

## پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

عنوان

آنالیز انرژی و اگزرژی چرخه توان زباله سوز با استفاده از بازیافت انرژی سرد گاز طبیعی

مایع شده به همراه استفاده از گاز طبیعی حاصله به عنوان سوخت اضافی زباله سوز

### چکیده

اهداف این پروژه در بر گیرنده ارائه راهکاری برای محاسبه ارزش حرارتی زباله بر اساس آگاهی از ترکیب زباله و همچنین پیشنهاد یک چرخه ترکیبی تولید توان زباله سوز با استفاده از بازیافت انرژی سرد گاز طبیعی مایع شده به همراه استفاده از گاز طبیعی حاصله به عنوان سوخت اضافی زباله سوز و انجام تحلیل پارامتری به منظور بررسی تاثیرات پارامترهای کلیدی بر روی راندمان‌های انرژی و اگزرژی می‌باشد.

چرخه ترکیبی متشکل از یک چرخه رانکین محلول آمونیاکی است که با یک زباله سوز پسماندها و یک چرخه انرژی سرد گاز طبیعی مایع شده همراه شده است. این چرخه ترکیبی با چرخه رانکین بخار رایج مقایسه می‌شود. هدف یافتن نقاطی با راندمان‌های بیشتر نسبت به چرخه رایج است و می‌توان از طریق نمودارهای ترسیم شده این نقاط را یافت. در چرخه ترکیبی دمای تقطیر محلول آمونیاکی و فشارهای ورودی و خروجی توربین شماره ۲ به عنوان پارامترهای کلیدی در نظر گرفته می‌شوند. با کاهش دمای تقطیر محلول آمونیاکی راندمان‌های انرژی و اگزرژی هر دو افزایش می‌یابند. راندمان‌های انرژی و اگزرژی با افزایش فشار ورودی توربین شماره ۲ افزایش می‌یابند. با افزایش فشار خروجی توربین شماره ۲، راندمان انرژی چرخه ترکیبی کاهش می‌یابد در حالی که راندمان اگزرژی افزایش می‌یابد.

<https://t.me/tephd>

کلمات کلیدی: تولید همزمان کار و حرارت، چرخه محلول آمونیاکی، چرخه LNG، زباله سوز،

راندمان انرژی، راندمان انرژی

منابع پارس پیرو همه

فصل ۱: مقدمه ای بر آنالیز انرژی و انرژی ..... ۹	۹
مقدمه ..... ۹	۹
۱-۱) چرا آنالیز انرژی و انرژی؟ ..... ۱۰	۱۰
۱-۲) بالانس جرم، انرژی و آنتروپی ..... ۱۲	۱۲
۱-۳) معادلات دقیق بالانس ..... ۱۳	۱۳
۱-۴) انرژی سیستم بسته ..... ۱۶	۱۶
۱-۵) انرژی جریان ها ..... ۱۷	۱۷
۱-۵-۱) انرژی جریان یک ماده ..... ۱۷	۱۷
۱-۵-۲) انرژی انرژی گرمایی ..... ۱۸	۱۸
۱-۵-۳) انرژی کار ..... ۱۹	۱۹
۱-۵-۴) انرژی الکتریکی ..... ۲۰	۲۰
۱-۶) اتلاف انرژی ..... ۲۰	۲۰
۱-۷) بالانس انرژی ..... ۲۱	۲۱
۱-۸) محیط مرجع ..... ۲۲	۲۲
۱-۸-۱) مشخصات تئوری محیط مرجع ..... ۲۲	۲۲
۱-۸-۲) مدل های محیط مرجع ..... ۲۳	۲۳
۱-۹) راندمان ها و دیگر مقیاس های مورد اهمیت ..... ۲۴	۲۴
۱-۱۰) فرآیند آنالیز انرژی و انرژی ..... ۲۷	۲۷
۱-۱۱) خواص انرژی و انرژی ..... ۲۷	۲۷
۱-۱۲) مفاهیم نتایج آنالیز انرژی ..... ۲۸	۲۸
فصل ۲: مقدمه ای بر تولید همزمان کار و حرارت ..... ۳۰	۳۰
مقدمه ..... ۳۰	۳۰
۲-۱) انواع کاربردهای عمومی تولید همزمان ..... ۳۲	۳۲
۲-۲) انواع سیستم های تولید همزمان ..... ۳۲	۳۲

