه به ذخایر محدود و تجدید نشدن این منابع و نیز آلاینده‌گی بالای این سوخت‌ها بایستی به فکر جایگزین کردن این منابع با سوخت‌های تجدید پذیری مثل زیست توده بود که هم میزان آلاینده‌گی کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی داشته و هم منابع متنوع و تجدید پذیر دارند. لذا در این پایان‌نامه سعی شده است تا تکنولوژی‌های استحصال انرژی از زیست توده و تبدیل زیست توده به سوخت گازی و قابل اشتعال در نیروگاه‌ها معرفی شده و نیز کارایی، تولید توان، راندمان و میزان آلاینده‌گی نیروگاه در شرایط استفاده از این سوخت‌های تجدید پذیر مورد تحلیل و بررسی قرار بگیرد. از طرفی بویلر بازیاب حرارت در میزان توان تولیدی نیروگاه سیکل ترکیبی و نیز آلاینده‌گی آن تأثیر مستقیم داشته و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی آن و نیز کاهش میزان تولید آلاینده‌گی گازهای خروجی از آن باعث بهبود عملکرد سیکل و کاهش میزان آلاینده‌گی آن می‌شود. در کار حاضر عملکرد پارامترهای طراحی بویلر بازیاب حرارت سه فشاره با گرمایش مجدد در شرایط استفاده از گاز تولیدشده از زیست توده، با هدف ماکزیمم سازی توان تولیدی سیکل، مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. پارامترهای طراحی بویلر بازیاب که به منظور بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند عبارت‌اند از: میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب، سطوح فشار، اختلاف دماهای پینچ، اختلاف دمای نقاط سوپرهیت و نقاط گرمایش مجدد. میزان آلاینده‌گی سوخت تولیدی راکتورهای تولیدکننده‌ی گاز از زیست توده، گاز تولید شده از زیست توده توسط عوامل مختلف اکسیداسیون و گاز تولید شده از انواع متنوع زیست توده با یکدیگر مقایسه شده است. علاوه بر این میان گاز تولید شده از زیست توده و گاز طبیعی از نظر میزان آلاینده‌گی و راندمان سیکل مقایسه‌های جامعی صورت گرفته است. لازم به ذکر است تجزیه تحلیل‌ها و مقایسه‌های انجام شده در این پایان‌نامه تاکنون در هیچ یک از کارهای صورت گرفته و تحقیقات انجام شده در زمینه بویلر بازیاب حرارت و سیکل ترکیبی انجام نشده است.





# فصل سوم

## مدل سازی

### ۱-۳ مقدمه

سیکل ترکیبی سه فشاره با گرمایش مجدد مورد بررسی در این پایان نامه متشکل از اجزای مختلفی می باشد که از آن جمله می توان به توربین گاز، کمپرسور، محفظه احتراق، بویلر بازیاب، توربین های بخار فشار بالا و فشار پایین و کندانسور اشاره نمود. در این فصل به فرضیات مدل سازی و معادلات حاکم بر اجزای مختلف سیکل پرداخته می شود.

### ۲-۳ فرضیات صورت گرفته

فرضیات:

فرضیات انجام شده در مدل سازی به شرح زیر است [۳۹]، [۴۰]، [۴۱]:

- سیستم به حالت پایا برسد.

- هوا در محفظه احتراق شامل ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن است.

- فرض شده است که عایق بندی کلیه اجزای سیکل به گونه ای است که نشت حرارتی از آنها به غیر از تلفات حرارتی گازهای خروجی از دودکش بویلر بازیاب امکان پذیر نیست.

- دمای محیط ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است.

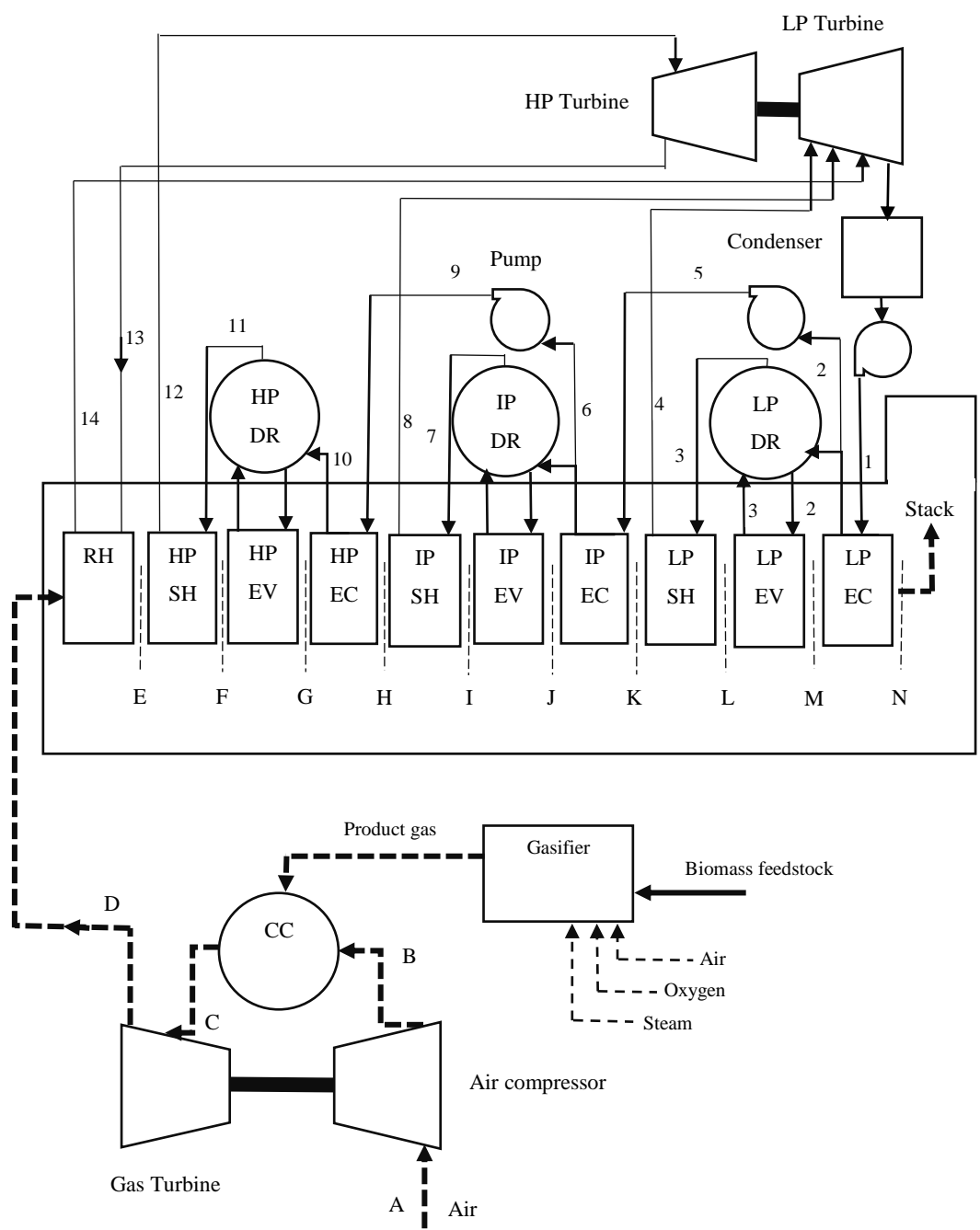
- فشار محیط ۱ بار فرض شده است.

- افت فشار در مبدل های حرارتی ناچیز در نظر گرفته شده است.

با مدل‌سازی انرژی بخش‌های مختلف سیکل ترکیبی و همچنین مدل‌سازی خواص آب و بخار، پارامترهای عملکردی یا طراحی بویلر بازیاب در شرایط مختلف استفاده از زیست توده به عنوان سوخت سیکل با هدف ماکزیمم سازی توان تولیدی سیکل توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی می‌شوند. بررسی‌های حاصل از میزان تولید آلاینده‌گی بویلر بازیاب در شرایط استفاده از زیست توده نیز انجام شده و نتایج آن با میزان تولید آلاینده‌گی بویلر بازیاب در شرایط استفاده از گاز تولیدی از مقایسه شده است. بدیهی است سوخت‌های مختلف با ترکیبات متفاوت دارای دمای احتراق متفاوت می‌باشند که گازهای حاصل از احتراق آن‌ها نیز با ورود به بویلر بازیاب، تأثیرات متفاوتی را در بخار تولیدی، فشار بخار، دمای پینچ، دمای گازهای خروجی از دودکش و میزان تولید آلاینده‌گی آن خواهند داشت و تمامی این عوامل قابل تجزیه و تحلیل و مقایسه با سوخت‌های فسیلی هستند.

### ۳-۳ مدل‌سازی سیکل ترکیبی سه فشاره با گرمایش مجدد

طرح سیکل سه فشاره با گرمایش مجدد مورد بررسی کار حاضر در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است سیکل گاز شامل توربین گاز، کمپرسور هوا و محفظه احتراق و سیکل بخار شامل توربین بخار فشار بالا و فشار، کندانسور، پمپ‌های مراحل فشار بالا تا فشار پایین می‌شود. این دو سیکل توسط بویلر بازیاب حرارت به یکدیگر مرتبط می‌شوند. هرگونه تغییر در طراحی بویلر بازیاب موجب تغییر در راندمان کل سیکل خواهد شد. بنابراین با بهینه‌سازی پارامترهای طراحی آن و استفاده از سوخت‌هایی که آلاینده‌گی کمتری دارند می‌توان هم موجبات توان تولیدی بیشتر کل سیکل و هم کاهش آلاینده‌گی آن را فراهم نمود.



شکل (۱-۳): طرح شماتیک سیکل سه فشاره با گرمایش مجدد

همان طور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است هوای محیط با شرایط A که در این کار ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است وارد کمپرسور هوا می‌شود و پس از تراکم و افزایش دما و فشار با شرایط B وارد محفظه احتراق (CC) می‌شود. سوخت ورودی به محفظه احتراق که در این کار گاز تولید شده از زیست توده و یا متان است با هوای ورودی به محفظه احتراق واکنش داده و گازهای داغ حاصل از احتراق آنها با شرایط C وارد توربین گاز می‌شوند. گازهای داغ خروجی از محفظه احتراق با دمای بالا وارد توربین گاز شده و پس از تولید کار با کاهش دما، با شرایط D از آن خارج شده و وارد بویلر بازیاب گرمای تولیدکننده بخار می‌شود. زیست توده‌هایی که توسط آنها عملکرد کل سیکل مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد دارای ارزش‌های حرارتی متفاوت با ترکیبات تشکیل‌دهنده متفاوت هستند به همین دلیل گازهای داغ خروجی از محفظه احتراق دارای دمای متفاوت و ترکیبات آلاینده متفاوت هستند. آب خروجی از کندانسور توسط پمپ فشار پایین به داخل لوله‌های اکونومایزر فشار پایین تزریق می‌شود و در اثر انتقال حرارت با گازهای داغ داخل بویلر بازیاب به دمای اشباع می‌رسد. آب در دمای اشباع وارد لوله‌های اواپراتور شده و در آنجا به بخار تبدیل می‌شود. بخار تولیدشده توسط اواپراتور وارد لوله‌های سوپرهیتر می‌شود و در آنجا به بخار مافوق گرم تبدیل می‌شود. بخار مافوق گرم خروجی از سوپرهیترهای فشار پایین و فشار متوسط وارد توربین بخار فشار پایین و بخار مافوق گرم خروجی از سوپرهیتر فشار بالا وارد توربین بخار فشار بالا می‌شود. بخار مافوق گرم ورودی به توربین بخار فشار بالا پس از تولید توان و کار و خروج از آن دمای آن کاهش یافته و فشار آن به حدود فشار متوسط کاهش پیدا می‌کند و وارد لوله‌های گرمایش مجدد می‌شود. پس از جذب حرارت بخار ورودی به لوله‌های گرمایش مجدد از گازهای داغ، به دمای بالا رسیده و به داخل توربین بخار فشار پایین تزریق می‌شود. بخار مافوق گرم خروجی از گرمایش مجدد پس از ورود به توربین بخار فشار پایین به همراه بخار مافوق گرم فشار پایین و فشار متوسط تولید توان و کار می‌کنند. در نهایت

کل دبی جرمی آب خروجی از توربین بخار فشار پایین وارد کندانسور شده و سیکل دوباره تکرار می‌شود. گازهای داغ نیز با شرایط N از انتهای دودکش بویلر بازیاب از آن خارج می‌شوند.

### ۳-۴ مدل‌سازی انرژی سیکل گازی

در این بخش به مدل‌سازی و ارائه روابط مربوط به کمپرسور هوا، معادلات موازنه احتراق سوخت با هوا در محفظه احتراق و معادلات توربین گاز پرداخته خواهد شد. رابطه (۱) ارتباط میان دمای ورودی و خروجی از کمپرسور و رابطه (۲) کارمصرفی آن را نشان می‌دهد [۴۰].

$$T_B = T_A \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{AC}} \left[ r_c^{\frac{\gamma_a-1}{\gamma_a}} - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

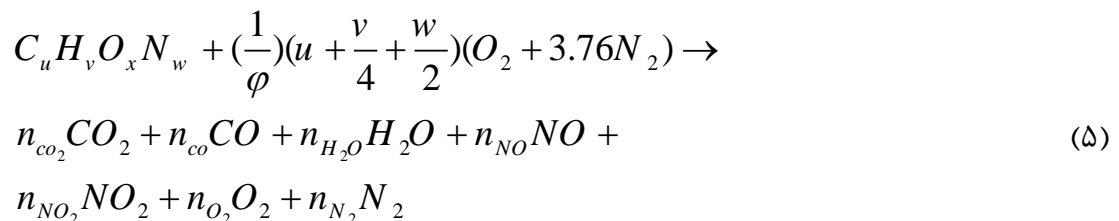
$$W_{AC} = m_a c_{p_a} (T_B - T_A) \quad (2)$$

رابطه (۳) معادله بقای انرژی محفظه احتراق و رابطه (۴) موازنه دبی‌های جرمی ورودی محفظه احتراق را نشان می‌دهند [۴۰].

$$m_a h_B + m_f LHV = m_g c_{p_g} T_g + (1 - \eta_{cc}) m_f LHV \quad (3)$$

$$m_g = m_f + m_a \quad (4)$$

رابطه (۵) احتراق سوخت گازی زیست توده با ترکیب کلی  $C_u H_v O_w N_x$  با هوا را نشان می‌دهد. روابط (۶) تا (۱۲) نیز روابط موازنه مولی بین واکنش‌دهنده‌ها با محصولات احتراق هستند [۴۱].



$$\varphi = \frac{f}{f_s} \quad (6)$$

$$f = \frac{m_f}{m_a} \quad (7)$$

$$f_s = \frac{M_f}{(u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2})4.76M_a} \quad (8)$$

$$u = n_{CO_2} + n_{CO} \quad (9)$$

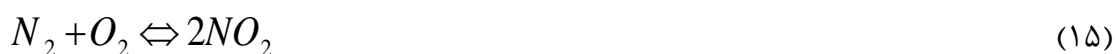
$$v = 2n_{H_2O} \quad (10)$$

$$w + \frac{1}{\varphi}(u + \frac{v}{4} - \frac{w}{2}) = 2n_{CO_2} + n_{CO} + n_{NO} + 2n_{NO_2} + n_{H_2O} + 2n_{O_2} \quad (11)$$

$$x + 2 \times 3.76 \times (\frac{1}{\varphi}) = n_{NO} + n_{NO_2} + 2n_{N_2} \quad (12)$$

روابط (۹) تا (۱۲) نیز معادلات موازنه مولی بین عناصر واکنش دهنده‌ها و محصولات هستند. به دلیل اینکه تعداد محصولات احتراق بیشتر از تعداد معادلات موازنه مولی است بایستی از معادلات کمکی و ثابت تعادل K برای به دست آوردن درصد مولی ترکیبات حاصل از احتراق استفاده نمود. برای این منظور از روابط (۱۳) تا (۱۸) می‌توان بهره برد [۵۳].





$$K = \frac{y_C^{n_C} y_D^{n_D}}{y_A^{n_A} y_B^{n_B}} \left( \frac{P}{P_0} \right)^{n_C + n_D - n_A - n_B} \quad (16)$$



$$y_i = \frac{n_i}{n_A + n_B + n_C + n_D} \quad (18)$$

در رابطه (۱۶)  $y$  نشان‌دهنده مول جزء  $i$  ام بخش بر مجموع کل مول معادله کمکی (همان‌گونه که در معادله (۱۸) نشان داده شده) است و می‌تواند مول هر یک از محصولات یا واکنش‌دهنده‌های معادلات کمکی (۱۳) تا (۱۵) باشد. در رابطه (۱۶) همچنین  $P_0$  فشار محیط و  $P$  فشاری است که در آن واکنش احتراق انجام می‌شود. با به دست آوردن دمای محصولات احتراق سوخت زیست توده با هوا می‌توان مقادیر ثابت تعادل  $K$  را از جداول کتب ترمودینامیک برای هر یک از معادلات کمکی آلاینده‌ها ((۱۳) تا (۱۵)) در دمای احتراق به دست آورد. در نهایت با داشتن ثابت تعادل هر یک از معادلات کمکی آلاینده‌ها و تشکیل یک دستگاه معادله غیر خطی هفت معادله، هفت مجهول (به تعداد محصولات واکنش) در نرم‌افزار متلب و دادن یک حدس اولیه برای مقادیر مولی هر یک از محصولات واکنش و پس از انجام فرایند تکرار و حدس و خطا، می‌توان مقادیر صحیح مول هر یک از محصولات را در دمای واکنش به دست آورد. ارتباط میان دمای ورودی و خروجی از توربین گاز، کار مصرفی توربین گاز و توان خالص سیکل گازی در روابط (۱۹) تا (۲۱) ارائه شده است [۴۰].

$$T_D = T_C (1 - \eta_{GT} \left[ 1 - \left( \frac{P_C}{P_D} \right)^{\frac{1-\gamma_g}{\gamma_g}} \right]) \quad (19)$$



$$W_{GT} = m_g c_{Pg} (T_C - T_D) \quad (20)$$

$$W_{GC} = W_{GT} - W_{AC} \quad (21)$$

### ۲-۳- مدل سازی انرژی بویلر بازیاب حرارت و سیکل بخار

همان گونه که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است بویلر بازیاب مورد بررسی در کار حاضر شامل سه بخش فشار پایین، فشار متوسط، فشار بالا و یک بخش ریپیتور یا گرمایش مجدد است. هر بخش به ترتیب از راست به چپ شامل لوله های اکونومایزر، اواپراتور و سوپرهیتر می شود. پس از ورود گازهای داغ با دمای  $T_D$  به داخل بویلر بازیاب و تبادل حرارت با آب و بخار و کاهش دما، در نهایت با دمای  $T_N$  از انتهای دودکش بویلر بازیاب خارج می شود. معادلات تبادل حرارت بین گازهای داغ ورودی به بویلر با آب و بخار داخل مبدل های حرارتی آن، طبق رابطه ی انتقال حرارت  $Q = mc dt = mdh$  در روابط (۲۲) تا (۳۱) آورده شده است [۴۰].

$$Q1 = m_g c_{Pg} (T_D - T_E) = m_{W,RH} (h_{14} - h_{13}) \quad (22): \text{ گرمایش مجدد}$$

$$Q2 = m_g c_{Pg} (T_E - T_F) = m_{W,HP} (h_{12} - h_{11}) \quad (23): \text{ سوپرهیتر فشار بالا}$$

$$Q3 = m_g c_{Pg} (T_F - T_G) = m_{W,HP} (h_{11} - h_{10}) \quad (24): \text{ اواپراتور فشار بالا}$$

$$Q4 = m_g c_{Pg} (T_G - T_H) = m_{W,HP} (h_{10} - h_9) \quad (25): \text{ اکونومایزر فشار بالا}$$

$$Q6 = m_g c_{Pg} (T_I - T_J) = m_{W,IP} (h_7 - h_6) \quad (27): \text{ اواپراتور فشار متوسط}$$

$$Q7 = m_g c_{Pg} (T_J - T_K) = m_{W,IP} (h_6 - h_5) \quad (28): \text{ اکونومایزر فشار متوسط}$$

$$Q8 = m_g c_{Pg} (T_K - T_L) = m_{W,IP} (h_4 - h_3) \quad (29): \text{سوپرهیتر فشار پایین}$$

$$Q9 = m_g c_{Pg} (T_L - T_M) = m_{W,IP} (h_3 - h_2) \quad (30): \text{اوپراتور فشار پایین}$$

$$Q10 = m_g c_{Pg} (T_M - T_N) = m_{W,IP} (h_2 - h_1) \quad (31): \text{اکنونمایزر فشار پایین}$$

در تمامی این روابط دبی جرمی آب و بخار مربوط به سطوح فشار پایین تا فشار بالا جزو متغیرهای تصمیم الگوریتم در نظر گرفته شده‌اند و مقادیر بهینه آن‌ها با توجه به محدوده‌ی مجاز معرفی شده در الگوریتم انتخاب می‌شوند. دبی جرمی گاز نیز با توجه به نوع توربین گاز انتخاب شده در این کار، ۵۰۰ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مقادیر آنتالپی آب و بخار مربوط به هر بخش از بویلر بازیاب با استفاده روابط ارائه شده برای خواص آب و بخار توسط استاندارد یاپس<sup>۱</sup> و با دما و فشار بهینه‌ی داده شده توسط الگوریتم محاسبه می‌شوند. مقادیر گرمای ویژه گاز نیز با توجه به دمای گاز محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب با جایگذاری این مقادیر در روابط (۲۲) تا (۳۱)، مقادیر دمای گاز از ابتدا تا انتهای بویلر بازیاب حرارت از طریق حل متوالی معادلات محاسبه می‌شوند. در نتیجه تبادل حرارت آب با گازهای داغ ورودی، آب به بخار تبدیل شده و پس از تزریق شدن بخار به داخل توربین‌های فشار بالا و فشار پایین موجب تولید توان می‌شود. روابط (۳۲) و (۳۳) مدل انرژی توربین بخار فشار بالا و توربین بخار فشار پایین و همچنین روابط (۳۴) و (۳۵) راندمان سیکل بخار و راندمان کل سیکل را نشان می‌دهند. برای به دست آوردن توان خالص سیکل بخار بایستی توان تولیدی توربین‌های بخار از توان مصرفی پمپ‌های فشار پایین، فشار بالا و فشار متوسط کسر گردد بدین منظور توان مصرفی این پمپ‌های فشار پایین، فشار متوسط و فشار بالا به ترتیب در روابط (۳۶) تا (۳۸) ارائه شده است [۴۰].

$$m_{W,HP} (h_{12} - h_{13}) = W_{ST,HP} \quad (32)$$

<sup>۱</sup> IAPWS

$$m_{W,RH} h_{14} + m_{W,IP} h_8 + m_{W,LP} h_4 - (m_{W,RH} + m_{W,IP} + m_{W,LP}) h_{0.07\text{bar},88\%} = W_{ST,LP} \quad (33)$$

$$\eta_{ST} = \frac{W_{ST} - W_{pump}}{Q1 + Q2 + \dots + Q10} \quad (34)$$

$$\eta_{CCPP} = \frac{W_{GT} - W_{COMP} + W_{ST} - W_{pump}}{m_f LHV} \quad (35)$$

$$W_{pump,LP} = m_{W,LP} (h_1 - h_{0.07\text{bar},0\%}) \quad (36)$$

$$W_{pump,IP} = m_{W,IP} (h_5 - h_2) \quad (37)$$

$$W_{pump,HP} = m_{W,LP} (h_9 - h_6) \quad (38)$$

لازم به ذکر است که کلیه روابط مربوط به تولید توان توربین‌های بخار فشار بالا و فشار پایین و توان مصرفی پمپ‌ها با توجه به شکل (۳-۱) محاسبه شده و ارائه شده‌اند.