- ۳۲..... چرخه بالای (۲-۲-۱).....
- ۳۳..... چرخه پایینی (۲-۲-۲).....
- ۳۳..... مزایای استفاده از تولید همزمان (۲-۳).....
- ۳۴..... روش های تولید همزمان (۲-۴).....
- ۳۵..... بازده نیروگاه تولید همزمان (۲-۵).....
- ۳۷..... نسبت توان به گرمای یک مجموعه (۲-۶).....
- ۳۷..... تحلیل نسبت توان به گرمای یک مجموعه (۲-۷).....
- ۴۰..... فصل ۳: زباله سوزها و محاسبات پایه مربوط به بازیافت انرژی از زباله (۲-۸).....
- ۴۰..... مقدمه (۲-۹).....
- ۴۲..... انواع زباله سوزها (۳-۱).....
- ۴۲..... زباله سوز با آتشدان متحرک (۳-۱-۱).....
- ۴۲..... زباله سوز با آتشدان ثابت (۳-۱-۲).....
- ۴۳..... زباله سوز با آتشدان دوار (۳-۱-۳).....
- ۴۳..... زباله سوز با بستر روان (۳-۱-۴).....
- ۴۴..... گرمای احتراق (۳-۲).....
- ۴۴..... ارزش حرارتی (۳-۳).....
- ۴۷..... محاسبات پایه مربوط به بازیافت انرژی از زباله (۳-۴).....
- ۵۲..... ارائه یک برنامه کامپیوتری جهت محاسبه ارزش حرارتی زباله (۳-۵).....
- ۶۰..... فصل ۴: مقدمه ای بر گاز طبیعی مایع شده (۳-۶).....
- ۶۰..... مقدمه (۳-۷).....
- ۶۲..... آیا LNG یک منبع قابل رقابت با گاز طبیعی می باشد؟ (۴-۱).....
- ۶۳..... تاریخچه مختصری از LNG (۴-۲).....
- ۶۵..... ترکیبات گاز طبیعی و LNG (۴-۳).....
- ۶۷..... زنجیره ارزشی LNG (۴-۴).....
- ۷۰..... آیا LNG یک سوخت ایمن است؟ (۴-۵).....
- ۷۱..... استفاده از انرژی سرد LNG (۴-۶).....

۷۵	اصطلاحات علمی سوخت های دیگر.....
۷۵	ترکیبات LNG.....
۷۵	ترکیبات میعانات گاز طبیعی.....
۷۶	ترکیبات LPG.....
<b>فصل ۵: آنالیز انرژی و اگزرژی چرخه توان زباله سوز با استفاده از بازیافت انرژی سرد گاز طبیعی مایع شده به همراه استفاده از گاز طبیعی حاصله به عنوان سوخت اضافی زباله سوز.....</b>	
۷۸	مقدمه.....
۸۰	مختصری در مورد نرم افزار HYSIS.....
۸۱	تحلیل انرژی حرارتی.....
۸۱	تحلیل اگزرژی.....
۸۲	توصیف چرخه توان رایج با استفاده از زباله سوز.....
۸۴	مختصری در مورد زباله سوز.....
۸۵	چگونگی تبدیل زباله سوز به یک مبدل حرارتی.....
۸۷	توصیف چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز به همراه بازیابی انرژی سرد LNG.....
۸۷	توصیف چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز به همراه بازیابی انرژی سرد LNG و استفاده از گاز شهری تولید شده به عنوان سوخت اضافی در زباله سوز.....
۹۳	معادلات بالانس انرژی.....
۹۳	زباله سوز.....
۹۳	مبدل حرارتی شماره ۱.....
۹۳	توربین شماره ۱.....
۹۳	توربین شماره ۲.....
۹۳	مبدل حرارتی شماره ۲.....
۹۳	پمپ شماره ۱.....
۹۴	پمپ شماره ۲.....
۹۴	گاز شهری.....
۹۴	بالانس انرژی کلی.....