### ۳-۴- بهینه‌سازی بویلر بازیاب با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی تجربی یا اتفاقی می‌باشد و از آنجاکه به روابط تحلیلی (فرمول‌های بسته ریاضی) نیازی ندارد بلکه رفتار سیستم را تحلیل می‌کند، برای کلیه سیستم‌ها قابل اعمال است. به‌طور کلی نحوه‌ی عملکرد الگوریتم ژنتیک را می‌توان در پنج مرحله تشریح کرد [۵۵]:

۱- یک جمعیت تصادفی از افراد تولید می‌شود. هویت هر فرد با متغیرهای تصمیم‌گیری مشخص می‌شود.

۲- تابع شایستگی<sup>۱</sup> برای هر فرد ارزیابی شده و افراد بر اساس این معیار طبقه‌بندی می‌شوند.

۳- سالم‌ترین افراد یا به عبارتی افرادی که میزان تابع شایستگی آن‌ها بیشتر است به عنوان والدین برای نسل بعدی انتخاب می‌گردند. برای این منظور اصول عملکردی ژنتیک (ازدواج، جهش، نخبه‌گرایی) بر این دسته منتخب اعمال می‌شود و نسلی جدید به تعداد افراد نسل قبلی به وجود می‌آید.

۴- نسل جدید دوباره بر اساس معیار تابع شایستگی ارزیابی می‌گردد. انتظار می‌رود نسل جدید که از والدین سالم‌تر برخوردار بوده‌اند، از نسل قبلی بهتر باشند.

۵- این فرایند تا زمانی که سلامت یا شایستگی همه افراد به حد خاصی نرسیده است ادامه دارد.

به‌طور کلی مسئله بهینه‌سازی شامل تابع هدف و محدودیت‌هایی برای بعضی از متغیرهای تصمیم یا وابسته می‌باشد. از آنجاکه سیستم مورد بررسی در کار حاضر دارای رفتار غیر خطی می‌باشد و نقاط بهینه محلی بسیاری را شامل می‌شود و همچنین برهمکنش میان روابط در آن پیچیده است، لذا استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی آن بهترین راه ممکن به نظر می‌رسد. متغیرهای تصمیم در بویلر بازیاب شامل حداقل اختلاف دمای جریان آب و جریان گاز (دمای پینچ)، اختلاف دمای سوپرهیترها با دمای گاز، فشار اواپراتور یا تبخیرکننده‌ها، دبی‌های جرمی مراحل فشار پایین تا فشار بالا و دمای نقاط گرمایش مجدد می‌شود. از آنجاکه در مدل‌سازی بویلر بازیاب و سیکل بخار محدودیت‌هایی نظیر حداقل دمای دودکش، حداکثر دمای بخار ورودی به توربین بخار و حداقل کیفیت بخار خروجی از توربین‌ها وجود دارد، این محدودیت‌ها در داخل برنامه کامپیوتری لحاظ گردیده است. لذا تابع شایستگی که هدف آن ماکزیمم کردن توان تولیدی سیکل بخار است در رابطه (۳۹) ارائه شده است. در رابطه (۴۰) نیز توان خالص تولیدی سیکل بخار نشان داده شده است.

---

<sup>۱</sup> Fitness function

$$F_{fitness}(\mathbf{X}) = W_{net} \quad (39)$$

$$W_{net} = W_{ST,HP} + W_{ST,LP} - W_{pump,LP} - W_{pump,IP} - W_{pump,HP} \quad (40)$$

## فصل چهارم

# شبیه‌سازی و ارائه نتایج

#### ۴-۱ مقدمه

در این تحقیق پارامترهای طراحی بویلر بازیاب حرارت سه فشاره با گرمایش مجدد که طرح شماتیک آن در شکل (۱-۳) نشان داده شده است در شرایط استفاده از زیست توده به عنوان سوخت اصلی نیروگاه مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. همچنین میزان تولید آلاینده‌گی این سوخت‌ها با سوخت‌های فسیلی همچون متان مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. جهت بهینه‌سازی پارامترها نیز از ابزار الگوریتم ژنتیک متلب استفاده شده است. از جمله عوامل مهم که در ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده دخیل هستند می‌توان به نوع راکتور دستگاه تبدیل‌کننده، سیال عامل در فرایند تبدیل به گاز و نوع زیست توده، اشاره نمود و هدف اصلی در کار حاضر بررسی تأثیر تمامی عوامل فوق در عملکرد بویلر بازیاب حرارت از نظر راندمان سیکل، تولید توان، میزان آلاینده‌گی و نحوه تغییرات پارامترهای بهینه‌سازی شده آن در این شرایط است. تمامی فرایندهای مختلف تبدیل به گاز زیست توده و انواع متنوع و پرکاربرد زیست توده در این تحقیق از نظر توان تولیدی سیکل، آلاینده‌گی در ازای توان تولیدی، نحوه تغییرات پارامترهای طراحی بویلر بازیاب با میزان دبی جرمی سوخت مصرفی و تأثیر آن‌ها در توان تولیدی سیکل، ترکیب زیست توده و بررسی‌های حاصل از میزان آلاینده‌گی آن‌ها و غیره مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. به منظور به دست آوردن دمای حاصل از احتراق سوخت‌ها و ضریب گرمای ویژه فشار ثابت گازهای ورودی به بویلر بازیاب از نرم‌افزار (EES) و برای به دست آوردن ترکیبات حاصل از احتراق سوخت‌ها و مدل‌سازی انرژی سیکل بخار نیز از نرم‌افزار (MATLAB) استفاده شده است.

## ۲-۴ پارامترهای ثابت ورودی به برنامه

سیکل ترکیبی سه فشاره با گرمایش مجدد ارائه شده در این تحقیق با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک مدل سازی شده است. در مرحله اول معادلات احتراق سوخت های مختلف با هوا در نرم افزار EES نوشته شده و دمای حاصل از احتراق آن ها در نسبت های مختلف سوخت به هوا به دست می آید. سپس با داشتن دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب می توان باقی دماهای گاز در طول بویلر بازیاب با استفاده روابط انتقال حرارت میان گاز و آب از طریق حل همزمان آن ها (دستگاه معادلات چند معادله چند مجهولی) به دست آورد. مقادیر آنتالپی آب که روابط آن در فصل قبل ارائه شد در دما و فشار بهینه ای که توسط الگوریتم با توجه به دمای گازهای ورودی به بویلر انتخاب می شود، محاسبه شده و در روابط انتقال حرارت جایگذاری می شوند و در نهایت توان ماکزیمم تولیدی سیکل بخار به همراه مقادیر بهینه پارامترهای طراحی آن با توجه به دمای ورودی به بویلر محاسبه می شوند. با در اختیار داشتن دمای حاصل از احتراق سوخت ها و تشکیل دستگاه چند معادله چند مجهول غیرخطی در متلب، همان گونه که روابط آن در فصل قبل ارائه شده است و با دادن حدس اولیه به برنامه و انجام فرایند تکرار، می توان مقادیر دقیق ترکیبات آلاینده را به دست آورد. در جدول (۴-۱) پارامترهای ثابت ورودی و محدودیت های طراحی اعمال شده در برنامه جهت بهینه سازی پارامترهای بویلر بازیاب به منظور کسب ماکزیمم توان سیکل بخار، که در روابط (۶۴) و (۶۵) فصل قبل فرمول آن ارائه شد، نشان داده شده است.

جدول (۴-۱): پارامترهای ثابت ورودی و محدودیت‌های طراحی اعمال شده به برنامه جهت

بهینه‌سازی [۳۹]، [۴۰]، [۴۲]

پارامتر ورودی	مقدار	واحد
فشار کندانسور	0.07	(bar)
دبی جرمی گازهای حاصل از احتراق	500	(kg s <sup>-1</sup> )
دمای محیط	298	(K)
فشار محیط	1	(bar)
حداقل دمای گازهای خروجی دودکش بویلر بازیاب	345	(K)
کیفیت بخار خروجی از توربین بخار فشار پایین	88%	(-)
بازده آیزنتروپیک توربین گاز و کمپرسور هوا	88%	(-)
حداکثر دمای گازهای ورودی به توربین گاز	1850	(K)
نسبت تراکم کمپرسور	14.1	(-)
حداکثر دمای بخار ورودی به توربین بخار	850	(K)
دمای آب ورودی به بویلر بازیاب	315	(K)

در جدول (۴-۲) پارامترهای طراحی و یا متغیرهای تصمیم بویلر بازیاب به همراه کران بالا و پایین آن‌ها جهت بهینه‌سازی ارائه شده‌اند.

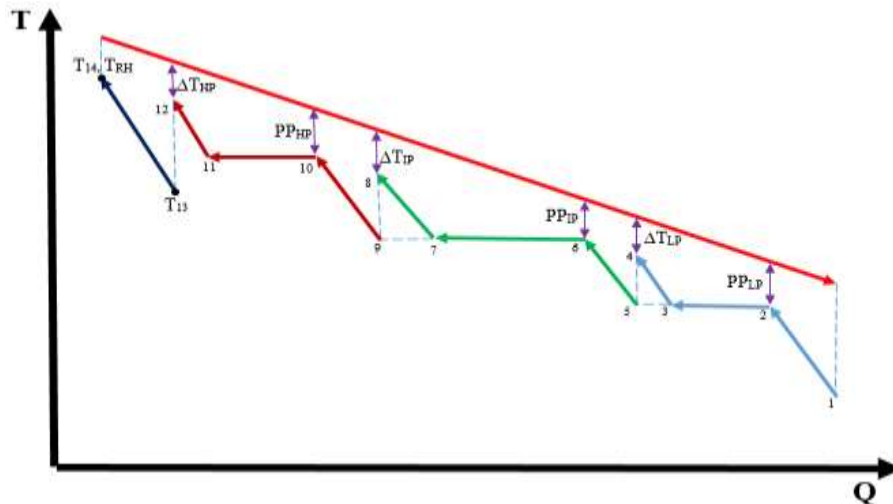


جدول (۴-۲): متغیرهای تصمیم ورودی به برنامه [۴۲]

متغیر	کران بالا	کران پایین	واحد
$m_{W,HP}$	30	5	(kg s <sup>-1</sup> )
$m_{W,IP}$	30	5	(kg s <sup>-1</sup> )
$m_{W,LP}$	90	40	(kg s <sup>-1</sup> )
$PP_{HP}$	20	0	(K)
$PP_{IP}$	20	0	(K)
$PP_{LP}$	20	0	(K)
$P_{HP}$	160	80	(bar)
$P_{IP}$	50	10	(bar)
$P_{LP}$	5	0.5	(bar)
$\Delta T_{HP}$	30	25	(K)
$\Delta T_{IP}$	30	25	(K)
$\Delta T_{LP}$	30	25	(K)
$\Delta T_{RH}$	200	25	(K)
$T_{RH}$	700	490	(K)

در جدول (۴-۲)  $m_{W,LP}$ ،  $m_{W,IP}$ ،  $m_{W,HP}$  به ترتیب نمایانگر دبی جرمی بخار فشار بالا، دبی جرمی بخار فشار متوسط و دبی جرمی بخار فشار پایین،  $PP_{HP}$ ،  $PP_{IP}$  و  $PP_{LP}$  دمای پینچ مراحل فشار بالا، متوسط و پایین،  $P_{HP}$ ،  $P_{IP}$  و  $P_{LP}$  فشار بخار مراحل فشار بالا، متوسط و پایین،  $\Delta T_{HP}$ ،  $\Delta T_{IP}$ ،  $\Delta T_{LP}$

و  $\Delta T_{RH}$  اختلاف دمای جریان گاز با بخار سوپر هیت فشار بالا، متوسط، پایین و گرمایش مجدد و  $T_{RH}$  دمای بخار خروجی از توربین بخار فشار بالا و ورودی به گرمایش مجدد یا ری هیتر ( $T_{13}$ ) هستند. در شکل (۱-۴) دیاگرام دما بر حسب نرخ انتقال حرارت در طول یک بویلر بازیاب سه فشاره با گرمایش مجدد نشان داده شده و برخی از متغیرهای تصمیم نیز در آن مشخص شده‌اند.



شکل (۱-۴): دیاگرام دما بر حسب نرخ انتقال حرارت در طول بویلر بازیاب

#### ۱-۲-۴ تأثیر نوع راکتور دستگاه تبدیل کننده گاز زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب

در این بخش به بررسی تأثیر نوع راکتور دستگاه تبدیل کننده زیست توده به گاز روی عملکرد بویلر بازیاب پرداخته شده است. با توجه به اینکه دستگاه‌های تبدیل کننده از نظر ساختار و نحوه‌ی عملکردشان تأثیرات متفاوتی روی ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده می‌گذارند، لذا گاز تولید شده از آنها نیز از نظر دمای احتراق، ارزش حرارتی و میزان آلاینده‌گی تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند که این عوامل نیز به نوبه خود در عملکرد بویلر بازیاب حرارت و عملکرد کل سیکل بسیار مؤثر هستند. همان‌گونه که قبلاً گفته شد دستگاه‌های تبدیل کننده گاز به‌طور کلی به دو دسته بستر ثابت (Fixed bed) و بستر سیال (Fluidized bed) تقسیم می‌شوند. تبدیل کننده گاز بستر ثابت را می‌توان به دو نوع

(Updraft) و (Downdraft) و نوع بستر سیال را به انواع (Bubbling fluidized bed) یا (BFB) و (Circulating fluidized bed) یا (CFB) طبقه‌بندی نمود. در جدول (۳-۴) تأثیر نوع راکتور در ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده و ارزش حرارتی آن نشان داده شده است [۵۶].

جدول (۳-۴): تأثیر راکتور در ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده و ارزش حرارتی [۵۶]

نوع دستگاه	ترکیبات گاز تولید شده (%vol)	عامل اکسیداسیون
Bubbling fluidized bed	H <sub>2</sub> : 9%, CO: 14%, CO <sub>2</sub> : 20%, CH <sub>4</sub> : 7%, N <sub>2</sub> : 50%	Air
Circulating fluidized bed	H <sub>2</sub> : 14.1%, CO: 18.7%, CO <sub>2</sub> : 14.7%, CH <sub>4</sub> : 3.5%, N <sub>2</sub> : 47.7%	Air
Updraft	H <sub>2</sub> : 11%, CO: 24%, CO <sub>2</sub> : 9%, CH <sub>4</sub> : 3%, N <sub>2</sub> : 53%	Air
Downdraft	H <sub>2</sub> : 17%, CO: 21%, CO <sub>2</sub> : 13%, CH <sub>4</sub> : 1%, N <sub>2</sub> : 48%	Air

همان‌طور که در جدول (۳-۴) نشان داده شده است نوع راکتور تبدیل‌کننده گاز اثرات متفاوتی روی ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده می‌گذارد. با توجه به اینکه هدف از کار حاضر رویکرد کاهش آلاینده‌گی بویلر بازیاب در شرایط بهینه عملکرد آن است، بایستی تحلیل و بررسی‌های لازم در میزان آلاینده‌گی بویلر بازیاب در شرایط استفاده از گاز تولیدی از هر یک از راکتورهای نام‌برده شده به عنوان سوخت سیکل صورت گیرد. در جدول (۴-۴) مقادیر بهینه پارامترهای بویلر بازیاب در راستای ماکزیمم کردن توان تولیدی سیکل و راندمان، در شرایط استفاده از زیست توده که توسط تبدیل‌کننده‌های نام‌برده شده به سوخت گازی تبدیل شده‌اند، ارائه و مقایسه شده است. واکنش احتراق بین ۹۰ کیلوگرم سوخت با ۴۱۰ کیلوگرم هوا در نظر گرفته شده است.

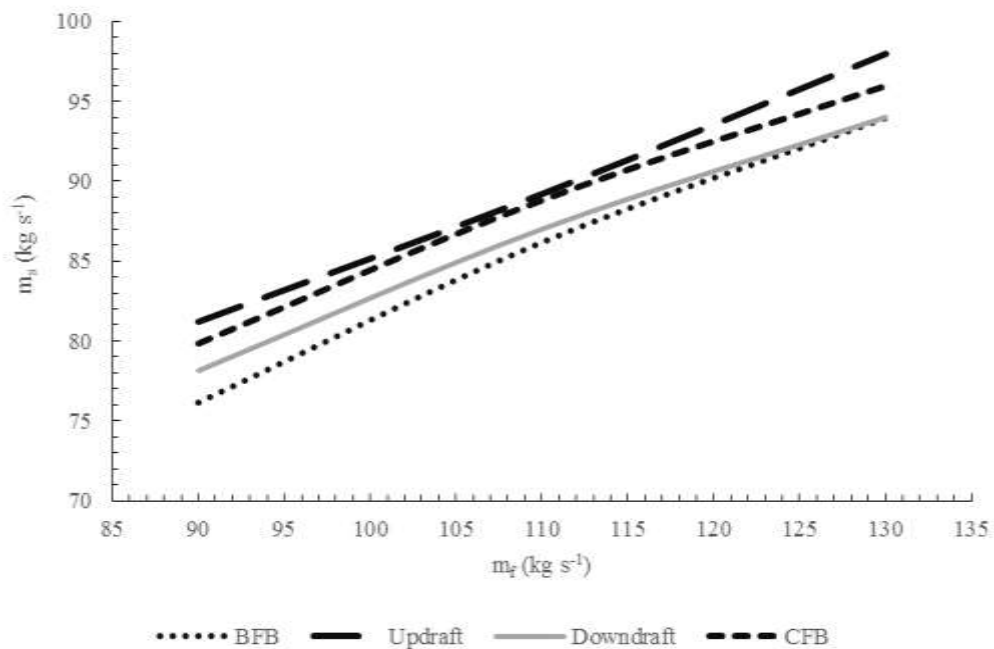
جدول (۴-۴): مقادیر بهینه پارامترهای طراحی بویلر بازیاب با هدف ماکزیمم سازی توان در شرایط استفاده

از ۹۰ کیلوگرم بر ثانیه گاز تولید شده از راکتورهای BFB، Updraft، Downdraft و CFB

واحد	Downdraft	Updraft	CFB	BFB	پارامتر
(K)	798.69	822.64	813.66	790.9	$T_D$
(-)	300%	269%	267%	264%	<i>Excess air</i>
(kg s <sup>-1</sup> )	50.64	53.56	51.82	48.84	$m_{W,HP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	10.42	13.59	13.23	12.74	$m_{W,IP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	17.08	14.01	14.82	15.28	$m_{W,LP}$
(K)	0.54	1.78	0.12	0.12	$PP_{HP}$
(K)	7.48	0.97	3.42	0.87	$PP_{IP}$
(K)	2.34	0.68	0.01	0.01	$PP_{LP}$
(bar)	94.47	121.26	111.39	94.47	$P_{HP}$
(bar)	27.63	27.52	26.95	27.3	$P_{IP}$
(bar)	1.36	1.79	1.79	1.58	$P_{LP}$
(K)	25.44	25	25.17	25.48	$\Delta T_{HP}$
(K)	25	25.12	25.1	25.57	$\Delta T_{IP}$
(K)	25	25.65	25	25.2	$\Delta T_{LP}$
(K)	25.78	25.92	25	25.4	$\Delta T_{RH}$
(K)	541.27	526.61	522.46	522.12	$T_{RH}$
(MW)	80.89	90.4	86.4	78.9	$W_{net}$
(%)	56.5	56.81	56	57.2	$\eta_{CC}$
(%)	76.3	77	76.8	76.1	$\eta_{th,camot}$

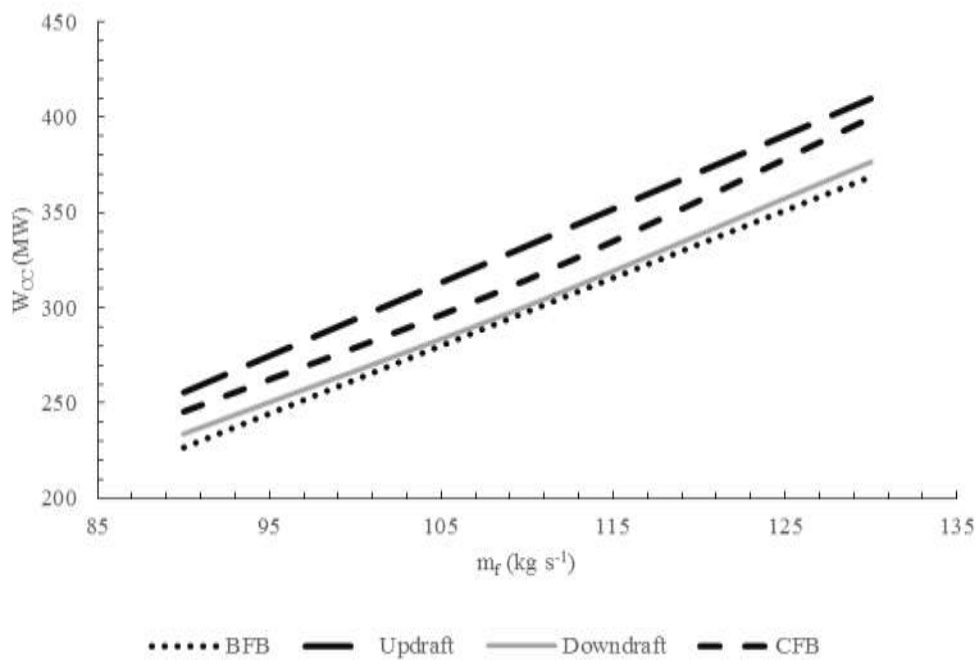
با مقایسه تغییرات دبی جرمی بخار تولیدی مراحل فشار پایین تا فشار بالا می‌توان پی برد که بویلر بازیاب در استفاده از زیست توده‌ای که توسط راکتور Updraft به سوخت گازی تبدیل شده است، میزان بخار بیشتری تولید نموده است. دلیل این امر بالاتر بودن دمای گازهای ورودی به بویلر در این حالت می‌باشد. به طور کلی افزایش دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب منجر به تولید بخار بیشتر و افزایش توان و راندمان سیکل می‌شود اما بایستی توجه کرد که افزایش دبی بخار تولیدی به علت بازیابی بیشتر گرما از گازهای داغ حاصل از احتراق منجر به کاهش دمای گازهای خروجی از بویلر بازیاب به کمتر از ۳۴۵ کلوین می‌شود که این عامل نیز باعث چگالش گازهای خروجی از بویلر خوردگی سطوح انتقال حرارت بویلر می‌گردد. بنابراین روند افزایش دبی جرمی بخار تولیدی به نحوی است که شرط محدودیت گازهای خروجی ۳۴۵ کلوین از بویلر را ارضا نماید. روند تغییرات بخار تولیدی بویلر بازیاب برحسب میزان دبی سوخت مصرفی هر یک از تبدیل‌کننده‌های مورد بررسی در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. مقادیر بهینه دمای پینچ بویلر بازیاب در هر سه حالت نیز در محدوده‌ی مجاز و مناسب به دست آمده‌اند. از میان دماهای پینچ بهینه شده تأثیر دمای پینچ فشار بالا در میزان توان تولیدی سیکل، بیش از دماهای پینچ فشار متوسط و پایین است. زیرا در بخش فشار بالای بویلر بازیاب دمای جریان گاز بسیار بیشتر بوده و این عامل منجر به تولید بخار بیشتر در سوپرهیتر فشار بالا نسبت به سوپرهیترهای فشار متوسط و پایین می‌گردد و هرچقدر اختلاف دمای بخار اشباع با جریان گاز (دمای پینچ) در این قسمت کمتر باشد، میزان بخار بیشتری توسط سوپرهیتر تولید شده و این عامل نیز موجب توان تولیدی بیشتر سیکل می‌گردد. به طور کلی با افزایش دمای جریان گازهای ورودی به بویلر بازیاب حرارت، میزان دمای پینچ به دلیل افزایش اختلاف دمای جریان گاز و آب، افزایش می‌یابد. با مقایسه دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در شرایط استفاده از سوخت راکتور Updraft با دمای پینچ سه حالت دیگر می‌توان به این نکته پی برد. علاوه بر این موضوع عامل دیگری که با افزایش دمای ورودی جریان گاز به بویلر، افزایش می‌یابد، فشار بخار است. با افزایش

دمای جریان گاز ورودی به بویلر بازیاب و به دنبال آن افزایش اختلاف دمای جریان گاز و آب، به منظور کاهش دمای پینچ و به طور کلی این اختلاف دما، بایستی میزان فشار بخار بویلر، به خصوص فشار جریان فشار بالای بویلر بازیاب افزایش یابد تا از این طریق دمای اشباع آب افزایش یافته و اختلاف دمای پینچ فشار بالا نیز با جریان گاز کمتر گردد. با مشاهده فشار جریان فشار بالای بویلر بازیاب در شرایط استفاده از سوخت راکتور Updraft و مقایسه آن با سه حالت دیگر می‌توان این موضوع را دریافت. در واقع روند افزایش فشار بخار به‌گونه‌ای است که شرط محدودیت دمای پینچ را ارضا نماید. با مقایسه توان تولیدی سیکل بخار در شرایط استفاده از سوخت تولید شده توسط راکتور Updraft می‌توان به این نکته پی برد که مقدار آن به میزان قابل توجهی بالاتر از توان تولیدی سیکل بخار در شرایط استفاده از سوخت تولید شده راکتورهای CFB و BFB و Downdraft می‌باشد و همان‌گونه که گفته شد دلیل این امر به سبب دمای بالاتر گازهای حاصل از احتراق سوخت تولیدی راکتور Updraft است. در شکل (۳-۴) میزان توان تولیدی ماکزیمم کل سیکل برحسب دبی سوخت مصرفی هر یک از راکتورهای مورد بررسی و در شکل (۴-۴) راندمان ماکزیمم سیکل در ازای شرایط یکسان دبی سوخت مصرفی (۹۰ کیلوگرم بر ثانیه) نشان داده شده است.

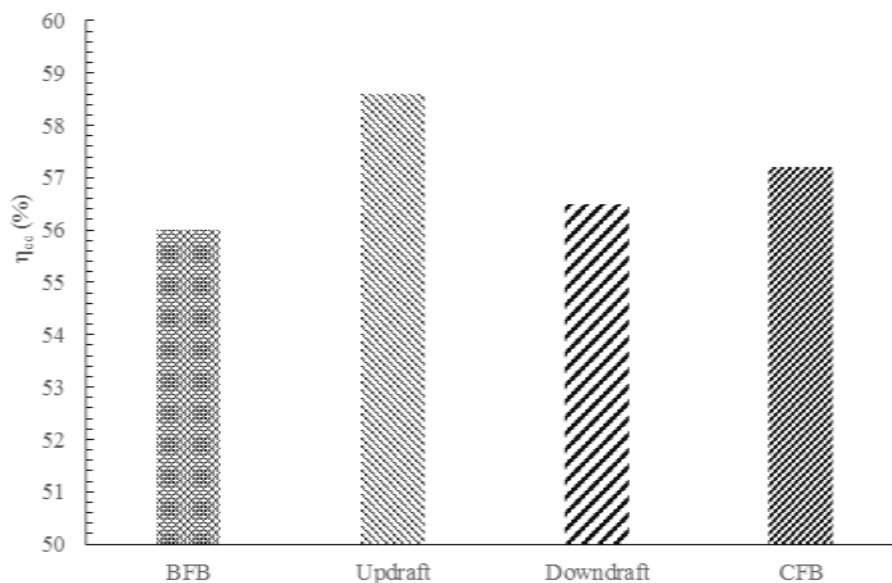


شکل (۴-۲): مقایسه میزان بخار تولیدی در حالت بهینه بویلر بازیاب بر حسب میزان دبی سوخت مصرفی هر یک از راکتورهای **Updraft**, **Downdraft**, **CFB** و **BFB**

با مشاهده نمودار (۴-۲) و مقایسه میزان بخار بهینه تولیدی بویلر بازیاب بین حالت‌های نشان داده شده می‌توان دریافت میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب در استفاده از سوخت راکتور **Updraft** بیش از سایرین بوده و این میزان در محدوده دبی سوخت مصرفی ۹۰ تا ۱۳۰ کیلوگرم بر ثانیه، بین ۸۱٫۱۶ تا ۹۷٫۹۷ کیلوگرم بر ثانیه است. همان‌گونه که گفته شد دمای احتراق بالاتر گازهای حاصل از احتراق سوخت راکتور **Updraft** منجر به انتقال گرمای بیشتر به آب و در نتیجه افزایش بخار تولیدی بویلر بازیاب می‌گردد. کمترین میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب نیز در استفاده از سوخت راکتور **BFB** به دلیل دمای احتراق پایین‌تر گازهای حاصل از احتراق آن نسبت به سوخت دیگر راکتورها است. میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب با میزان توان تولیدی سیکل رابطه مستقیم داشته و با افزایش میزان بخار تولیدی موجب افزایش توان تولیدی سیکل بخار و در نتیجه کل سیکل خواهد شد.



شکل (۳-۴): مقایسه توان ماکزیمم تولیدی سیکل در استفاده از سوخت مصرفی هر یک از راکتورهای BFB و Downdraft, Updraft, CFB

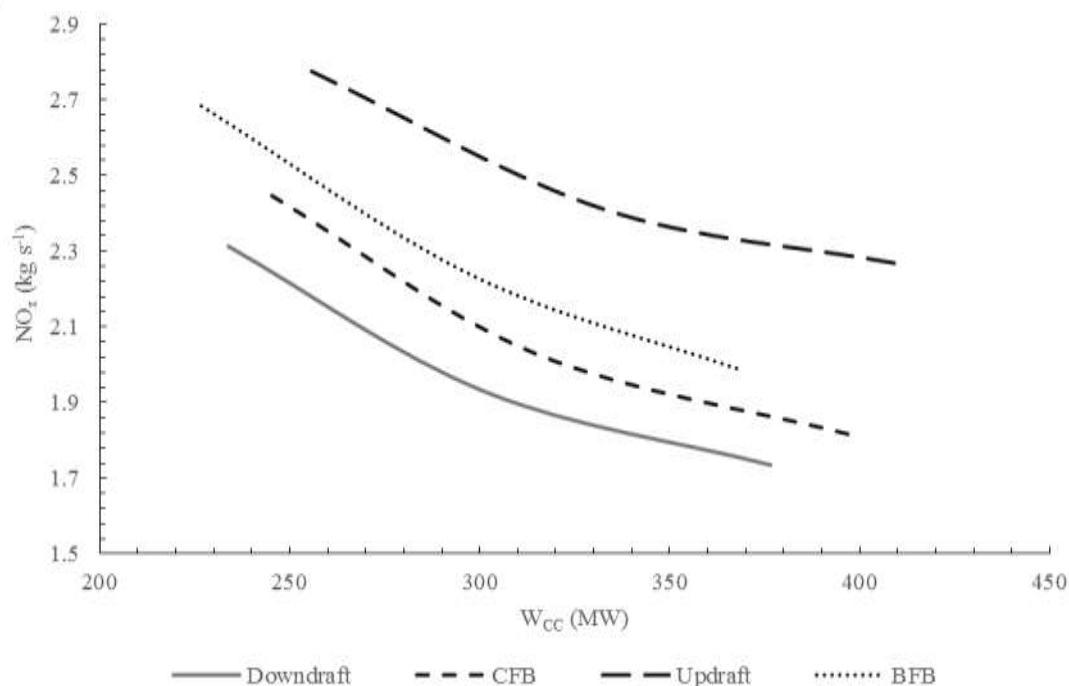


شکل (۴-۴): مقایسه راندمان ماکزیمم سیکل در شرایط یکسان دبی سوخت مصرفی (۹۰ کیلوگرم بر ثانیه) هر یک از راکتورهای BFB و Downdraft, Updraft, CFB

با مشاهده اشکال (۳-۴) و (۴-۴) و مقایسه توان و راندمان ماکزیمم سیکل در ازای سوخت مصرفی هر یک از راکتورهای مورد بررسی می‌توان به این نکته پی برد که توان تولیدی سیکل و راندمان آن در



شرایط استفاده از راکتور Updraft بیش از سوخت مصرفی سایر راکتورها است. اما به منظور انتخاب سوخت مناسب بایستی بررسی‌های لازم در جهت میزان آلاینده‌گی گازهای حاصل از احتراق سوخت مصرفی هر یک از این راکتورها صورت گیرد. در شکل (۴-۵) میزان  $\text{NO}_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق سوخت هر یک از راکتورهای مورد بررسی، برحسب توان تولیدی ماکزیمم سیکل نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): مقایسه میزان  $\text{NO}_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق سوخت راکتورهای BFB،

Updraft، CFB و Downdraft برحسب توان ماکزیمم تولیدی سیکل

همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشخص است، سیکل ترکیبی در ازای استفاده از سوخت راکتورهای Updraft و Downdraft در ازای توان یکسان تولیدی، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان آلاینده‌گی را خواهد داشت. به طور کلی میزان تولید  $\text{NO}_x$  گازهای حاصل از احتراق سوخت راکتور Downdraft به طور متوسط در شرایط یکسان توان تولیدی سیکل، به میزان ۵,۲٪ نسبت به سوخت راکتور CFB، ۱۵,۷٪ نسبت به سوخت راکتور BFB و ۲۶٪ نسبت به سوخت راکتور Updraft، کمتر است. به طور مثال در ازای فقط یک ساعت کار بویلر بازیاب در شرایط استفاده از سوخت راکتور Downdraft به

میزان ۱۸۰۰ کیلوگرم کاهش در میزان  $\text{NO}_x$  نسبت به استفاده از سوخت راکتور Updraft مشاهده نمود. بنابراین انتخاب نوع راکتور مناسب جهت تبدیل زیست توده به سوخت گازی امری ضروری و مهم به نظر می‌رسد. با افزایش میزان دبی سوخت مصرفی و کاهش درصد هوای اضافی در محفظه احتراق از میزان نیتروژن و اکسیژن واکنش احتراق کاسته شده و در نتیجه با افزایش دمای گازهای حاصل از احتراق و به دنبال آن افزایش توان تولیدی سیکل، از میزان  $\text{NO}_x$  موجود در گازهای احتراق کاسته خواهد شد. با مشاهده روند نزولی تولید  $\text{NO}_x$  گازهای حاصل از احتراق سوخت راکتورهای شکل (۴-۵) در ازای توان تولیدی سیکل می‌توان به این نکته پی برد. با تحلیل و بررسی‌های صورت گرفته می‌توان به این نتیجه رسید که اگرچه سیکل ترکیبی در شرایط استفاده از سوخت راکتور Updraft بیشترین توان و راندمان ممکن را داراست اما در این شرایط بویلر بازیاب بیشترین میزان  $\text{NO}_x$  را نسبت به سوخت دیگر راکتورها، تولید می‌نماید.

#### ۴-۲-۲ تأثیر عامل اکسیداسیون زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب

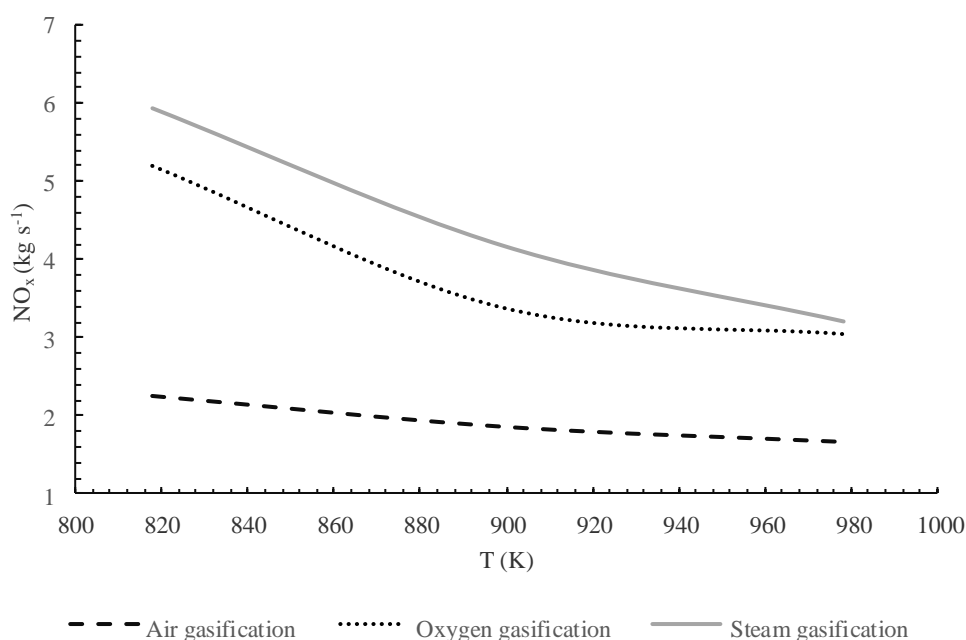
در این بخش به بررسی تأثیر عامل اکسیداسیون زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب از نظر راندمان سیکل، میزان آلاینده‌گی، توان تولیدی و مقادیر بهینه پارامترهای طراحی آن با هدف ماکزیمم کردن توان تولیدی سیکل پرداخته شده است. همان‌گونه که قبلاً گفته شد زیست توده را می‌توان با تزریق اکسیژن، هوا و یا بخار به داخل دستگاه تبدیل‌کننده گاز و انجام فرایند آشکافت داخل آن به سوخت گازی تبدیل نمود. اما بایستی توجه نمود که تزریق هر کدام از این عوامل به داخل دستگاه تأثیرات بسیار قابل توجهی در ترکیبات سوخت تولیدی و ارزش حرارتی آن و در نتیجه عملکرد کل سیکل خواهند گذاشت. در جدول (۴-۵) تأثیر عامل اکسیداسیون زیست توده در ترکیبات گاز تولیدی از زیست توده و همچنین هزینه تولید هر کیلووات برق از سوخت گازی زیست توده نشان داده شده است [۵۷-۵۹].

جدول (۴-۵): ترکیبات گاز تولیدی به همراه هزینه تولید یک کیلووات برق از سوخت تبدیل شده به گاز

زیست توده در حضور عوامل اکسیژن، هوا و بخار [۵۷-۵۹]

عامل گازی کننده	اکسیژن	هوا	بخار
ترکیبات (% mol)	H <sub>2</sub> :32%, CO:48%, CO <sub>2</sub> :15%, CH <sub>4</sub> :2%	H <sub>2</sub> :9.5%, CO:18%, CH <sub>4</sub> :2%, CO <sub>2</sub> :13.5%, N <sub>2</sub> :45%	H <sub>2</sub> :52%, CO:23%, CH <sub>4</sub> :7%, CO <sub>2</sub> :18%
حداقل هزینه (k€/kW <sub>e</sub> )	5.79	6.37	3
ارزش حرارتی (MJ/Nm <sup>3</sup> )	10-15	4-6	15-20
نوع راکتور	Downdraft	Downdraft	Downdraft

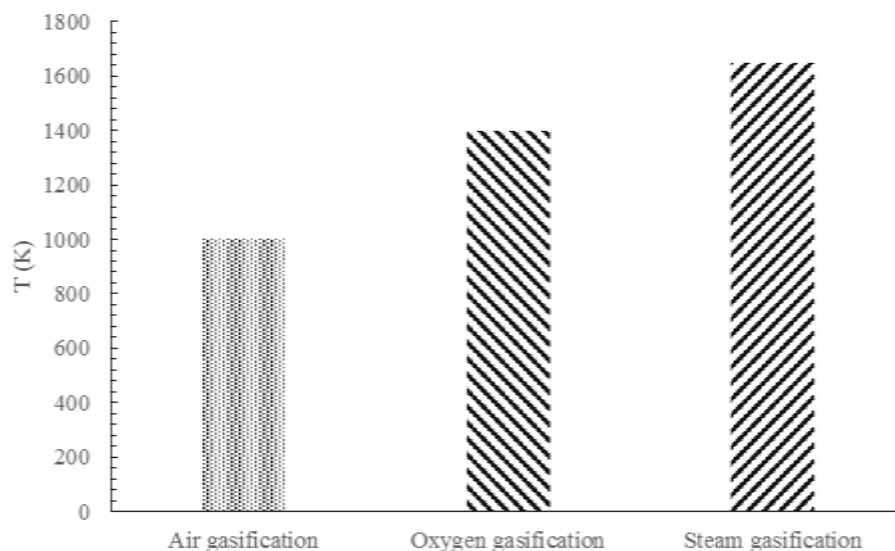
همان‌طور که در جدول (۴-۵) نشان داده شده است ارزش حرارتی زیست توده‌ای که در حضور عامل بخار به سوخت گازی تبدیل شده است دارای بیشترین ارزش حرارتی و کمترین میزان هزینه نسبت به زیست توده‌ای است که در حضور عوامل اکسیژن و هوا به سوخت گازی تبدیل شده است. به منظور اینکه استفاده از کدام یک از عوامل اکسیژن، هوا و بخار برای تبدیل زیست توده به سوخت گازی مناسب هستند بایستی سوخت تبدیل شده به گاز آن‌ها را از نظر میزان آلاینده‌گی، تولید توان و با در نظر گرفتن هزینه آن‌ها در ازای هر کیلووات توان تولیدی مقایسه نمود. در شکل (۴-۶) میزان آلاینده‌گی گازهای حاصل از احتراق زیست توده‌ای که توسط عوامل اکسیژن، هوا و بخار به سوخت گازی تبدیل شده، در ازای دمای این گازهای ورودی به بویلر بازیاب نشان داده شده است.



شکل (۴-۶): مقایسه میزان آلاینده‌گی بین سه سوخت تولیدی از زیست توده توسط عوامل اکسیژن هوا و بخار بر حسب دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب

با مشاهده شکل (۴-۶) و مقایسه گازهای حاصل از احتراق بین سه سوخت تولیدی توسط عامل اکسیژن، هوا و بخار، می‌توان دریافت که زیست توده‌ای که توسط عامل اکسیداسیون یا گازی کننده هوا به سوخت گازی تبدیل شده است، آلاینده‌گی بسیار کمتری نسبت به زیست توده‌ای که توسط عوامل اکسیداسیون اکسیژن و بخار به سوخت گازی تبدیل شده است دارد. میزان تولید  $\text{NO}_x$  گازهای حاصل از احتراق سوخت عامل گازساز بخار به طور میانگین ۱۲۴٪ بیش از سوخت عامل هوا و ۳۸٪ بیش از سوخت عامل اکسیژن است. بنابراین عامل گازی کننده زیست توده نقش مهمی در آلاینده‌گی بویلر بازیاب و در نتیجه کل سیکل ایفا می‌کند. با افزایش نسبت سوخت به هوا به منظور افزایش دمای احتراق، از میزان نیتروژن و اکسیژن موجود در مخلوط احتراق کاسته شده و در نتیجه از میزان  $\text{NO}_x$  تولیدی در محصولات کاسته می‌شود. با مشاهده‌ی روند نزولی تولید  $\text{NO}_x$  هر سه سوخت با افزایش دمای ورودی به بویلر بازیاب می‌توان به این نکته پی برد. در شکل (۴-۷) مقایسه بین سوخت تولیدی

در فرایندهای مربوطه از نظر دمای احتراق در شرایط یکسان دبی سوخت مصرفی (۴۰ کیلوگرم بر ثانیه) ارائه شده است.