- ۹۴.....۱۰-۱-۵-۶) راندمان انرژی.....
- ۹۴.....۲-۶-۵) معادلات بالانس انرژی.....
- ۹۴.....۱-۲-۶-۵) انرژی هوا.....
- ۹۵.....۲-۲-۶-۵) انرژی مخلوط آمونیاکی.....
- ۹۵.....۳-۲-۶-۵) انرژی ورودی به چرخه.....
- ۹۵.....۴-۲-۶-۵) انرژی خروجی از چرخه.....
- ۹۵.....۵-۲-۶-۵) بالانس انرژی کلی.....
- ۹۵.....۶-۲-۶-۵) راندمان انرژی.....
- ۱۰۲.....۷-۵) تحلیل حساسیت.....
- ۱۰۴.....۱-۷-۵) تحلیل نمودارهای انرژی و انرژی در حالت تغییر دمای جریان شماره ۱.....
- ۱۰۶.....۲-۷-۵) تحلیل نمودارهای انرژی و انرژی در حالت تغییر فشار جریان شماره ۷.....
- ۱۰۸.....۳-۷-۵) تحلیل نمودارهای انرژی و انرژی در حالت تغییر فشار جریان شماره ۸.....
- ۱۰۹..... فصل ۶: نتیجه گیری.....
- ۱۱۰..... ۱-۶) پیشنهادها.....

شکل (۱-۱) رابطه بین فاکتور دمای اگزرژی و نسبت دمای مطلق..... ۲۰

شکل (۱-۲) نمودار تغییرات بازده تولید همزمان بر حسب نسبت توان به گرما..... ۳۸

شکل (۱-۳) نحوه وارد کردن اطلاعات در برنامه در حالت معلوم بودن ترکیب فیزیکی زباله..... ۵۸

شکل (۲-۳) نحوه نمایش نتایج محاسبات در حالت معلوم بودن ترکیب فیزیکی زباله..... ۵۸

شکل (۳-۳) نحوه وارد کردن اطلاعات در برنامه در حالت معلوم بودن ترکیب شیمیایی زباله..... ۵۹

شکل (۴-۳) نحوه نمایش نتایج محاسبات در حالت معلوم بودن ترکیب شیمیایی زباله..... ۶۰

شکل (۱-۴) هزینه‌های انتقال گاز طبیعی بر حسب نوع انتقال..... ۶۲

شکل (۲-۴) ترمینال LNG جزیره کنوی انگلستان، اولین در دنیا..... ۶۴

شکل (۳-۴) ترکیبات گاز طبیعی..... ۶۶

شکل (۴-۴) ترکیبات LNG..... ۶۶

شکل (۵-۴) زنجیره ارزشی LNG..... ۶۷

شکل (۴-۶) یک کشتی حمل LNG

.....۶۹

شکل (۱-۵) چرخه توان رایج (چرخه شماره ۱) با استفاده از زباله

سوز.....۸۳

شکل (۲-۵) شبیه سازی چرخه توان رایج (چرخه شماره ۱) در نرم افزار HYSIS

.....۸۴

شکل (۳-۵) چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز (چرخه شماره ۲) به همراه بازیابی انرژی سرد

.....LNG ۸۸

شکل (۴-۵) شبیه سازی چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز (چرخه شماره ۲) به همراه بازیابی