شکل (۴-۷): مقایسه دمای گازهای حاصل از احتراق سوخت تولیدی در سه فرایند تبدیل به گاز با مقایسه دمای گازهای حاصل از احتراق سوخت تولیدی بین سه فرایند می توان دریافت که دمای احتراق سوخت تولیدی توسط عامل هوا به نسبت دو فرایند دیگر بسیار پایین تر بوده و با در نظر گرفتن دمای مناسب گازهای ورودی به توربین گاز که در محدوده ی ۱۳۰۰ تا ۱۷۰۰ کلوین است، می توان به این نتیجه رسید که دمای احتراق این فرایند فاقد دمای لازم برای ورود به توربین گاز و بویلر بازیاب می باشد و توجیهی برای تولید توان سیکل ندارد. لذا استفاده از زیست توده ای که توسط عامل هوا به سوخت گازی تبدیل شده است به عنوان سوخت نیروگاه به دلیل دمای احتراق پایین و تولید بسیار کم بخار و توان در این شرایط، منطقی به نظر نمی رسد. بنابراین می توان کاربرد سوخت تولیدی توسط عامل هوا را بیشتر در صنایع و تجهیزاتی دانست که نیازی به دمای بسیار بالای احتراق ندارند دانست. در جدول (۴-۶) مقادیر بهینه پارامترهای طراحی بویلر بازیاب به منظور ماکزیمم سازی توان در شرایط استفاده از ۴۰ کیلوگرم بر ثانیه گاز تولیدی از زیست توده توسط عوامل اکسیژن و

بخار به عنوان سوخت سیکل ارائه شده است. واکنش احتراق بین ۴۰ کیلوگرم سوخت با ۴۶۰ کیلوگرم هوا صورت گرفته است.

جدول (۴-۶) مقادیر بهینه پارامترهای طراحی بویلر بازیاب به منظور ماکزیمم سازی توان در شرایط استفاده از سوخت تولیدی طی دو فرایند Oxygen gasification و Steam gasification به عنوان

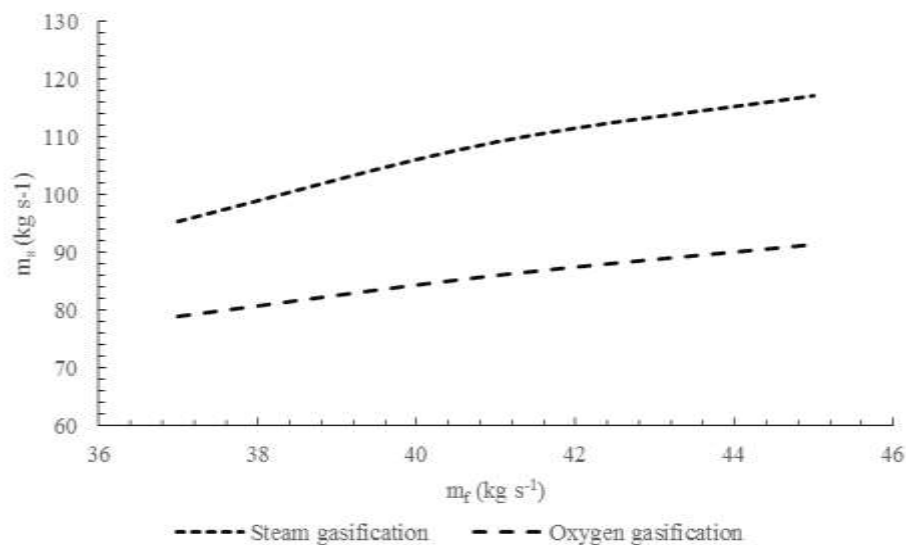
#### سوخت سیکل

واحد	Steam gasification	Oxygen gasification	پارامتر
(K)	948.37	806.4	$T_D$
(-)	168%	315%	<i>Excess air</i>
(kg s <sup>-1</sup> )	84.36	54.95	$m_{W,HP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	7.34	12.49	$m_{W,IP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	7.74	16.48	$m_{W,LP}$
(K)	6.83	5.98	$PP_{HP}$
(K)	3.81	3.02	$PP_{IP}$
(K)	11.36	5.54	$PP_{LP}$
(bar)	132	117.1	$P_{HP}$
(bar)	31.26	28.4	$P_{IP}$
(bar)	1.42	1.01	$P_{LP}$
(K)	56.94	25.39	$\Delta T_{HP}$
(K)	25.43	28.18	$\Delta T_{IP}$
(K)	25	25.1	$\Delta T_{LP}$
(K)	138.46	27.82	$\Delta T_{RH}$

(K)	603.12	520	$T_{RH}$
(MW)	142.45	95.93	$W_{net}$

با مشاهده‌ی جدول (۴-۶) و مقایسه میزان دبی بخار تولیدی بویلر بازیاب در شرایط استفاده سوخت تولیدی دو فرایند معرفی شده، می‌توان متوجه شد که بویلر بازیاب در حالت استفاده از گاز تولید شده از زیست توده توسط عامل بخار به عنوان سوخت سیکل، میزان بخار بیشتری نسبت به استفاده از گاز تولیدی توسط عامل اکسیژن تولید می‌نماید. مجموع بخار بهینه تولیدی فشار بالا تا فشار پایین بویلر بازیاب در استفاده از گاز عامل بخار، ۹۹،۴۴ کیلوگرم بر ثانیه و در شرایط استفاده از گاز عامل اکسیژن، ۸۳،۹۲ کیلوگرم بر ثانیه به دست آمده است. علت این امر بالاتر بودن دمای احتراق گاز عامل بخار، نسبت به سوخت گاز عامل اکسیژن است. با بالاتر رفتن دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب موجب انتقال حرارت بیشتر به آب و بیشتر شدن بخار تولیدی می‌گردد. در شکل (۴-۸) میزان بخار بهینه تولیدی بویلر بازیاب در استفاده از سوخت تولیدی طی فرایندهای نام‌برده شده نشان داده شده است. با مقایسه دمای پینچ مراحل فشار بالا تا فشار پایین بویلر بازیاب بین دو حالت بررسی شده می‌توان به این نکته پی برد که به‌طور کلی دمای پینچ بویلر در استفاده از گاز عامل بخار بیشتر از گاز عامل اکسیژن بوده و این تفاوت در تمامی دمای پینچ فشار بالا تا فشار پایین بویلر بازیاب مشاهده می‌شود. با افزایش دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب، میزان اختلاف دمای جریان گاز و آب بیشتر شده و در نتیجه باعث افزایش دمای پینچ می‌گردد. در شکل (۴-۹) تغییرات دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در شرایط استفاده از میزان سوخت مصرفی دو فرایند نام‌برده شده، مقایسه شده است. مقادیر فشار بخار مراحل فشار بالا تا فشار پایین بویلر بازیاب در استفاده از گاز عامل بخار به عنوان سوخت سیکل، بیشتر از حالت دیگر بدست آمده است. دلیل این موضوع نیز بالاتر بودن دمای گازهای حاصل از احتراق گاز عامل بخار در ورود به بویلر بازیاب حرارت و افزایش اختلاف دمای جریان گاز و آب می‌باشد. به منظور کاهش اختلاف دمای بخار اشباع با جریان گاز و در نتیجه کاهش دمای پینچ

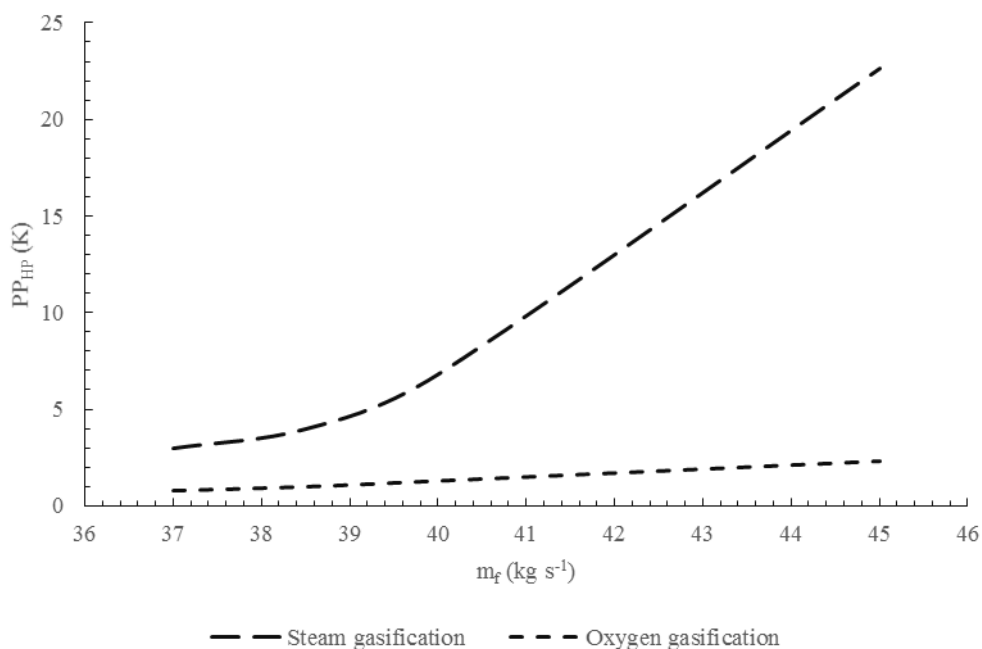
بایستی پمپ‌های آب فشار بالا، فشار متوسط و فشار پایین، میزان فشار آب ورودی به لوله‌های اکونومایزر را افزایش داده تا از این طریق میزان فشار اشباع آب در درام بخار افزایش پیدا کرده و باعث کاهش مقدار دمای پینچ گردد. در نتیجه این عامل باعث افزایش فشار بخار می‌گردد. با مقایسه توان تولیدی سیکل بخار بین دو حالت می‌توان دریافت که توان تولیدی در استفاده از گاز عامل بخار بسیار بیشتر از گاز عامل اکسیژن می‌باشد و علت آن را نیز می‌توان در شرایط یکسان، دمای بالاتر گازهای ورودی به بویلر و به دنبال آن افزایش بخار تولیدی توسط بویلر بازیاب و افزایش دمای بخار سوپرهیت عنوان کرد که این عوامل نیز باعث افزایش توان تولیدی توربین‌های بخار و در نتیجه افزایش توان سیکل خواهند شد. در شکل (۴-۱۱) میزان توان تولیدی کل سیکل برحسب دبی سوخت مصرفی دو فرایند و در شکل (۴-۱۲) نیز تغییرات راندمان کل سیکل برحسب دبی سوخت مصرفی دو فرایند ارائه و مقایسه شده است.



شکل (۴-۸): تغییرات بخار بهینه تولید شده توسط بویلر بازیاب در شرایط استفاده از سوخت تبدیل شده به گاز زیست توده طی فرایندهای **Oxygen gasification** و **Steam gasification** با مقایسه میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب طی استفاده از سوخت گازی دو فرایند می‌توان نتیجه گرفت که میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب در استفاده از گاز عامل بخار بیش از بخار در استفاده از گاز عامل اکسیژن است. در نسبت‌های دبی یکسان سوخت مصرفی دو فرایند، میزان بخار تولیدی توسط

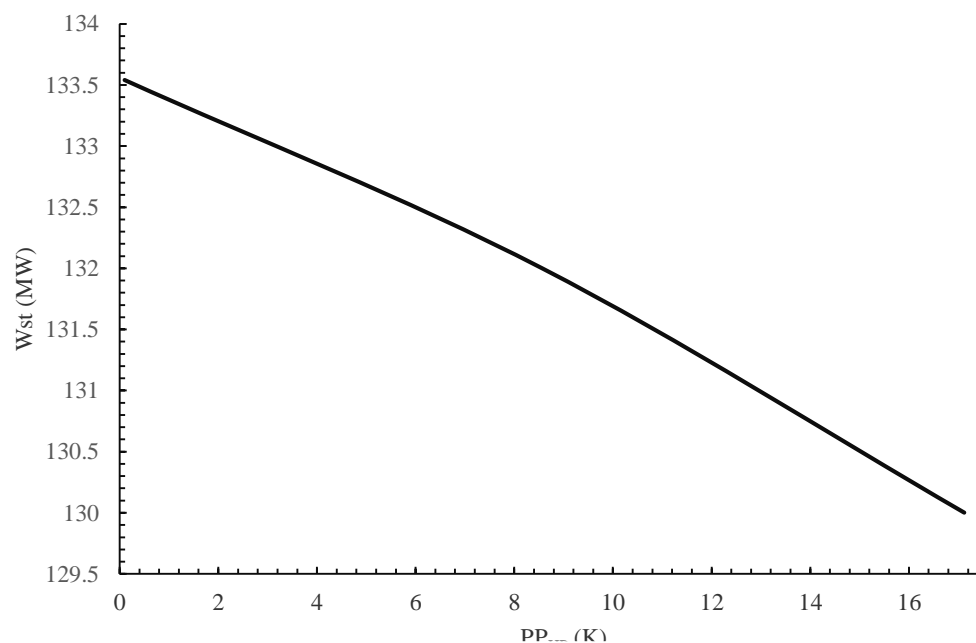


بویلر بازیاب، به طور متوسط ۲۳ کیلوگرم بر ثانیه با یکدیگر تفاوت دارند. علت این امر بالاتر بودن دمای احتراق گاز عامل بخار بوده که منجر به تولید بخار بیشتر می‌گردد. میزان بخار بهینه تولید شده توسط بویلر بازیاب تولید شده در استفاده از ۳۷ تا ۴۵ کیلوگرم از سوخت گازی تولید شده توسط عامل بخار بین ۹۵ تا ۱۱۸ کیلوگرم بر ثانیه است در صورتی که این میزان در استفاده از ۳۷ تا ۴۵ کیلوگرم گاز عامل اکسیژن بین ۸۷ تا ۹۱ کیلوگرم بر ثانیه است. محدوده انتخاب دبی سوخت مصرفی به‌گونه‌ای تعیین شده است که دمای گازهای حاصل از احتراق ورودی به توربین گاز در محدوده‌ی مناسب و مجاز (۱۳۰۰ تا ۱۷۰۰) به دست آید.



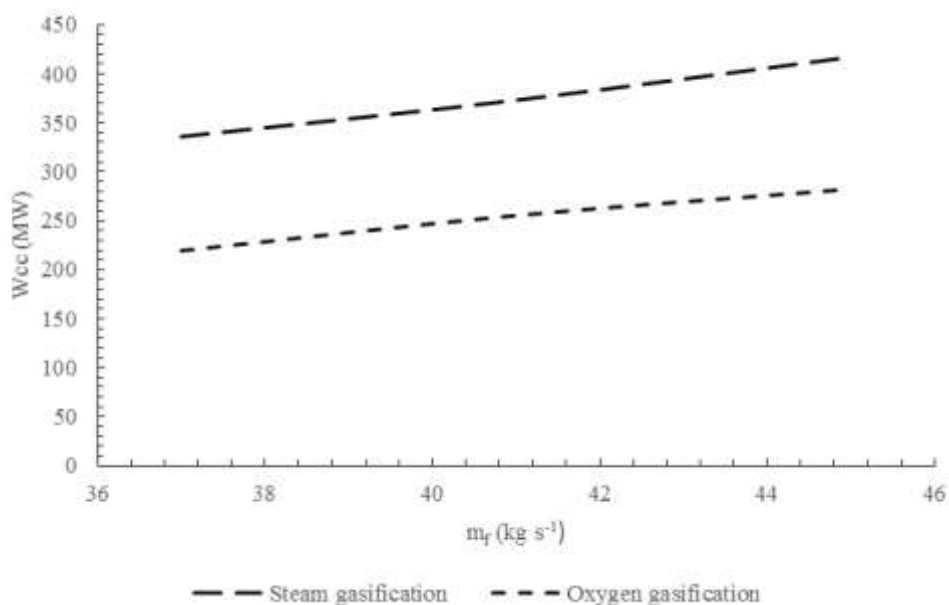
شکل (۴-۹): تغییرات دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در شرایط استفاده از زیست توده تبدیل شده به گاز، طی فرایندهای **Oxygen gasification** و **Steam gasification** یکی دیگر از پارامترهایی که در توان تولیدی و راندمان نقش بسزایی دارد دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب است. به دلیل اینکه در قسمت فشار بالای بویلر بازیاب میزان بخار بسیار بیشتری نسبت به قسمت‌های فشار متوسط و فشار پایین تولید می‌گردد، لذا تأثیر حداقل اختلاف دمای جریان گاز و آب یا همان دمای پینچ در این قسمت در میزان بخار تولیدی و در نتیجه تولید توان سیکل، بسیار بیشتر

از دمای پینچ فشار متوسط و پایین می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۴-۹) مشخص است، دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در شرایط استفاده از زیست توده تبدیل شده به گاز توسط عامل بخار نسبت به گاز عامل اکسیژن بیشتر بوده و اختلاف آن‌ها بخصوص در دبی‌های جرمی بالا به دلیل دمای احتراق بسیار بالای سوخت عامل بخار نسبت به سوخت تولیدی فرایند دیگر بیشتر مشاهده می‌شود. به‌طور کلی دماهای گاز ورودی بیش از ۱۰۰۰ کلوین به بویلر بازیاب به دلیل محدودیت در فشار اشباع بخار، منجر به افزایش بیشتر دمای پینچ می‌گردد. فشار بالا می‌گردد. در صورتی که از سوخت عامل بخار، بیش از ۴۰ کیلوگرم بر ثانیه مصرف گردد، موجب شده گازهای حاصل از احتراق آن به بالاتر از ۱۰۰۰ کلوین افزایش پیدا کرده و به دلیل محدودیت در فشار اشباع بخار، تغییرات دمای پینچ نیز با شدت بیشتری افزایش یابد. در صورتی که دمای گازهای حاصل از احتراق سوخت عامل اکسیژن در دبی‌های مصرفی بیش از ۴۰ کیلوگرم بر ثانیه و حتی تا ۴۵ کیلوگرم بر ثانیه، کمتر از ۱۰۰۰ کلوین است. در شکل (۴-۱۰) تأثیر دمای پینچ فشار بالا در تولید توان سیکل بخار ارائه شده است.



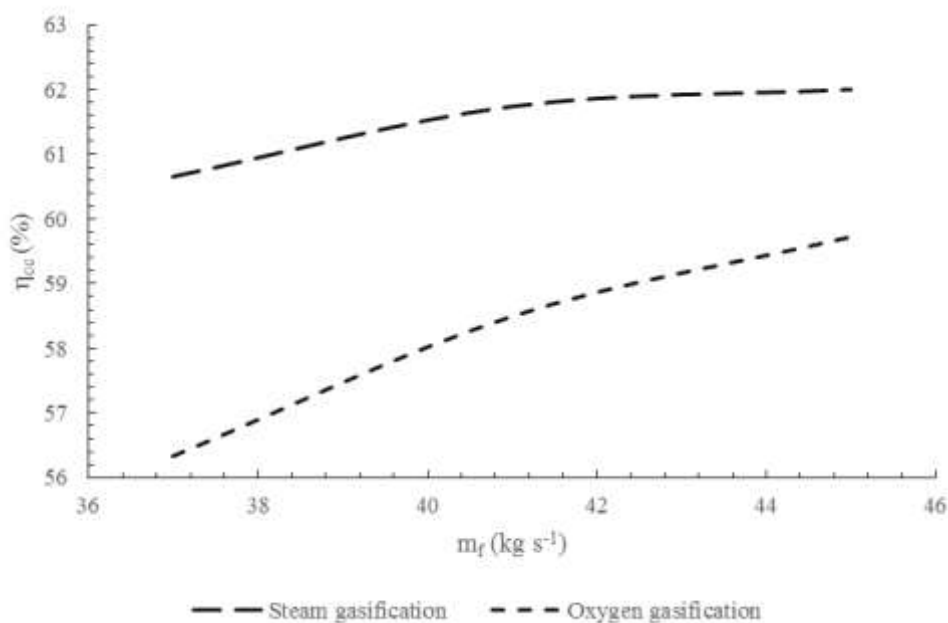
شکل (۴-۱۰): تأثیر دمای پینچ فشار بالا در تولید توان سیکل بخار

به طور کلی افزایش دمای پینچ فشار بالای بویلر منجر به کاهش گرمای بازیابی شده از جریان گازهای داغ، کاهش میزان بخار تولیدی و در نتیجه کاهش توان سیکل می‌گردد. با مشاهده شکل (۴-۱۲) می‌توان این موضوع را دریافت.



شکل (۴-۱۱): مقایسه توان تولیدی سیکل در شرایط استفاده از زیست توده تبدیل شده به گاز طی فرایندهای Steam gasification و Oxygen gasification به عنوان سوخت سیکل

همان طور که در شکل (۴-۱۲) مشخص است میزان توان تولیدی سیکل در استفاده از گاز تولیدی از زیست توده توسط عامل بخار بسیار بیشتر از گاز عامل اکسیژن بوده و این میزان در نسبت‌های دبی سوخت مصرفی یکسان بین ۱۱۸ تا ۱۲۵ مگاوات می‌باشد. دمای بالای گازهای حاصل از احتراق سوخت عامل بخار منجر به تولید بخار بیشتر بویلر بازیاب و در نتیجه افزایش میزان توان سیکل خواهد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که زیست توده‌ای که توسط عامل بخار به گاز تبدیل شده و از آن در نیروگاه استفاده شود میزان توان بسیار بیشتری کسب نمود. در شکل (۴-۱۳) راندمان سیکل در استفاده از گاز تولیدی از زیست توده توسط عوامل اکسیژن و بخار یا فرایندهای Steam gasification و Oxygen gasification یکدیگر مقایسه شده است.



شکل (۴-۱۲): مقایسه راندمان سیکل در شرایط استفاده از زیست توده تبدیل شده به گاز طی فرایندهای **Oxygen gasification** و **Steam gasification** به عنوان سوخت سیکل

با مشاهده‌ی شکل (۴-۱۲) می‌توان به این نکته پی برد راندمان کل سیکل در شرایط استفاده از زیست توده‌ای که توسط عامل بخار به گاز تبدیل شده است، برحسب میزان دبی گاز مصرفی بین ۶۰٫۵٪ تا ۶۲٪ متغیر می‌باشد. در صورتی که این میزان برای گاز تولیدی از زیست توده توسط عامل اکسیژن، بین ۵۶٫۳٪ تا ۵۹٫۷٪ است. دلیل این اختلاف را می‌توان در میزان توان تولیدی بیشتر سیکل از گاز عامل بخار دانست. با مشاهده روند تغییرات راندمان سیکل در استفاده از گاز عامل بخار، می‌توان به کند شدن شیب افزایش راندمان با افزایش میزان دبی جرمی مصرفی شد. به خاطر اینکه در دبی سوخت مصرفی بالا دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب زیاد است، مقدار دمای پینچ فشار بالای بویلر افزایش یافته و این عامل نیز باعث افزایش میزان تلفات گرمایی، کاهش میزان بخار تولیدی و در نتیجه کاهش توان سیکل می‌گردد. اما در مجموع به دلیل افزایش دما و به دنبال آن افزایش آنتالپی بخار ورودی به توربین گاز، راندمان سیکل به طرز محسوسی در دبی‌های سوخت مصرفی بالا و دمای گازهای بالای ورودی به بویلر بازیاب، افزایش می‌باید. با تحلیل و بررسی‌های صورت گرفته شده پیرامون میزان آلاینده‌گی، تولید توان سیکل و راندمان آن در استفاده از گاز تولیدی از زیست توده

توسط عوامل هوا، اکسیژن و بخار، می‌توان به این نتیجه رسید که گاز عامل بخار، آلاینده‌گی بسیار کمتری نسبت به سوخت تولیدی دو فرایند دیگر تولید می‌نماید. اما با در نظر گرفتن دمای احتراق بسیار پایین گازهای حاصل از احتراق آن که مناسب شرایط ورود به توربین گاز و بویلر بازیاب حرارت نیست، می‌توان از این سوخت در دیگر مصارف غیر از نیروگاه که نیازی به دمای احتراق بسیار بالا ندارند، به کار برده شود. با مقایسه گاز عوامل اکسیژن و بخار از نظر میزان راندمان سیکل و تولید توان آن، مشاهده شد که توان و راندمان سیکل در استفاده از گاز عامل بخار بسیار بیشتر بوده و نیز میزان تولید بخار توسط بویلر بازیاب و دمای پینچ آن طی این شرایط بیشتر است. اما بایستی توجه نمود میزان  $NO_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق سوخت عامل اکسیژن نیز به میزان قابل توجهی کمتر از سوخت عامل بخار در شرایط یکسان تولید توان سیکل و راندمان آن است. در صورت در نظر نگرفتن هزینه‌های بالای مربوط به تبدیل زیست توده به گاز توسط عامل اکسیژن، می‌توان کاهش قابل ملاحظه‌ای در آلاینده‌گی بویلر بازیاب و کل سیکل داشت. با مقایسه آلاینده‌گی این دو سوخت در شرایط یکسان تولید توان سیکل می‌توان پی برد که میزان آلاینده‌گی بویلر بازیاب در استفاده از گاز عامل اکسیژن به طور متوسط ۰٫۱۶٪ کمتر از میزان آلاینده‌گی بویلر بازیاب در استفاده از گاز عامل بخار است. بنابراین در صورتی که هدف از انتخاب نوع سوخت، کاهش میزان آلاینده‌گی بدون در نظر گرفتن هزینه‌های آن باشد، انتخاب گاز تولیدی از زیست توده توسط عامل اکسیژن مناسب‌تر می‌باشد. اما در صورتی که هدف از انتخاب سوخت، افزایش توان و راندمان سیکل با در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به آن باشد، انتخاب گاز عامل بخار مناسب‌تر است.

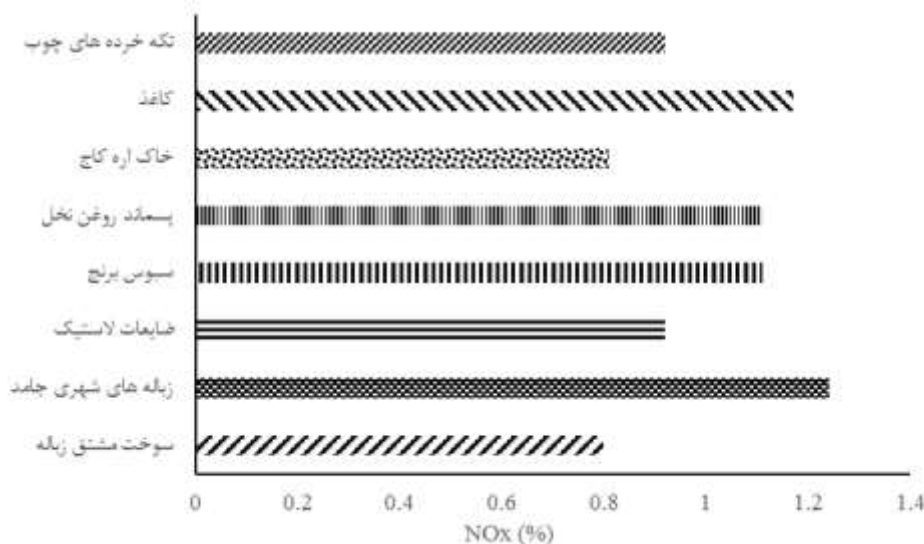
#### ۴-۲-۳ تأثیر نوع زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب حرارت

در این قسمت به تأثیر نوع زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب از نظر میزان آلاینده‌گی، میزان تولید بخار، تغییرات دمای پینچ، تولید توان و راندمان سیکل پرداخته شده است. با توجه به اینکه زیست توده به‌طور کلی برحسب محل پیدایش به سه نوع شهری، کشاورزی و جنگلی تقسیم می‌شود، لذا ترکیبات شیمیایی، ارزش حرارتی و میزان آلاینده‌گی آن‌ها نیز با یکدیگر تفاوت‌های بسیاری خواهند داشت و از این لحاظ در عملکرد بویلر بازیاب حرارت و در نتیجه عملکرد کل سیکل بسیار تأثیرگذار خواهند بود. در جدول (۴-۷) ترکیبات موجود در گاز تولیدی از انواع زیست توده توسط عامل بخار نشان داده شده است.

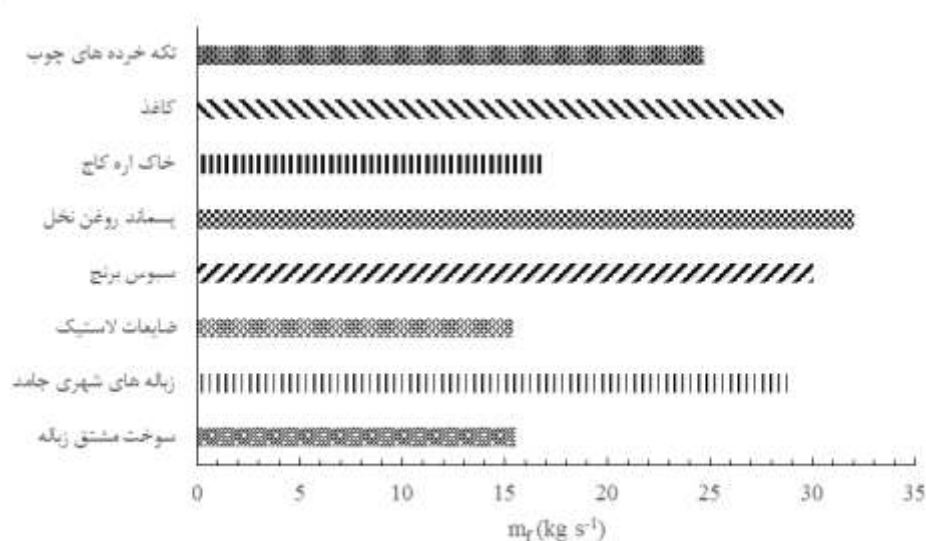
جدول (۴-۷): ترکیبات موجود در گاز تولیدی از انواع زیست توده توسط عامل بخار

ارزش حرارتی (MJ/kg)	ترکیبات (% vol)	نوع سوخت
28.91	O <sub>2</sub> : 2%, H <sub>2</sub> : 66.2%, CH <sub>4</sub> : 9.98%, CO: 17.37%, CO <sub>2</sub> : 4.59%, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 0.01%	سوخت مشتق زباله [۳۱]
13.85	H <sub>2</sub> : 53.29%, CO: 16.92%, CO <sub>2</sub> : 22%, CH <sub>4</sub> : 5.76, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 0.0101%, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : 0.097%	زباله شهری جامد [۱۴]
29.5	H <sub>2</sub> : 52.7%, CO: 18.1%, CO <sub>2</sub> : 7%, CH <sub>4</sub> : 22.2%	ضایعات لاستیک [۳۴]
14.2	H <sub>2</sub> : 57.98%, CO: 23.79%, CO <sub>2</sub> : 16.7%, CH <sub>4</sub> : 1.53%	سبوس برنج [۳۵]
13.28	H <sub>2</sub> : 53.6%, CO: 20.5%, CH <sub>4</sub> : 4.4%, CO <sub>2</sub> : 20.9%, C <sub>2</sub> : 0.04%	پسماند روغن نخل [۳۷]
25.2	H <sub>2</sub> : 57%, CO <sub>2</sub> : 6%, CH <sub>4</sub> : 14%, CO: 23%	خاکاره کاج [۶۰]
14.9	H <sub>2</sub> : 55%, CO: 32%, CO <sub>2</sub> : 12%, CH <sub>4</sub> : 1%	کاغذ [۶۰]
17.2	H <sub>2</sub> : 60%, CO: 30.1%, CO <sub>2</sub> : 9%, CH <sub>4</sub> : 0.9%	تکه خرده‌های چوبی [۶۰]

در شکل (۴-۱۳) میزان  $\text{NO}_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق زیست توده‌های موجود در جدول (۴-۷) در ازای دمای یکسان گازهای حاصل از احتراق (۱۴۰۰ کلوین) و در نتیجه دمای یکسان ورودی به بویلر بازیاب حرارت نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۳): مقایسه درصد جرمی  $\text{NO}_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق انواع زیست توده در شرایط دمای یکسان گازهای حاصل از احتراق آن‌ها (۱۴۰۰ کلوین) با مقایسه میزان آلاینده‌گی زیست توده‌های موجود در جدول (۴-۷) می‌توان دریافت میزان آلاینده‌گی سوخت مشتق زباله در مقایسه با سایر زیست توده‌ها کمتر است. در این مقایسه میزان  $\text{NO}_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق سوخت مشتق زباله به طور متوسط، ۴۴٪ نسبت به زباله‌های شهری، ۱۲٪ نسبت به ضایعات لاستیک، ۳۱٪ نسبت به سبوس برنج و پسماند روغن نخل و ۰٫۰۱٪ نسبت به خاک‌اره کاج، ۳۷٪ نسبت به کاغذ و ۱۲٪ نسبت به تکه خرده‌های چوبی کمتر است. در شکل (۴-۱۴) میزان دبی سوخت مصرفی زیست توده‌های موجود در جدول (۴-۷) در ازای دمای یکسان گازهای حاصل از احتراق آن‌ها نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۴): مقایسه میزان دبی مصرفی انواع رایج و پر کاربرد زیست توده در شرایط دمایی یکسان گازهای حاصل از احتراق آن‌ها (۱۴۰۰ کلوین)

با مشاهده نتایج حاصل از میزان دبی سوخت مصرفی زیست توده‌های مورد بررسی در شکل (۴-۱۵) و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، کمترین میزان دبی مصرفی زیست توده در ازای دمای احتراق یکسان برای زیست توده ضایعات لاستیک به دست آمده است. و دلیل آن را می‌توان در ارزش حرارتی بالاتر این سوخت نسبت به بقیه زیست توده‌ها دانست. همان‌طور که در این شکل پیداست، میزان دبی مصرفی سوخت مشتق زباله، ضایعات لاستیک و خاکاره کاج نسبت به باقی زیست توده‌ها بسیار کمتر و از این حیث قابل مقایسه با آن‌ها از نظر تولید توان سیکل، عملکرد بویلر بازیاب و راندمان سیکل در شرایط یکسان دبی سوخت مصرفی نیستند. برای این منظور زیست توده‌های ضایعات لاستیک، سوخت مشتق زباله و خاکاره کاج در شرایط یکسان دبی سوخت مصرفی و باقی زیست توده‌ها که شرایط یکسانی از نظر دبی مصرفی و ارزش حرارتی دارند، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در جدول (۴-۸) نتایج ناشی از بهینه‌سازی پارامترهای طراحی بویلر بازیاب در استفاده از ۱۶ کیلوگرم بر ثانیه از انواع زیست توده‌های سوخت مشتق زباله، ضایعات لاستیک و خاکاره کاج، به عنوان سوخت سیکل و احتراق آن با ۴۸۴ کیلوگرم بر ثانیه هوا، ارائه شده است.

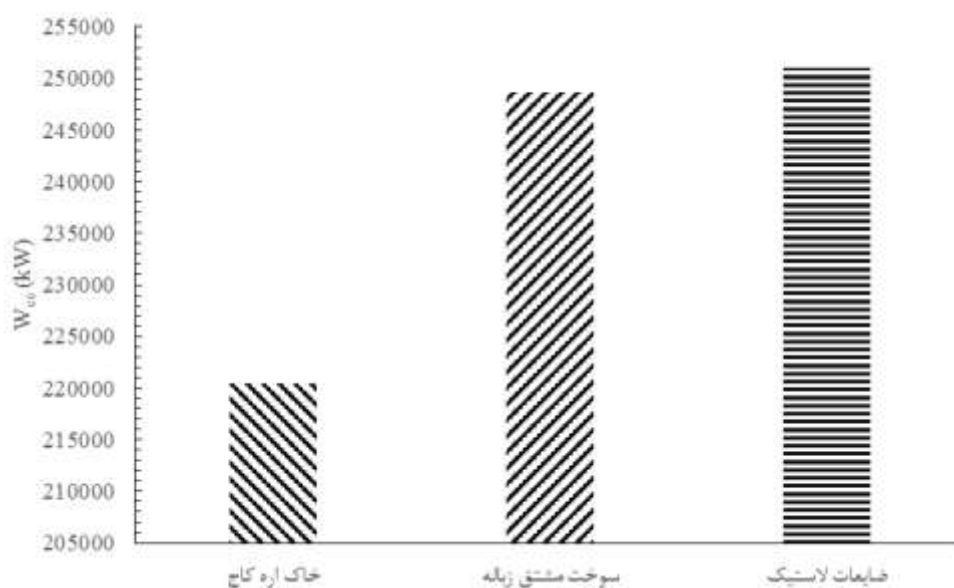


جدول (۴-۸): مقایسه مقادیر بهینه پارامترهای بهینه‌سازی شده بویلر بازیاب به منظور ماکزیمم سازی توان سیکل، در شرایط استفاده از سه زیست‌توده‌ی سوخت مشتق زباله، ضایعات لاستیک و خاکاره کاج

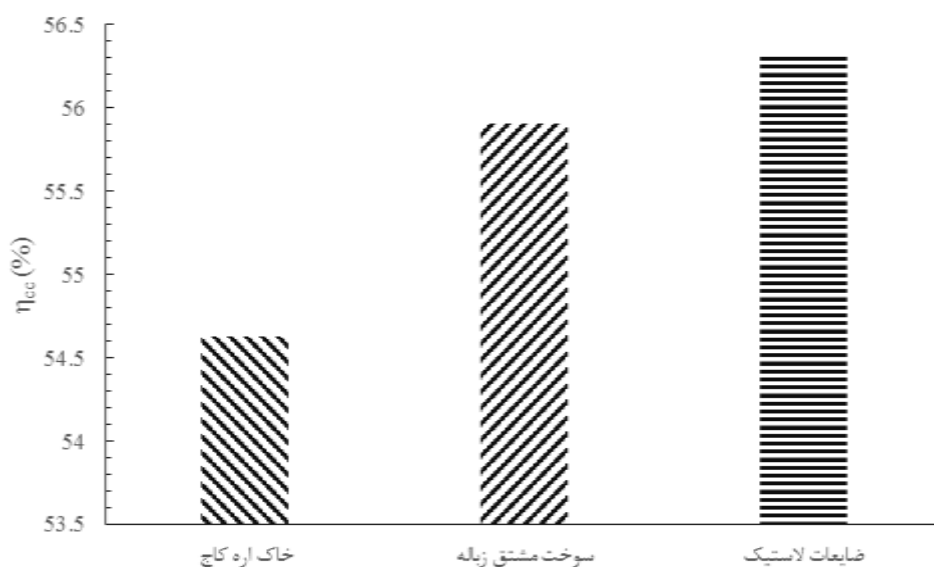
به عنوان سوخت سیکل

واحد	ضایعات لاستیک	سوخت مشتق زباله	خاکاره کاج	پارامتر
(K)	854.3	851.37	817.25	$T_D$
(-)	252%	285%	303%	$Excess\ air$
(kg s <sup>-1</sup> )	57.56	57.33	51.82	$m_{W,HP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	12.25	13.11	14.01	$m_{W,IP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	13.91	12.65	14.77	$m_{W,LP}$
(K)	1.05	1.27	4.57	$PP_{HP}$
(K)	3.86	0.1	1.91	$PP_{IP}$
(K)	3.37	2.56	2.09	$PP_{LP}$
(bar)	119.3	115.52	105.34	$P_{HP}$
(bar)	28.52	29.25	28.52	$P_{IP}$
(bar)	1.54	1.79	1.5	$P_{LP}$
(K)	25	25	29	$\Delta T_{HP}$
(K)	25	28.42	25	$\Delta T_{IP}$
(K)	26	25	25	$\Delta T_{LP}$
(K)	27	26.09	27.45	$\Delta T_{RH}$
(K)	528	527	525.62	$T_{RH}$
(MW)	99.97	98.84	87.22	$W_{net}$

با مشاهده میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب در شرایط استفاده از زیست توده‌های مورد بررسی در جدول (۴-۸) می‌توان دریافت میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب در شرایط استفاده از ضایعات لاستیک به‌عنوان سوخت سیکل، به دلیل دمای بالاتر گازهای حاصل از احتراق آن نسبت به دو زیست توده دیگر، بیشتر می‌باشد. میزان بخار بهینه تولید شده توسط بویلر بازیاب در استفاده از ضایعات لاستیک، سوخت مشتق زباله و خاکاره کاج به ترتیب، ۸۳،۷۲، ۸۳،۰۹ و ۸۰،۶ کیلوگرم بر ثانیه به‌دست آمده است. در این مقایسه میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب در استفاده از دو زیست توده سوخت مشتق زباله و ضایعات لاستیک بسیار به هم نزدیک هستند. دلیل این دمای احتراق نزدیک به هم آن‌ها (۸۵۴ و ۸۵۷ کلوین) می‌باشد در صورتی که دمای گازهای حاصل از احتراق خاکاره کاج پایین‌تر بوده (۸۱۷ کلوین) و میزان بخار تولیدی آن نیز کمتر است. مقادیر دمای پینچ، فشار بخار و اختلاف دماهای بخار سوپرهیت با جریان گاز نیز در محدوده‌ی مجاز و مناسب به‌دست آمده‌اند. همان‌طور که در جدول (۴-۸) نشان داده شده است، مقادیر فشار بخار بویلر بازیاب به ترتیب از زیست توده خاکاره کاج تا ضایعات لاستیک، روند افزایشی داشته است. همان‌گونه که قبلاً گفته شد با بالاتر رفتن دمای گاز ورودی به بویلر بازیاب، به‌طور کلی دمای پینچ و در نتیجه تلفات گرمایی افزایش می‌یابد. برای جبران این نقیصه میزان فشار بخار بویلر بازیاب افزایش پیدا کرده تا از این طریق دمای اشباع آب افزایش پیدا کرده و از این طریق دمای پینچ کاهش یافته و تلفات گرمایی نیز به حداقل برسد. با مقایسه فشار بخار بویلر بازیاب بین سه زیست توده و با در نظر گرفتن دمای گازهای حاصل از احتراق بالاتر ضایعات لاستیک می‌توان این موضوع را متوجه شد. توان تولیدی ماکزیمم سیکل بخار نیز در شرایط استفاده از ضایعات لاستیک به‌عنوان سوخت سیکل بیش از توان تولیدی در شرایط استفاده از دو زیست توده دیگر به‌دست آمده است. در شکل (۴-۱۵) و (۴-۱۶) مقادیر توان ماکزیمم کل سیکل و راندمان آن در استفاده از این سه زیست توده ارائه شده است.