انرژی سرد LNG در نرم افزار

HYSIS.....۸۹

شکل (۵-۵) چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز (چرخه شماره ۳) به همراه بازیابی انرژی سرد

LNG و استفاده از گاز شهری تولید شده به عنوان سوخت اضافی در زباله

سوز.....۹۲

شکل (۶-۵) شبیه سازی چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز (چرخه شماره ۳) به همراه بازیابی

انرژی سرد LNG و استفاده از گاز شهری تولید شده به عنوان سوخت اضافی در زباله

سوز.....۹۸

شکل (۷-۵) مقایسه راندمان های انرژی و انرژی چرخه های شماره ۱، ۲ و

.....۱۰۱

شکل (۸-۵) تاثیر دمای  $T_{N1}$  بر راندمان حرارتی چرخه شماره

.....۱۰۳

شکل (۹-۵) تاثیر دمای  $T_{N1}$  بر راندمان انرژی چرخه شماره

.....۱۰۳

شکل (۱۰-۵) تاثیر فشار  $P_{L3}$  بر راندمان حرارتی چرخه شماره

.....۱۰۵

شکل (۱۱-۵) تاثیر فشار  $P_{L3}$  بر راندمان اگزرژی چرخه شماره  
.....۳ ۱۰۵

شکل (۱۲-۵) تاثیر فشار  $P_{L4}$  بر راندمان حرارتی چرخه شماره  
.....۳ ۱۰۷

شکل (۱۳-۵) تاثیر فشار  $P_{L4}$  بر راندمان اگزرژی چرخه شماره  
.....۳ ۱۰۷

منابع پارس پرو هم

جدول	(۱-۱)	مقایسه	مفهوم	انرژی	و	
انرژی	۱۲.....					
جدول	(۲-۱)	یکی	از	انواع	مدل‌های	محیط
مرجع	۲۳.....					
جدول	(۱-۳)	حدود	ارزش	گرمایی	و	رطوبت اجزای زباله در حالت طبیعی و
مرطوب	۴۷.....					
جدول	(۲-۳)	رطوبت	و	عناصر	شیمیایی	اجزای موجود در
زباله	۴۸.....					
جدول	(۳-۳)	ترکیب	اجزای	زباله	مورد	استفاده در زباله سوز چرخه مورد بررسی بر حسب مواد شیمیایی
مجزا	.....					
	۵۱					
جدول	(۱-۵)	راندمان‌های	انرژی	و	انرژی	چرخه شماره
۱	۸۷.....					
جدول	(۲-۵)	راندمان‌های	انرژی	و	انرژی	چرخه شماره
۲	۹۱.....					
جدول	(۳-۵)	راندمان‌های	انرژی	و	انرژی	چرخه شماره
۳	۱۰۰.....					

## فهرست علائم و اختصارات

### حروف لاتین

e or Ex	exergy (kJ/kg)	اگزرژی
$h$	enthalpy (kJ/kg)	آنتالپی
s	entropy (kJ/kgK)	آنتروپی
HX	heat exchanger	مبدل حرارتی
LHV	Lower Heating Value (kJ/kg)	کمترین ارزش حرارتی
HHV	Higher Heating Value (kJ/kg)	بیشترین ارزش حرارتی
GHV	Gross Heating Value (kJ/kg)	ارزش حرارتی کلی
$\dot{m}$	mass flow rate (kg/s)	دبی جرمی جریان
$P$	pressure (kPa)	فشار
$Q$	heat transfer rate (kW)	نرخ انتقال حرارت
$W$	work (kW)	کار
$T$	temperature (K)	دما
$\eta$	efficiency	راندمان
LNG	Liquid Natural Gas	گاز طبیعی مایع
LPG	Liquid Petroleum Gas	گاز مایع پتروشیمیایی
CNG	Compressed Natural Gas	گاز طبیعی فشرده
NGLs	Natural Gas Liquids	میعانات گاز طبیعی
GTL	Gas to Liquid	تبدیل گاز به مایع
CHP	Combined Heat & Power	تولید ترکیبی کار و حرارت
TFT	Theoric Flame Temperature	دمای شعله تئوری
MF	Moisture Free	بدون رطوبت
MAF	Moisture and Ash Free	بدون رطوبت و خاکستر