شکل (۴-۱۵): مقایسه توان تولیدی سیکل در شرایط استفاده از زیست توده‌های ضایعات لاستیک، سوخت مشتق زباله و خاک‌اره کاج، به عنوان سوخت سیکل



شکل (۴-۱۶): مقایسه راندمان سیکل در شرایط استفاده از زیست توده‌های ضایعات لاستیک، سوخت مشتق زباله و خاک‌اره کاج، به عنوان سوخت سیکل

همان‌طور که در اشکال (۴-۱۵) و (۴-۱۶) مشخص است، میزان توان تولیدی و راندمان سیکل در استفاده از ضایعات لاستیک در شرایط دبی مصرفی یکسان بیش از دو زیست توده دیگر بوده و از این حیث در جایگاه بهتری قرار دارد. اما بایستی توجه نمود میزان آلاینده‌گی آن نیز به نسبت دو زیست توده دیگر بیشتر می‌باشد. از طرفی با در نظر گرفتن دمای احتراق نزدیک به هم دو سوخت

ضایعات لاستیک و سوخت مشتق زباله، می‌توان کمتر بودن دمای احتراق سوخت مشتق زباله را تنها با اندکی استفاده از میزان سوخت بیشتر نسبت به ضایعات لاستیک (حدود ۰,۱ کیلوگرم بر ثانیه بیشتر)، این کاهش توان تولیدی و راندمان را جبران نمود و علاوه بر آن کاهش قابل ملاحظه‌ای در تولید آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  نسبت به ضایعات لاستیک داشت. این کاهش آلاینده‌گی زمانی با اهمیت به نظر می‌آید که در ازای تنها یک ساعت کار بویلر بازیاب در شرایط استفاده از سوخت مشتق زباله به‌عنوان سوخت سیکل، به میزان ۲۱۶۰ کیلوگرم کاهش در تولید  $\text{NO}_x$  نسبت به استفاده از ضایعات لاستیک مشاهده نمود. بنابراین از میان سه زیست توده مورد بررسی، سوخت مشتق زباله هم به لحاظ تولید آلاینده  $\text{NO}_x$  و هم از نظر تولید توان و راندمان سیکل انتخاب منطقی‌تر و مناسب‌تری است. در جدول (۴-۹) نتایج ناشی از بهینه‌سازی پارامترهای طراحی بویلر بازیاب به منظور ماکزیمم سازی توان تولیدی سیکل در شرایط استفاده از ۳۰ کیلوگرم بر ثانیه از انواع زیست توده‌های سبوس برنج، زباله‌های شهری جامد، تکه خرده‌های چوب، کاغذ و پسماند روغن نخل به‌عنوان سوخت سیکل و احتراق آن با ۴۷۰ کیلوگرم بر ثانیه هوا، ارائه شده است.

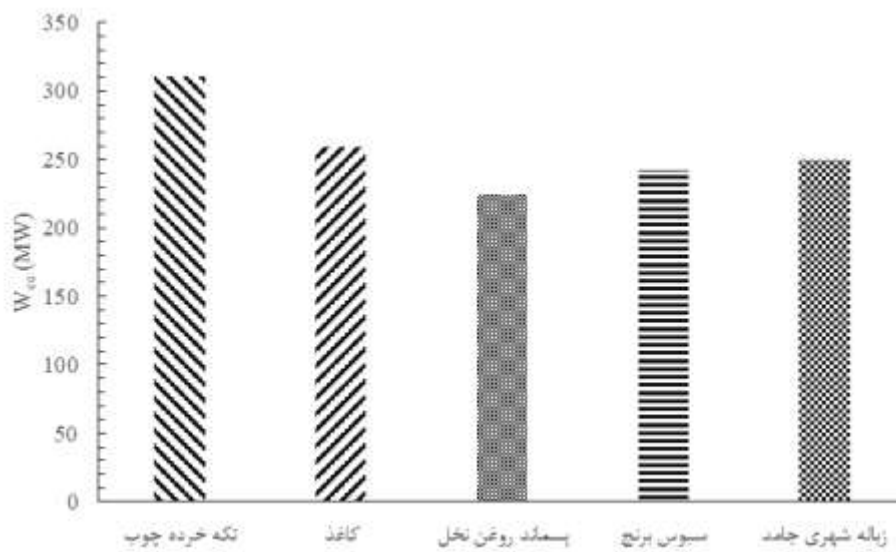
جدول (۴-۹): مقایسه مقادیر بهینه پارامترهای بهینه‌سازی شده بویلر بازیاب به منظور ماکزیمم سازی توان

سیکل، در شرایط استفاده از زیست‌توده‌های سبوس برنج، زباله شهری جامد، تکه خرده چوب، کاغذ و

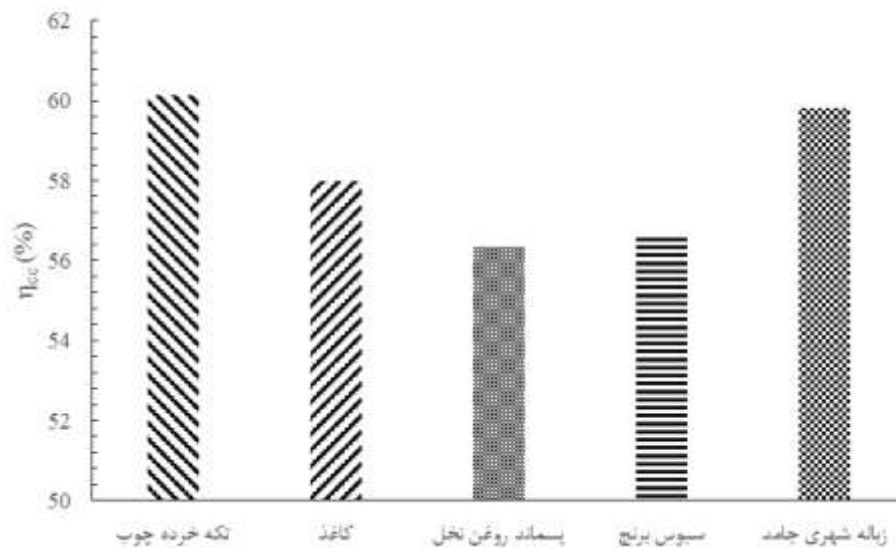
پسماند روغن نخل به عنوان سوخت سیکل

واحد	پسماند روغن نخل	کاغذ	تکه خرده چوب	زباله شهری جامد	سبوس برنج	پارامتر
(K)	815.4	858.5	815.4	848.98	838.8	$T_D$
(-)	311%	288%	234%	265%	299%	<i>Excess air</i>
(kg s <sup>-1</sup> )	52.82	58.09	70.68	57.24	53.62	$m_{W,HP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	10.36	12.77	9.8	12.7	16.26	$m_{W,IP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	16.45	12.06	10.8	12.8	10.86	$m_{W,LP}$
(K)	1.03	0.838	0.66	0.02	1.8	$PP_{HP}$
(K)	10.13	2.83	4.15	0.59	0.03	$PP_{IP}$
(K)	6.63	9.18	6.17	2.08	4.66	$PP_{LP}$
(bar)	96.96	109.27	122.5	113.51	94.47	$P_{HP}$
(bar)	24.89	23.06	26.35	27.89	20.99	$P_{IP}$
(bar)	1.09	0.99	1.6	1.77	1.42	$P_{LP}$
(K)	28.9	26.55	26.68	26.92	25.38	$\Delta T_{HP}$
(K)	26	26.78	28.37	25	25.77	$\Delta T_{IP}$
(K)	25.9	26.55	25	25	25.49	$\Delta T_{LP}$
(K)	27.35	27.22	73	28.23	25.52	$\Delta T_{RH}$
(K)	531.27	527.93	559.55	529.44	520.88	$T_{RH}$
(MW)	86.44	101.18	124.15	98.54	94.31	$W_{net}$

با مقایسه میزان بخار تولید شده بویلر بازیاب در شرایط استفاده از زیست‌توده‌های مورد بررسی می‌توان مشاهده نمود که میزان بخار تولیدی بویلر بازیاب در شرایط استفاده از زیست‌توده تکه خرده‌های چوبی بیش از سایر زیست‌توده‌ها بوده و علت آن را نیز می‌توان به بالاتر بودن دمای گازهای حاصل از احتراق این زیست‌توده نسبت به سایر زیست‌توده‌ها نسبت داد. مقادیر دمای بهینه پینچ نیز برای تمامی زیست‌توده‌های مورد بررسی در شرایط حداقل دمای ممکن به دست آمده است. زیرا در این شرایط بیشترین میزان بخار تولیدی از بویلر بازیاب را می‌توان مشاهده نمود. با مقایسه فشار بخار بهینه بویلر بازیاب بین زیست‌توده‌های مورد بررسی می‌توان دریافت فشار بخار به‌طور کلی از زیست‌توده پسماند روغن نخل تا تکه خرده‌های چوبی روند افزایشی مخصوصاً در فشار بخار متوسط و بالا به علت روند افزایشی دمای گازهای حاصل از احتراق آن‌ها داشته است. همان‌گونه که قبلاً گفته شد به علت افزایش دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب، میزان اختلاف دمای جریان آب و گاز زیاد شده و در نتیجه مقادیر دمای پینچ افزایش می‌یابد. برای جبران این موضوع بایستی مقادیر فشار اشباع آب در اواپراتورها افزایش یافته تا از این طریق مقادیر دمای پینچ کاهش یافته و در نتیجه آن تولید بخار و توان افزایش یابد. مقادیر توان ماکزیمم تولیدی سیکل بخار نیز در شرایط استفاده از تکه خرده‌های چوبی به علت بالاتر بودن دمای گازهای حاصل از احتراق آن نسبت به سایر زیست‌توده‌ها که منجر به تولید بخار بیشتر و همچنین دمای بالاتر بخار مافوق گرم بویلر بازیاب می‌شود، بیشتر است. در اشکال (۴-۱۷) و (۴-۱۸) میزان توان تولیدی کل سیکل و نیز راندمان کل سیکل در شرایط استفاده از زیست‌توده‌های مورد بررسی در جدول (۴-۸) به عنوان سوخت سیکل، نشان داده شده است.



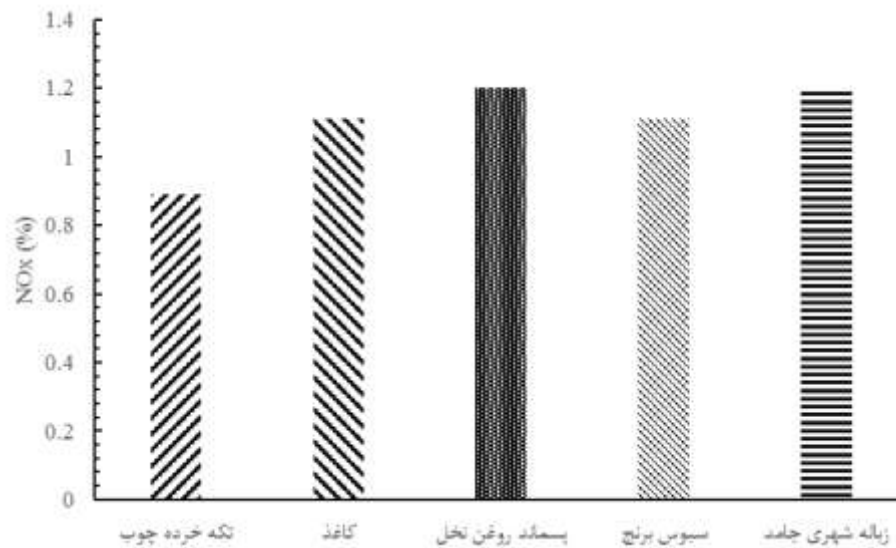
شکل (۴-۱۷): مقایسه توان تولیدی سیکل در شرایط استفاده از زیست توده‌های کاغذ، تکه خردده چوب، پسماند روغن نخل، سبوس برنج و زباله شهری جامد، به عنوان سوخت



شکل (۴-۱۸): مقایسه راندمان سیکل در شرایط استفاده از زیست توده‌های کاغذ، تکه خردده چوب، پسماند روغن نخل، سبوس برنج و زباله شهری جامد، به عنوان سوخت

با مقایسه توان و راندمان سیکل در شرایط استفاده از زیست توده‌های مورد بررسی می‌توان دریافت که سیکل ترکیبی در شرایط استفاده از تکه خردده‌های چوبی بیشترین توان و راندمان ممکن را ارائه می‌دهد. در این مقایسه کاغذ، زباله شهری جامد، سبوس برنج و پسماند روغن نخل در جایگاه‌های بعدی بیشترین توان تولیدی قرار دارند. اما به منظور انتخاب زیست توده مناسب از میان

زیست‌توده‌های مورد بررسی بایستی میزان تولید آلاینده‌گی آن‌ها در شرایط دبی یکسان مصرفی مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. بدین منظور در شکل (۴-۱۹) درصد  $NO_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق چند نوع زیست در شرایط یکسان دبی سوخت مصرفی (۳۰ کیلوگرم بر ثانیه) آن‌ها مقایسه شده است.



شکل (۴-۱۹): درصد جرمی  $NO_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق زیست‌توده‌های کاغذ، تکه خرده چوب، پسماند روغن نخل، سبوس برنج و زباله شهری جامد در شرایط دبی مصرفی (۳۰ کیلوگرم بر ثانیه)

با تحلیل و بررسی‌های صورت گرفته پیرامون زیست‌توده‌های زباله‌های شهری جامد، سبوس برنج، پسماند روغن نخل، کاغذ و تکه خرده‌های چوبی از نظر تولید بخار بویلر بازیاب، تولید توان سیکل، راندمان سیکل و میزان تولید آلاینده‌گی، به این جمع‌بندی می‌توان رسید که تکه خرده‌های چوبی به لحاظ تولید بخار بویلر، تولید توان سیکل، راندمان و هم از لحاظ تولید آلاینده  $NO_x$ ، همان‌گونه که در شکل (۴-۱۹) مشخص است، در جایگاه بهتری قرار داشته و انتخاب مناسب‌تری از بین زیست‌توده‌های مورد بررسی برای سوخت نیروگاه است. در این مقایسه تکه خرده‌های چوبی با  $0.89\%$   $NO_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق، کاغذ و سبوس برنج با  $1.11\%$ ، زباله شهری جامد و پسماند روغن نخل با



۱,۲٪ NOx موجود در گازهای حاصل از احتراق به ترتیب کمترین تا بیشترین میزان تولید آلاینده‌گی را دارا هستند.

## ۴-۲-۴ مقایسه زیست توده و گاز طبیعی از نظر توان تولیدی سیکل، راندمان سیکل و میزان آلاینده‌گی

با توجه به اینکه یکی از اهداف کار حاضر کاهش میزان آلاینده‌گی بویلر بازیاب و در نتیجه کل سیکل است، بایستی مقایسه‌ای بین زیست توده و سوخت‌های فسیلی نظیر گاز طبیعی از نظر میزان آلاینده‌گی گازهای حاصل از احتراق آن‌ها صورت گیرد. همچنین بایستی دید عملکرد بویلر بازیاب از نظر توان تولیدی سیکل و راندمان در شرایط استفاده از این سوخت‌ها چه تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. بدین منظور از گاز تولیدی از سوخت مشتق زباله به دلیل ارزش حرارتی و دمای بالای گازهای حاصل از احتراق آن برای مقایسه با گاز طبیعی استفاده شده است تا بتوان در نسبت‌های دبی مصرفی یکسان آن‌ها را مقایسه نمود. در جدول (۴-۱۰) نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای طراحی بویلر بازیاب به منظور ماکزیمم سازی توان تولیدی سیکل، در شرایط استفاده از سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی به عنوان سوخت سیکل ارائه شده است. واکنش احتراق بین ۱۳ کیلوگرم سوخت با ۴۸۷ کیلوگرم هوا صورت گرفته است. ترکیبات موجود در گاز طبیعی از سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی در جدول (۴-۹) ارائه شده است

جدول (۹-۴): ترکیبات موجود در گاز طبیعی و گاز تولید شده از سوخت مشتق زباله توسط عامل بخار

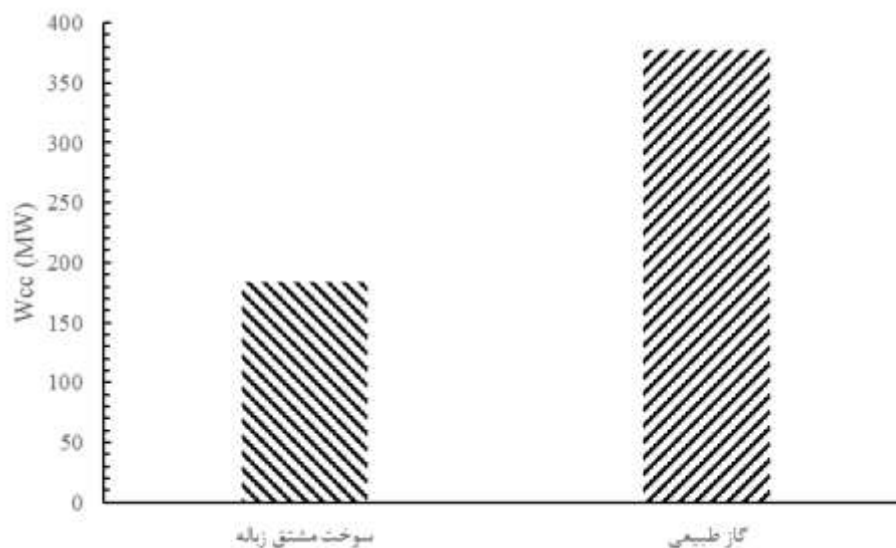
ارزش حرارتی ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )	ترکیبات (% vol)	نوع سوخت
28.91	O <sub>2</sub> : 2%, H <sub>2</sub> : 66.2%, CH <sub>4</sub> : 9.98%, CO: 17.37%, CO <sub>2</sub> : 4.59%, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 0.01%	سوخت مشتق زباله [۳۱]
50	CH <sub>4</sub> : 86.14%, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : 9.34%, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> : 3.25%, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> : 0.25%	گاز طبیعی [۵۳]

جدول (۴-۱۰) نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای طراحی بویلر بازیاب به منظور ماکزیمم سازی توان

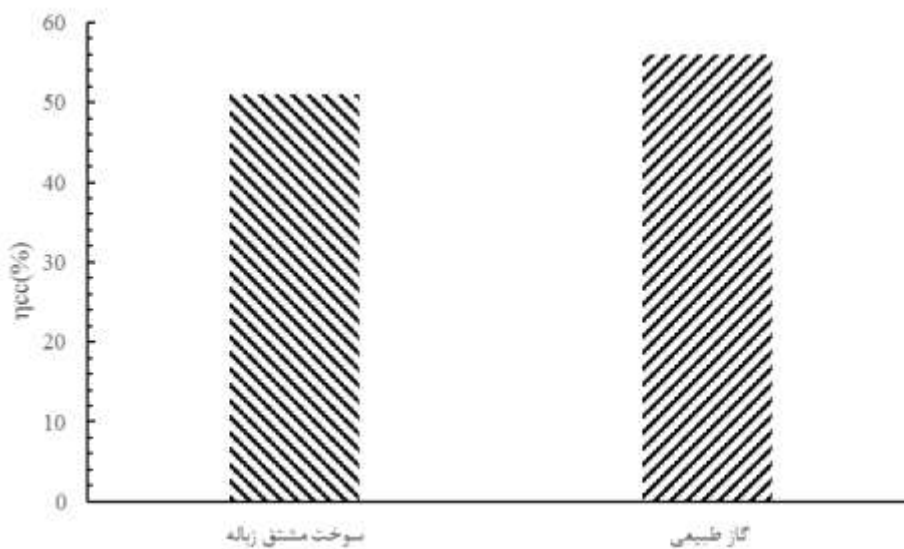
تولیدی سیکل، در شرایط استفاده از سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی به عنوان سوخت سیکل

پارامتر	سوخت مشتق زباله	گاز طبیعی	واحد
$T_D$	775	1016	(K)
<i>Excess air</i>	376%	124%	(-)
$m_{W,HP}$	43.3	79.19	(kg s <sup>-1</sup> )
$m_{W,IP}$	13.59	16.05	(kg s <sup>-1</sup> )
$m_{W,LP}$	17.92	12.98	(kg s <sup>-1</sup> )
$PP_{HP}$	1.98	55.93	(K)
$PP_{IP}$	0.95	29.76	(K)
$PP_{LP}$	0.75	14.28	(K)
$P_{HP}$	115.1	150.9	(bar)
$P_{IP}$	33.2	28.73	(bar)
$P_{LP}$	1.51	1.54	(bar)
$\Delta T_{HP}$	25.54	90.45	(K)
$\Delta T_{IP}$	25	25.39	(K)
$\Delta T_{LP}$	25	25	(K)
$\Delta T_{RH}$	25.21	167.77	(K)
$T_{RH}$	513.66	552.53	(K)
$W_{net}$	71.75	147.91	(MW)

همان‌گونه که در جدول (۴-۱۰) نشان داده شده است میزان بخار بهینه تولیدی بویلر بازیاب در استفاده از گاز طبیعی، بسیار بیشتر از بخار تولیدی در استفاده از سوخت مشتق زباله به عنوان سوخت سیکل به‌دست‌آمده است. دلیل آن نیز بالاتر بودن دمای احتراق گاز طبیعی نسبت به سوخت مشتق زباله است. با مقایسه مقادیر دمای پینچ بویلر بازیاب بین دو حالت مورد بررسی می‌توان دریافت که مقدار دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در استفاده از گاز طبیعی بسیار بیشتر از دمای پینچ در استفاده از زیست توده می‌باشد و مقدار آن بیش از محدوده مجاز پینچ به‌دست‌آمده است. در واقع در دماهای بیش از ۱۰۰۰ کلوین گازهای ورودی به بویلر بازیاب مقادیر دمای پینچ فشار بالا افزایش چشمگیری می‌شود و این عامل نیز منجر به کاهش روند افزایشی راندمان سیکل و توان تولیدی آن می‌گردد. با مشاهده‌ی دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در استفاده از گاز طبیعی می‌توان این موضوع را دریافت. میزان توان تولیدی سیکل بخار نیز در شرایط استفاده از گاز طبیعی بیش از دو برابر توان تولیدی در استفاده سوخت مشتق زباله به‌دست‌آمده است. در شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) مقدار توان تولیدی و راندمان سیکل در استفاده از این دو سوخت نشان داده شده است.



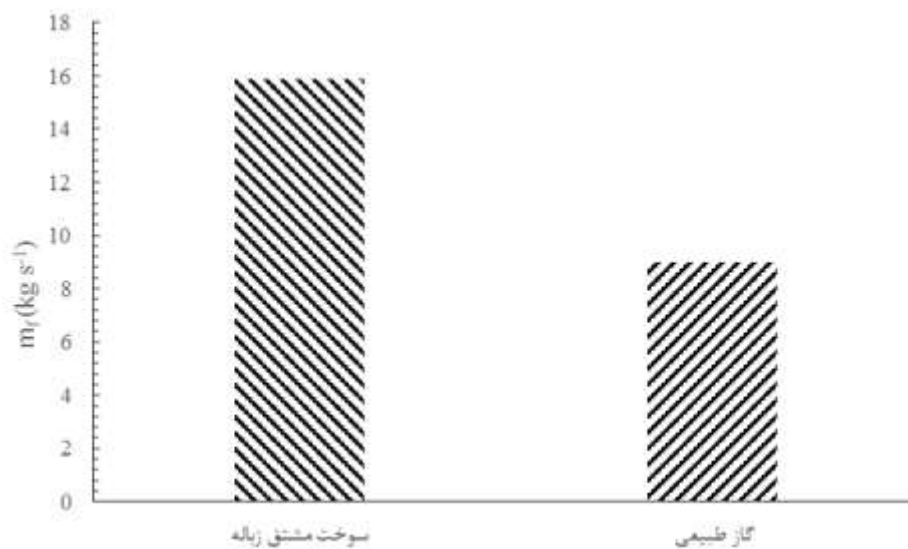
شکل (۴-۲۰): مقایسه توان تولیدی سیکل در شرایط استفاده از گاز طبیعی و زیست توده به عنوان سوخت



شکل (۴-۲۱): مقایسه راندمان سیکل در شرایط استفاده از گاز طبیعی و سوخت مشتق زباله به عنوان

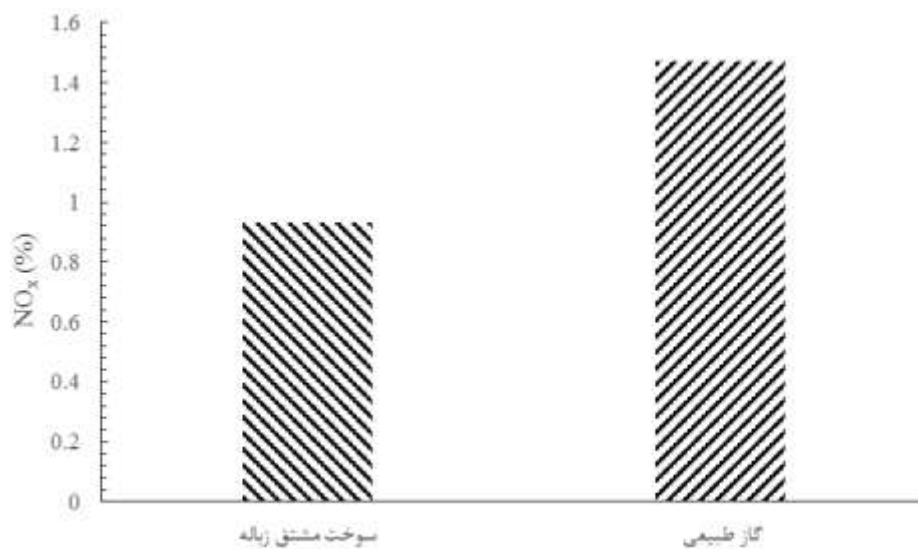
#### سوخت سیکل

همان طور که در شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) مشخص است زیست توده در مقایسه با گاز طبیعی در نسبت‌های یکسان دبی مصرفی از نظر راندمان و توان تولیدی سیکل قابل رقابت نبوده و در واقع میزان توان تولیدی آن بسیار کم می‌باشد. دلیل این موضوع نیز به دمای احتراق بسیار پایین آن نسبت به گاز طبیعی بازمی‌گردد. برای داشتن دمای احتراق یکسان زیست توده و گاز طبیعی، بایستی از مقدار سوخت مشتق زباله بیشتری نسبت به گاز طبیعی استفاده نمود در شکل (۴-۲۲) مقایسه دبی مصرفی سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی در ازای دمای یکسان گازهای حاصل از احتراق آن‌ها نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۲): مقایسه دبی مصرفی سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی در ازای دمای یکسان گازهای حاصل از احتراق آن‌ها (۱۴۰۰ کلوین)

همان‌طور که در شکل (۴-۲۲) مشخص است، به منظور یکسان‌سازی دمای گازهای حاصل از احتراق سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی، بایستی از ۶٫۸ کیلوگرم بر ثانیه سوخت مشتق زباله بیشتری نسبت به گاز طبیعی استفاده نمود تا دمای گازهای حاصل از احتراق آن با گاز طبیعی برابر شده و در این شرایط می‌توان، توان و راندمان سیکل را در استفاده از این دو سوخت تقریباً یکسان دانست. اما بایستی توجه نمود که در این شرایط میزان آلاینده‌گی این سوخت‌ها چه تفاوتی باهم دارند. در شکل (۴-۲۳) درصد جرمی  $NO_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی درازای دمای یکسان گازهای حاصل از احتراق آن‌ها (۱۴۰۰ کلوین) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۳): مقایسه میزان درصد جرمی NO<sub>x</sub> موجود در گازهای حاصل از احتراق سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی در ازای دمای احتراق یکسان آن‌ها (۱۴۰۰ کلوین)

با مقایسه میزان آلاینده‌گی گاز طبیعی و سوخت مشتق زباله می‌توان دریافت، میزان NO<sub>x</sub> موجود در گازهای حاصل از احتراق سوخت مشتق زباله حدود ۰٫۵۴٪ کمتر از گاز طبیعی است. این بدان معنی است که تولید NO<sub>x</sub> گازهای حاصل از احتراق گاز طبیعی حدود ۰٫۵۸٪ بیش از سوخت مشتق زباله است. با تحلیل و بررسی‌های صورت گرفته پیرامون این دو سوخت می‌توان نتیجه گرفت که توان تولیدی و راندمان سیکل در استفاده از سوخت مشتق زباله بسیار کمتر از گاز طبیعی است با مقایسه عددی میزان آلاینده‌گی این دو سوخت متوجه می‌توان دریافت در ازای فقط یک ساعت کار بویلر بازیاب در شرایط استفاده از زیست توده به عنوان سوخت سیکل، ۹۸۱۷ کیلوگرم کاهش در تولید آلاینده NO<sub>x</sub> نسبت به استفاده از گاز طبیعی مشاهده نمود. در جدول (۴-۱۱) مقادیر بهینه پارامترهای طراحی بویلر بازیاب در ازای دمای گازهای ورودی ۱۷۰۰ کلوین به توربین گاز، به منظور اعتبار سنجی با مقادیر مرجع [۳۹] نشان داده و مقایسه شده است.

جدول (۴-۱۱): مقایسه مقادیر بهینه پارامترهای طراحی بویلر بازیاب با مقادیر مرجع [۳۹] در ازای دمای

گازهای ورودی ۱۷۰۰ کلوین به توربین گاز

واحد	درصد خطا	نتایج مرجع [۳۹]	نتایج کار حاضر	پارامتر
(kg s <sup>-1</sup> )	-	-	۷۹,۳۶	$m_{W,HP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	-	-	۷,۰۹	$m_{W,IP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	-	-	۱۰,۳۱	$m_{W,LP}$
(kg s <sup>-1</sup> )	٪۱,۶۳	۹۵,۱۳	۹۶,۷۶	$\sum m_w$
(K)	٪۱	۱۰	۹,۹	$PP_{HP}$
(K)	٪۰,۶	۲۲	۲۱,۸۵	$PP_{IP}$
(K)	٪۲	۱۱	۱۰,۷۸	$PP_{LP}$
(bar)	٪۰,۵	۱۶۵	۱۶۴,۱۳	$P_{HP}$
(bar)	٪۰,۸	۲۳,۷۹	۲۴	$P_{IP}$
(bar)	٪۲,۳	۲,۱۵	۲,۱	$P_{LP}$
(K)	-	-	۴۱,۴۹	$\Delta T_{HP}$
(K)	-	-	۲۹,۳۹	$\Delta T_{IP}$
(K)	-	-	۲۶,۱۳	$\Delta T_{LP}$
(K)	-	-	۱۱۴,۳	$\Delta T_{RH}$
(K)	-	-	۵۹۰	$T_{RH}$
(MW)	-	-	۱۳۶,۸۲	$W_{net}$
(MW)	٪۱,۱	۴۲۵	۴۳۰	$W_{CCPP}$
(%)	۰,۳٪	۶۲,۸	۶۳	$\eta_{CCPP}$



## فصل پنجم

# نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

## ۵-۱ مقدمه

در این تحقیق به تکنولوژی‌های تبدیل زیست توده به گاز و تأثیر آن در عملکرد بویلر بازیاب حرارت و کل سیکل از نظر میزان آلاینده‌گی، نحوه‌ی تغییرات پارامترهای بهینه طراحی بویلر بازیاب در راستای ماکزیمم سازی توان و راندمان سیکل با استفاده از الگوریتم ژنتیک متلب پرداخته شد. گاز تولیدی از زیست توده توسط انواع راکتورهای تولیدکننده گاز، تأثیر عامل گازساز یا اکسیداسیون زیست توده، نوع زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب و تولید آلاینده‌گی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها مقایسه‌های صورت گرفته در بخش‌های قبلی، میان گاز تولیدی از سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی نیز انجام شد.

## ۵-۲ نتیجه‌گیری تأثیر نوع راکتور تبدیل‌کننده گاز زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب حرارت و سیکل

- دمای گازهای حاصل از احتراق سوخت تبدیل‌کننده Updraft بیش از دمای احتراق سوخت سایر تبدیل‌کننده‌ها در شرایط یکسان دبی مصرفی به دست آمد. دمای گازهای ورودی به بویلر بازیاب در شرایط استفاده از سوخت تبدیل‌کننده Updraft ۸۲۲,۴ کلوین محاسبه شد در صورتی که این میزان برای سوخت تبدیل‌کننده‌های BFB, Doowndraft و CFB به ترتیب ۷۹۰,۹، ۷۹۸,۶۹ و ۸۱۳,۶۶ کلوین به دست آمد.

- میزان بخار بهینه تولید شده توسط بویلر بازیاب در شرایط استفاده از سوخت راکتور Updraft بیش از میزان بخار بهینه تولیدی در شرایط استفاده از سوخت سایر راکتورها به دست آمد. این میزان در استفاده از سوخت راکتور Updraft به طور میانگین ۵۸,۱٪ بیش از سوخت راکتور CFB، ۷۲,۳٪ بیش از سوخت راکتور BFB و ۵,۱۹٪ بیش از سوخت راکتور Doowndraft محاسبه شد.

- دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب که نقش مهمی در میزان بخار تولیدی توسط بویلر بازیاب و در نتیجه توان کل سیکل دارد، در شرایط استفاده از سوخت راکتور Updraft به دلیل دمای بالاتر گازهای حاصل از احتراق آن بیش از دمای پینچ فشار بالای بویلر در شرایط استفاده از سوخت دیگر راکتورها به دست آمد.
- توان ماکزیمم کل سیکل در استفاده از سوخت راکتور Updraft بیش از توان ماکزیمم در استفاده از سوخت دیگر راکتورها به دست آمد. این میزان توان تولیدی در ازای استفاده از سوخت راکتور Updraft به طور متوسط، ۲،۴۴٪ نسبت به سوخت راکتور CFB، ۸،۱٪ نسبت به سوخت راکتور BFB و ۱۰٪ نسبت به سوخت راکتور Downdraft بیشتر به دست آمد.
- راندمان ماکزیمم کل سیکل در استفاده از سوخت تبدیل کننده Updraft بیش از راندمان ماکزیمم در استفاده از سوخت دیگر تبدیل کننده‌ها به دست آمد. این میزان برای تبدیل کننده‌های Updraft، BFB، Downdraft و CFB در شرایط یکسان سوخت مصرفی این تبدیل کننده‌ها (۹۰ کیلوگرم بر ثانیه) به ترتیب ۵۸،۶۱٪، ۵۶٪، ۵۶،۵٪ و ۵۷،۲٪ به دست آمد.
- کمترین میزان  $NO_x$  موجود در گازهای حاصل از احتراق در شرایط یکسان توان ماکزیمم تولیدی کل سیکل برای گازهای حاصل از احتراق سوخت راکتور Downdraft به دست آمد. میزان تولید  $NO_x$  گازهای حاصل از احتراق سوخت راکتور Downdraft به طور متوسط، ۵،۲٪ نسبت به سوخت راکتور CFB، ۱۵،۷٪ نسبت به سوخت راکتور BFB و ۲۶٪ نسبت به سوخت راکتور Updraft کمتر به دست آمد.

## ۳-۵ نتیجه‌گیری تأثیر عامل اکسیداسیون زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب حرارت

- میزان تولید  $\text{NO}_x$  گازهای حاصل از احتراق زیست توده‌ای که توسط عامل بخار به سوخت گازی تبدیل شده است، در شرایط دمایی احتراق یکسان به طور متوسط، ۳۸٪ نسبت به سوخت عامل اکسیژن و ۱۲۴٪ نسبت به سوخت عامل هوا بیشتر به دست آمد.
- با تحلیل و بررسی‌های انجام شده پیرامون دمای احتراق زیست توده تبدیل شده به گاز توسط عوامل اکسیژن، هوا و بخار مشخص شد که دمای احتراق زیست توده‌ای که توسط عامل هوا به گاز تبدیل شده است بسیار کمتر از دمای احتراق زیست توده‌ای است که طی دو فرایند دیگر به سوخت گازی تبدیل شده‌اند، می‌باشد و در واقع این سوخت توجیه لازم برای استفاده از آن به عنوان سوخت سیکل را دارا نیست.
- مجموع بخار بهینه تولید شده توسط بویلر بازیاب در شرایط استفاده از گاز تولید شده از زیست توده توسط عامل بخار، به طور متوسط ۱۵,۹٪ بیش از مجموع بخار بهینه تولید شده در شرایط استفاده از گاز تولید شده از زیست توده توسط عامل اکسیژن به دست آمد.
- دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در استفاده از گاز تولید شده از زیست توده توسط عامل بخار بیش از گاز تولید شده از گاز عامل اکسیژن بوده و اختلاف آن‌ها در دبی‌های جرمی بالا به دلیل دمای احتراق بالاتر سوخت عامل بخار بیشتر مشاهده می‌شود.
- با افزایش دمای پینچ فشار بالا از صفر تا ۱۷,۵ کلوین توان تولیدی سیکل به میزان ۳,۵ مگاوات کاهش یافت.
- با مقایسه توان ماکزیمم تولیدی سیکل در استفاده از گاز تولید شده از زیست توده توسط عوامل اکسیژن و بخار مشخص شد که توان ماکزیمم سیکل در استفاده از گاز تولید شده از زیست توده توسط عامل بخار به طور میانگین ۳۳,۶۶٪ بیش از توان ماکزیمم سیکل در

استفاده از گاز تولید شده از سوخت عامل اکسیژن است. همچنین راندمان ماکزیمم نیز در این شرایط به طور میانگین ۳,۲۴٪ بیشتر می باشد.

#### ۴-۵ نتیجه گیری تأثیر نوع زیست توده در عملکرد بویلر بازیاب حرارت

- با مقایسه میزان آلاینده‌گی گاز تولید شده از زیست توده‌های تکه خرده‌های چوبی، کاغذ، خاکاره کاج، پسماند روغن نخل، ضایعات لاستیک، زباله‌های شهری جامد، سبوس برنج و سوخت مشتق زباله در شرایط دمای یکسان احتراق آن‌ها مشخص شد که سوخت مشتق زباله کمترین میزان آلاینده‌گی را داراست.
- با مقایسه میزان دبی مصرفی در ازای دمای احتراق یکسان زیست توده‌های مورد بررسی، ضایعات لاستیک کمترین میزان دبی مصرفی دارا بود. همچنین زیست توده‌های ضایعات لاستیک، سوخت مشتق زباله و خاکاره کاج به دلیل دمای احتراق بالاتر نسبت به سایر زیست توده‌ها با یکدیگر و باقی زیست توده‌ها نیز به صورت جداگانه از نظر توان تولیدی و راندمان سیکل با هم مقایسه شدند.
- میزان توان تولیدی سیکل در شرایط استفاده از ضایعات لاستیک، سوخت مشتق زباله و خاکاره کاج در شرایط یکسان دبی مصرفی به ترتیب ۲۵۰، ۲۴۸,۶ و ۲۲۰ مگاوات به دست آمد. همچنین راندمان سیکل نیز در این شرایط به ترتیب ۵۶,۳۱٪، ۵۵,۹۱٪ و ۵۴,۶۳٪ محاسبه شد.
- سیکل ترکیبی در شرایط استفاده از تکه خرده‌های چوبی با توانی معادل ۳۱۰,۸۹ مگاوات و راندمان ۶۰,۴٪، بیشترین توان و راندمان ممکن را نسبت به استفاده از کاغذ، پسماند روغن نخل، سبوس برنج و زباله شهری جامد به عنوان سوخت سیکل دارا بود.

## ۵-۵ نتیجه‌گیری مقایسه سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی از نظر توان تولیدی سیکل، راندمان و میزان آلاینده‌گی

- دمای گازهای حاصل از احتراق گاز طبیعی و زیست توده پس از خروج از توربین گاز در ازای دبی یکسان مصرفی (۱۳ کیلوگرم بر ثانیه) به ترتیب ۱۰۱۶ و ۷۷۵ کلوین محاسبه شد. در این شرایط میزان بخار بهینه تولید شده توسط بویلر بازیاب در ازای استفاده از گاز طبیعی به‌طور متوسط ۳۰٪ بیش از بخار بهینه در استفاده از گاز تولید شده از سوخت مشتق زباله به دست آمد.
- مقدار دمای پینچ فشار بالای بویلر بازیاب در شرایط استفاده از گاز طبیعی به علت دمای احتراق بسیار بالاتر آن نسبت به سوخت مشتق زباله، حدود ۵۳,۹۵ کلوین بیشتر به دست آمد.
- میزان توان ماکزیمم تولیدی سیکل در ازای استفاده از گاز طبیعی به‌طور میانگین ۵۱,۱٪ بیش از توان ماکزیمم سیکل در استفاده از سوخت مشتق زباله به دست آمد و راندمان سیکل نیز در این شرایط ۵,۴٪ برای گاز طبیعی بیشتر محاسبه شد.
- با بررسی‌های انجام شده پیرامون میزان آلاینده‌گی گازهای حاصل از احتراق سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی مشخص شد که میزان تولید  $\text{NO}_x$  گازهای حاصل از احتراق گاز طبیعی به‌طور میانگین ۵۸٪ بیشتر از گاز سوخت مشتق زباله است. در این شرایط در ازای فقط یک ساعت کار بویلر در ازای استفاده از گاز تولید شده از سوخت مشتق زباله به میزان ۹۸۰۰ کیلوگرم در تولید آلاینده  $\text{NO}_x$  نسبت به استفاده از گاز طبیعی صرفه جویی می‌شود.

## ۵-۶ نتیجه‌گیری کلی

با تحلیل و بررسی‌های انجام شده پیرامون انتخاب نوع تبدیل‌کننده مناسب از نظر توان و راندمان ماکزیمم سیکل و نیز میزان آلاینده‌گی گازهای حاصل از احتراق سوخت تولیدی آن‌ها، مشخص شد که تولید  $\text{NO}_x$  گازهای حاصل از احتراق سوخت راکتور Downdraft به طور میانگین، ۲،۵٪ نسبت به سوخت راکتور CFB، ۷،۱۵٪ نسبت به سوخت راکتور BFB و ۲۶٪ نسبت به سوخت راکتور Updraft کمتر است. این در حالی است که راندمان سیکل در استفاده از سوخت راکتور Updraft به میزان ۱،۴۲٪ نسبت به سوخت راکتور CFB، ۱۱،۲٪ نسبت به سوخت راکتور Downdraft و ۶۱،۲٪ نسبت به سوخت راکتور BFB بیشتر است. از میان فرایندهای تبدیل به گاز زیست توده مشخص شد که دمای احتراق گاز تولید شده از زیست توده توسط عامل هوا پایین‌تر از دمای مناسب برای ورود به توربین گاز و بویلر بازیاب بوده و در واقع توجیه لازم برای استفاده از آن به‌عنوان سوخت سیکل وجود ندارد. میزان تولید  $\text{NO}_x$  گازهای حاصل از احتراق سوخت عامل بخار نیز به طور میانگین ۳۸٪ بیش از سوخت عامل اکسیژن و ۱۲۴٪ بیش از سوخت عامل هوا است. از میان سوخت تولیدی عوامل اکسیژن و بخار مشخص شد که سیکل در استفاده از سوخت عامل بخار، راندمان و توان بیشتری داراست. از میان زیست‌توده‌های سوخت مشتق زباله، خاکاره کاج و ضایعات لاستیک، مشخص شد که سیکل ترکیبی در استفاده از سوخت مشتق زباله دارای کمترین میزان آلاینده‌گی و در استفاده از ضایعات لاستیک دارای بیشترین توان و راندمان ممکن خواهد بود. از میان زیست‌توده‌های سبوس برنج، کاغذ، پسماند روغن نخل، تکه خرده چوب و زباله شهری جامد نیز مشخص شد که استفاده از سوخت گازی تکه خرده‌های چوبی به‌عنوان سوخت، هم از نظر راندمان و توان و هم از نظر آلاینده‌گی نسبت به دیگر زیست‌توده‌ها مناسب‌تر است. با مقایسه انجام شده بین گاز تولید شده از سوخت مشتق زباله و گاز طبیعی از نظر راندمان و توان سیکل و نیز میزان آلاینده‌گی آن‌ها مشخص شد که میزان تولید  $\text{NO}_x$  گازهای حاصل از احتراق گاز طبیعی به طور متوسط ۵۸٪ بیش از سوخت مشتق زباله است. در

صورتیکه راندمان سیکل در استفاده از گاز طبیعی نیز ۵,۴٪ بیش از راندمان در شرایط استفاده از سوخت مشتق زباله است.

## ۷-۵ پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود که تحقیق حاضر در آینده برای مسائل زیر گسترش داده شود.

- تجزیه تحلیل‌های فنی اقتصادی و زیست محیطی پیرامون جایگزینی زیست توده با سوخت‌های فسیلی به عنوان سوخت نیروگاه صورت گیرد.
- مسائل، مشکلات و مزایای مربوط به احتراق هم‌زمان زیست توده و سوخت‌های فسیلی به منظور حذف تدریجی سوخت‌های فسیلی از نیروگاه‌ها صورت گیرد.
- بررسی‌های مربوط به تغییرات ساختاری توربین گاز، بویلر بازیاب حرارت و دیگر اجزای سیکل که در صورت استفاده از زیست توده چه به صورت مستقیم و چه در حالت تبدیل شده به گاز آن، به عنوان سوخت نیروگاه انجام شود.



## پیوست-الف

به منظور محاسبه فشار اشباع آب و بخار در دمای اشباع بایستی از روابط الف-۱ تا الف-۶ استفاده نمود [۵۴].

$$K = [0.11670521452767 * 10^4; -0.72421316703206 * 10^6; \\ -0.17073846940092 * 10^2; 0.12020824702470 * 10^5; \\ -0.3232550322333 * 10^7; 0.14915108613530 * 10^2; \\ -0.48232657361591 * 10^4; 0.40511340542057 * 10^6; \\ -0.23855557567849; 0.650117534844798 * 10^3] \quad (\text{الف-۱})$$

$$M = \frac{T_s}{P} + \frac{K(9)}{[(\frac{T_s}{P_s}) - K(10)]}; \quad P = 1MPa \quad (\text{الف-۲})$$

$$a = M^2 + K(1)M + K(2) \quad (\text{الف-۳})$$

$$b = K(3)M^2 + K(4)M + K(5) \quad (\text{الف-۴})$$

$$c = K(6)M^2 + K(7)M + K(8) \quad (\text{الف-۵})$$

$$P_s = \left( \frac{2c}{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}} \right)^4 \quad (\text{الف-۶})$$

به منظور محاسبه آنتالپی آب اشباع و آب مایع مترکم را در دما و فشار معین بایستی از روابط الف-۷ تا الف-۱۴ استفاده کرد.

$i = [1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;$   
 $11;12;13;14;15;16;17;$   
 $18;19;20;21;22;23;24;$   
 $25;26;27;28;29;30$   
 $;31;32;33;34]$

(الف-٧)

$I(i)=[0;0;0;0;0;0;0;0;$   
 $1;1;1;1;1;1;2;2;2;2;2;$   
 $3;3;3;4;4;4;5;8;8;21;$   
 $23;29;30;31;32];$

(الف-٨)

$j(i)=[-2;-1;0;1;2;3;4;5;-9;-7;$   
 $-1;0;1;3;-3;0;1;3;17;-4;0;6;$   
 $-5;-2;10;-8;-11;-6;-29;-31;$   
 $-38;-39;-40;-41];$

(الف-٩)

$$\begin{aligned}
n(i) = & [0.14632971213167; -0.84548187169114; \\
& -0.37563603672040 * 10^1; 0.33855169168385 * 10^1; \\
& -0.95791963387872; 0.15772038513228; \\
& -0.16616417199501 * 10^{-1}; 0.81214629983568 * 10^{-3}; \\
& -0.18990068218419 * 10^{-1}; -0.32529748770505 * 10^{-1}; \\
& -0.21841717175414 * 10^{-1}; -0.52838357969930 * 10^{-4}; \\
& -0.47184321073267 * 10^{-3}; -0.30001780793026 * 10^{-3}; \\
& 0.47661393906987 * 10^{-4}; -0.44141845330846 * 10^{-5}; \\
& -0.72694996297594 * 10^{-15}; -0.31679644845054 * 10^{-4}; \\
& -0.28270797985312 * 10^{-5}; -0.85205128120103 * 10^{-9}; \\
& -0.22425281908000 * 10^{-5}; -0.65171222895601 * 10^{-6}; \\
& -0.14341729937924 * 10^{-12}; -0.40516996860117 * 10^{-6}; \\
& -0.12734301741641 * 10^{-8}; -0.17424871230634 * 10^{-9}; \\
& -0.68762131295531 * 10^{-18}; 0.14478307828521 * 10^{-19}; \\
& 0.26335781662795 * 10^{-22}; -0.11947622640071 * 10^{-22}; \\
& 0.18228094581404 * 10^{-23}; -0.93537087292458 * 10^{-25}]
\end{aligned}
\tag{الف-۱۰}$$

$$\tau = \frac{T^*}{T_s}; T^* = 1386K
\tag{الف-۱۱}$$

$$\pi = \frac{P_s}{P^*}; P^* = 16.53MPa
\tag{الف-۱۲}$$

$$\gamma_\tau = \sum_{i=1}^{34} n(i) j(i) (7.1 - \pi)^{I(i)} (\tau - 1.222)^{j(i)-1}
\tag{الف-۱۳}$$

$$h = R T_s . \tau . \gamma_\tau; R = 0.461526 \frac{kJ}{Kg.K}
\tag{الف-۱۴}$$

به منظور محاسبه‌ی آنتالپی بخار اشباع و بخار سوپرهیت بایستی از روابط الف-۱۵ تا الف-۲۳ استفاده نمود.

$i=[1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17;18;19;20;21;22;23;$   
 $24;25;26;27;28;29;30;31;32;33;34;35;36;37;38;39;$  (الف-١٥)  
 $40;41;42;43]$

$I(i)=[1;1;1;1;1;2;2;2;2;2;3;3;3;3;3;4;4;4;5;6;6;6;7;7;7;8;8;9;10;$  (الف-١٦)  
 $10;10;16;16;18;20;20;20;21;22;23;24;24;24];$

$J(i)=[0;1;2;3;6;1;2;4;7;36;0;1;3;6;35;1;2;3;7;3;16;35$   
 $;0;11;25;8;36;13;4;10;14;29;50;57;20;35;48;21;$  (الف-١٧)  
 $53;39;26;40;58]$

$j_0=[0;1;-5;-4;-3;-2;-1;2;3]$  (الف-١٨)

$n_0 = [-0.96927686500217 * 10; 0.10086655968018 * 10^2;$   
 $-0.56087911283020 * 10^{-2}; 0.71452738081455 * 10^{-1};$   
 $-0.40710498223928; 0.14240819171444 * 10;$  (الف-١٩)  
 $-0.43839511319450 * 10; -0.28408632460772;$   
 $0.21268463753307 * 10^{-1}]$

$\tau_s = \frac{T^*}{T_s}; T^* = 540K$  (الف-٢٠)

$$\begin{aligned}
n(i) = & [-0.17731742473213 * 10^{-2}; -0.17834862292358 * 10^{-1}; \\
& -0.45996013696365 * 10^{-1}; -0.57581259083432 * 10^{-1}; \\
& -0.50325278727930 * 10^{-1}; -0.33032641670203 * 10^{-4}; \\
& -0.18948987516315 * 10^{-3}; -0.39392777243355 * 10^{-2}; \\
& -0.50325278727930 * 10^{-1}; -0.33032641670203 * 10^{-4}; \\
& -0.18948987516315 * 10^{-3}; -0.39392777243355 * 10^{-2}; \\
& -0.43797295650573 * 10^{-1}; -0.26674547914087 * 10^{-4}; \\
& 0.20481737692309 * 10^{-7}; 0.43870667284435 * 10^{-6}; \\
& -0.32277677238570 * 10^{-4}; -0.15033924542148 * 10^{-2}; \\
& -0.40668253562649 * 10^{-1}; -0.78847309559367 * 10^{-9}; \\
& 0.12790717852285 * 10^{-7}; 0.48225372718507 * 10^{-6}; \\
& 0.22922076337661 * 10^{-5}; -0.16714766451061 * 10^{-10}; \\
& -0.21171472321355 * 10^{-2}; -0.23895741934104 * 10^2; \\
& -0.59059564324270 * 10^{-17}; -0.12621808899101 * 10^{-5}; \\
& -0.38946842435739 * 10^{-1}; 0.11256211360459 * 10^{-10}; \\
& -0.82311340897998 * 10^1; 0.19809712802088 * 10^{-7}; \\
& 0.10406965210174 * 10^{-18}; -0.10234747095929 * 10^{-12}; \\
& -0.10018179379511 * 10^{-8}; -0.80882908646985 * 10^{-10}; \\
& 0.10693031879409; -0.33662250574171; \\
& 0.89185845355421 * 10^{-24}; 0.30629316876232 * 10^{-12}; \\
& -0.42002467698208 * 10^{-5}; -0.59056029685639 * 10^{-25}; \\
& 0.37826947613457 * 10^{-5}; -0.12768608934681 * 10^{-14}; \\
& 0.73087610595061 * 10^{-28}; 0.55414715350778 * 10^{-16}; \\
& -0.94369707241210 * 10^{-6}]; \tag{الف-٢١}
\end{aligned}$$

$$\pi_s = \frac{P_s}{P^*}; P^* = 1MPa \tag{الف-٢٢}$$

$$\gamma_{0-\tau} = \sum_{i=1}^9 n_0(i) j_0(i) \tau^{j_0(i)-1} \quad (\text{الف-٢٣})$$

$$\gamma_{r-\tau} = \sum_{i=1}^{43} n(i) \pi_s^{I(i)} j(i) (\tau_s - 0.5)^{j(i)-1} \quad (\text{الف-٢٤})$$

$$h = R T_s \cdot \tau_s \cdot (\gamma_{0-\tau} + \gamma_{r-\tau}); R = 0.461526 \frac{kJ}{Kg \cdot K} \quad (\text{الف-٢٥})$$

- [1] Koh MP, Hoi WK. (2003), Sustainable biomass production for energy in Malaysia, *Biomass Bioenergy* , 25, pp 517–29, 2003.
- [2] Sasaki N, Knorr W, Foster DR, Etoh H, Ninomiya H, Chay S, et al, Woody biomass and bioenergy potentials in Southeast Asia between 1990 and 2020, *Appl Energy*, 86, pp 140-150, 2009.
- [3] Khan AA, Jonga WD, Jansens PJ, Spliethoff H, Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies, *Fuel Process Technol*, 90, pp 21-50, 2009.
- [4] Demirbas A, Combustion characteristics of different biomass fuels. *Prog Energy Combust Sci*,30, pp 219–30, 2004.
- [5] Caputo AC, Palumbo M, Pelagagge PC, Scacchia F, Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants:effects of logistic variables, *Biomass Bioenergy*, 28, pp 35-51, 2005.
- [6] Balat M, Balat M, Kirtay E, Balat H, Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals, *Energy Convers Manage*, 50, pp 3147- 3157, 2009.
- [7] M. Valdes , J. L. Rapun , Optimization of heat recovery steam generators for combined cycle gas turbine power plant, *Applied Thermal Engineering*, pp. 1149-1159, 2001.
- [8] Abbasi T, Abbasi SA, Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization, *Renew Sustain Energy Rev*, 14, pp. 919–37, 2010.
- [9] Faninger G, Towards sustainability development in Austria: renewable energy contributions, *Institute for Interdisciplinary Research and Continuing Education*, University of Klagenfurt, Austria, 2003.
- [10] Demirbas A, Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues, *Prog Energy Combust Sci*, 31, pp 171-192, 2005.
- [11] APO Asian Productivity Organization. Reusing biomass waste in industrial boilers for energy recovery, [http://www.apo-tokyo.org/DO\\_online-resources.htm](http://www.apo-tokyo.org/DO_online-resources.htm), [accessed 28.03.10], (2010).
- [12] Erik Dahlquist, Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: Combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation, *CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business*, 2013.
- [13] Saxena RC, Seal D, Kumar S, Golay HB, Thermochemical routes for hydrogen rich gas from biomass: a review, *Renew Sustain Energy Rev*,12, pp 1909-1927, 2008.

- [14] Maoyun He, Zhiquan Hu, Bo Xiao, Jianfen Li, Xianjun Guo, Siyi Luo, Fan Yang, Yu Feng, Guangjun Yang, Shiming Liu. (2009), Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition, 34, pp 195-203, 2009
- [15] Kamm T, A new class of plants for a biofuel feedstock energy crop, *Appl Biochem Biotechnol*, 113, pp 55–70, 2004.
- [16] Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG, An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*, 89, pp 913–33, 2010.
- [17] Kehlhofer, R, Combined-cycle gas and steam turbine power plants, Pennwell, Tulsa, OK, 1997.
- [18] Alessandro, F., and Alessandro, R, Combined cycle plant efficiency increase based on the optimization of the heat recovery steam generator operation parameters, *Int. J. Therm. Sci.*, 41(9), pp 843–859, 2002.
- [19] Murad A. Rahim, Combined Cycle Power Plant Performance Analyses Based on the Single-Pressure and Multipressure Heat Recovery Steam Generator, *Journal of Energy Engineering*, 138, 3, pp 136-145, 2011.
- [20] Casarosa, F., Donatin, C. and Franco, A, Thermoeconomic Optimization of Heat Recovery Steam Generator Operating Parameters for Combined Plant, *Energy*, 29, pp 389-413, 2004.
- [21] Lebele-Alawa, B.T., Hart, H.T., Ogaji, S.O.T. and Probert, S.D, Rotor-Blades' Profile Influence on a Gas Turbine's Compressor Effectiveness, *Applied Energy*, 85, pp 494-505, 2008.
- [22] Lebele-Alawa, B.T, Axial Thrust Responses due to a Gas Turbine's Rotor Blade Distortions, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 83, pp 991-994, 2010.
- [23] Ganapathy, V, Optimize Energy Efficiency of the Heat Recovery Steam Generator". *Power Engineering Article*, 105, 2001.
- [24] Franco, A. and Russo, A, Combined Cycle Plant Efficiency Increase Based on the Optimization of Heat Recovery Steam Generator Operating Parameter, *International Journal of Thermal Science*, 41, pp 841-850, 2002.
- [25] Deschamps, P. J, Advanced combined cycle alternatives with the latest gas turbines, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 120(2), pp 350–357, 1998.
- [26] Boyce, Meherwan P, Handbook for cogeneration and combined cycle power plants, *The American Society of Mechanical Engineers*, 2002.
- [27] Thamir K. Ibrahim, M. M, Rahman, Effective Parameters on Performance of Multipressure Combined Cycle Power Plants, *Advances in Mechanical Engineering*.



- [28] V. Ganapathy, *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations*, MarcelDekker, Inc. 2003.
- [29] R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef, A review on biomass as a fuel for boilers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp 2262-2289. 2009.
- [30] A. Donatelli, P. Iovane, A. Molino, "High energy syngas production by waste tyres steam gasification in a rotary kiln pilot plant. Experimental and numerical investigations", *fuel*, 89, pp. 2721-2728, 2010.
- [31] S. Galvagno, G. Casciaro, S. Casu, M. Martino, C. Mingazzini, A. Russo, S. Portofino, Steam gasification of tyre waste, poplar, and refuse-derived fuel: A comparative analysis, *Waste Management*, 29, pp 678-689, 2009.
- [32] Prakash Parthasarathy, K. Sheeba Narayanan, Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield e A review, *Renewable Energy*, pp 570-579, 2014.
- [33] Cuong Van Huynh, Song-Charng Kong, "Combustion and NO<sub>x</sub> emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam", *Fuel*, 107, pp 455-464, 2013.
- [34] Sergio Galvagno, Stefania Casu, Giovanni Casciaro, Maria Martino, Antonio Russo, Sabrina Portofino, Steam Gasification of Refuse-Derived Fuel (RDF): Influence of Process Temperature on Yield and Product Composition, *Energy & Fuels*, 20, pp 2284-2288, 2006.
- [35] Chanchal Loha, Himadri Chattopadhyay, Pradip K. Chatterjee, Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk, *Energy*, 36, pp 4063-4071, 2011.
- [36] S.T. Chaudhari, A.K. Dalai, N.N. Bakhshi, Production of Hydrogen and/or Syngas (H<sub>2</sub>+CO) via Steam Gasification of Biomass-Derived Chars, *Energy & Fuels*, 17, pp 1062-1067, 2003.
- [37] Jianfen Li, Yanfang Yin, Xuanming Zhang, Jianjun Liu, Rong Yan, Hydrogen-rich gas production by steam gasification of palm oil wastes over supported tri-metallic catalyst", *international journal of hydrogen energy*, 34, pp 9108-9115, 2009.
- [38] Pengmei Lv, Zhenhong Yuan, Longlong Ma, Chuangzhi Wu, Yong Chen, Jingxu Zhu, Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier, *Renewable Energy*, 32, pp 2173-2185, 2007.
- [39] A.M. Bassily, Enhancing the efficiency and power of the triple-pressure reheat combined cycle by means of gas reheat, gas recuperation, and reduction of the irreversibility in the heat recovery steam generator, *Applied Energy*, 85, pp. 1141-1162, 2008.

- [40] Pouria Ahmadi, Ibrahim Dincer, Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit", *Energy Conversion and Management*, 52, pp. 2296-2308, 2011.
- [41] Manuel valdes, Antonio Rovira, Ma Dolores Duran, Influence of the heat recovery steam generator design parameters on the thermoeconomic performances of combined cycle gas turbine power plants, *International of journal of energy research*, 28, pp 1243-1254, 2004.
- [42] M. Mohagheghi, J. Shayegan, Thermodynamic optimization of design variables and heat exchangers layout in HRSGs for CCGT, using genetic algorithm, *Applied Thermal Engineering*, 29, pp 290-299, 2009.
- [43] Sidum Adumene, Barinaadaa Thaddeus Lebele-Alawa, Performance Optimization of Dual Pressure Heat Recovery Steam Generator (HRSG) in the Tropical Rainforest, *Engineering*, pp 347-364, 2015.
- [44] A.M. Bassily, (2007), Modeling, numerical optimization, and irreversibility reduction of a triple-pressure reheat combined cycle, *Energy*, 32, pp 778-794.
- [45] Alessandro Franco, Alessandro Russo, Combined cycle plant efficiency increase based on the optimization of the heat recovery steam generator operating parameters, *International Journal of Thermal Sciences*, 41, pp 843-859, 2002.
- [46] T. Srinivas, Study of a deaerator location in triple-pressure reheat combined power cycle, *Energy*, 34, pp 1364-1371, 2009.
- [47] Hongcui feng, Wei zhong, Yanling wu, Shuiguang Tong, The effect of parameters on HRSG Thermodynamic performance, *Advanced Materials Research*, 774-776, pp 383-392, 2013.
- [48] Alessandro Franco, Nicola Giannini, A general method for the optimum design of heat recovery steam generators, *Energy*, 31, pp 3342-3361, 2006.
- [49] Hassan Hajabdollahi, Pouria Ahmadi, Ibrahim Dincer, AN EXERGY-BASED MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF A HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR (HRSG) IN A COMBINED CYCLE POWER PLANT (CCPP) USING EVOLUTIONARY ALGORITHM, *International Journal of Green Energy*, 8, pp 44-64, 2011.
- [50] Abdolsaeid Ganjeh Kaviri, Mohammad Nazri Mohd. Jaafar, Tholudin Mat Lazim, Hassan Barzegaravval, Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis, *Energy Conversion and Management*, 67, pp 27-33, 2013.
- [51] Juan I. Manassaldi, Sergio F. Mussati, Nicolas j.scenna, Optimal synthesis and design of Heat Recovery Steam Generation (HRSG) via mathematical programming", *Energy*, 36, pp 475-485, 2011.

- [52] Ali Behbahani-nia, Mahmood Bagheri, Rasool Bahrapoury, Optimization of fire tube heat recovery steam generators for cogeneration plants through genetic algorithm, *Applied Thermal Engineering*, 30, pp 2378-2385, 2010.
- [53] Roger, A., Strehlow, Combustion fundamentals, McGraw-Hill international Editions, 1984.
- [54] IAPWS 97, International Association for Properties of Water and Steam 97.
- [55] Haupt, R. L., Haupt, S. L., Practical Genetic Algorithms, John Wiley and Sons, 1998.
- [56] Nuno Couto, Abel Rouboa, Valter Silva, Eliseu Monteiro, Khalid Bouziane, Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas, *Energy Procedia*, 36, pp 596-606, 2013.
- [57] Fercher E., Hofbauer H., Fleck T., Rauch T., Veronik G, (1998), Two years experience with the FICFB-gasification process. In: Proceedings of the 10th European conference and technology exhibition Wurzburg.
- [58] Bridgwater, A.V, The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation", *Fuel*, 14, pp 631-653, 1995.
- [59] David Brown, Martin Gassner, Tetsuo Fuchino, Francois marechal, Thermo-economic analysis for the optimal conceptual design of biomass gasification energy conversion systems, *Applied Thermal Engineering*, 29, pp 2137-2152, 2009.
- [60] Sangtongam N. Kriengsak, Rafal Buczynski, Jakub Gmurczyk, and Ashwani K. Gupta, Hydrogen Production by High-Temperature Steam Gasification of Biomass and Coal, *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE, Volume 26, Number 4*, 2009.



## **Abstract**

**At the end of a performance triple pressure heat recovery steam generator with reheat in condition using biomass As an alternative fuel to fossil fuels have been analyzed As well as its design parameters using Genetic optimization algorithm With the aim of gaining maximum power and efficiency Cycles, is optimized. Given that HRSG boiler performance by the kind of fuel consumption and inlet gas temperatures to it, Therefore, by changing the fuel cycle, the amount of power Qablthyyr cycle efficiency and exhaust emissions as it will also be changed. In this thesis biomass to gas conversion technology has been analyzed. Among the factors influencing the composition of gas produced from biomass such as type of reactor producing gas from biomass, gasification of biomass and biomass can be mentioned. In the present work effectiveness of all these factors on the performance of the HRSG design parameters Such as steam, pinch temperature changes, pressure changes, as well as production capacity, cycle efficiency and emissions have been analyzed. The analyzes carried out on cycle efficiency in the use of fixed bed reactors with streams rising and falling, bubbles and Circulating Fluidized bed, It was found that fuel cycle efficiency in the use of fixed bed reactor with ascending flow, over other reactor fuel. They also showed that the production of NO<sub>x</sub> gases from combustion of a fixed bed reactor with the reactor is falling relative to other fuels. Biomass gasification processes were identified by comparing gas produced from biomass by air because of low combustion temperature no justification for the To use it as fuel. Also used in the production of a steam-gas cycle maximum power over gas-producing agent is oxygen. It was found that the amount of NO<sub>x</sub> emissions from fuel combustion gasification of other factors is less air than fuel. Finally, the gas produced from biomass and natural gas comparisons some common ones is comprehensive.**

**Keywords: heat recovery steam generator, power production, efficiency, emissions production, gas production from biomass**



**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**

**M.Sc. Thesis in Energy conversion Engineering**

**Analysis and modeling of heat recovery boiler with the use of new fuels  
(biomass) with a view to reducing refrigeration**

**By: Soroosh kalati hesari**

**Supervisors:**

**Dr.Mahmood Chahartaghi**

**February 2017**