زیر نویس ها

Cp	specific heat (kJ/kgK)	گرمای ویژه
A	air	هوا
CG	city gas	گاز شهری
th	thermal	گرمایی
G	garbage	زباله
INC	incinerator	زباله سوز
L	LNG cycle	چرخه گاز طبیعی مایع شده
N	NH3/H2O cycle	چرخه محلول آمونیاکی
TN1	turbine 1	توربین شماره ۱
TN2	turbine 2	توربین شماره ۲
P1	pump 1	پمپ شماره ۱
P2	pump 2	پمپ شماره ۲
O	reference (ambient)	نقطه مرجع (محیط)
N.G	natural gas	گاز طبیعی
$T_b$	border temperature	دمای مرز
in		ورودی
out		خروجی
loss		تلفات
amb	ambient	محیط
net		خالص
excess		افزوده شده
CH4		متان
COGEN		تولید همزمان
FUEL		سوخت
GEN		تولید شده
POWER		توان
SITE		مجموعه نیروگاهی
BOILER		بویلر
FIRE HEATER		گرم کن احتراقی
SREAM		بخار
BFW	Boiler Feed Water	آب تغذیه بویلر
R		نسبت توان به گرما

## فصل ۱: مقدمه‌ای بر آنالیز انرژی و انرژی

### مقدمه

آنالیز انرژی یک روش آنالیز ترمودینامیکی است که بر اساس قانون دوم ترمودینامیک بوده و به صورت بسیار معنا دار و منطقی یک روش ثانوی و روشنگرانه جهت ارزیابی و مقایسه فرآیندها و سیستم‌ها ارائه می‌کند. به ویژه آنالیز انرژی منجر به ارائه راندمان‌هایی می‌شود که مقیاس درستی از اینکه چگونه عملکرد واقعی به عملکرد ایده‌آل نزدیک می‌شود، ارائه می‌کند و همچنین نسبت به آنالیز انرژی، دلایل و مکان‌های افت‌های ترمودینامیکی را به صورت بسیار شفاف‌تر بیان می‌کند. بنابراین آنالیز انرژی می‌تواند به بهبود و بهینه سازی طراحی‌ها کمک کند.

در سال‌های اخیر شاهد افزایش کاربرد و درک سودمندی روش آنالیز انرژی توسط صنعتگران، دولت‌ها و دانشگاهیان بوده‌ایم. همچنین روش آنالیز انرژی به سرعت در حال جهانی شدن است و امید است با به کار گیری این روش، از منابع انرژی موجود حداکثر بهره برداری صورت گیرد.

ترمودینامیک به توصیف رفتار، عملکرد و راندمان سیستم‌ها در حیطه تبدیل انرژی از یک حالت به حالت دیگر می‌پردازد. آنالیز ترمودینامیکی رایج در حله اول بر اساس قانون اول ترمودینامیک است که قانون بقای انرژی را بیان می‌کند. آنالیز انرژی یک سیستم تبدیل انرژی اساساً برآورد انرژی‌های ورودی و خروجی از سیستم است. انرژی خروجی از سیستم به دو بخش محصولات و تلفات شکسته می‌شود. راندمان‌ها اغلب به صورت نسبت کمیت‌های انرژی سنجیده می‌شوند، و اغلب به منظور ارزیابی و مقایسه سیستم‌های مختلف به کار می‌روند. برای مثال نیروگاه‌ها، گرم‌کننده‌ها و یخچال‌ها اغلب بر اساس راندمان‌های انرژی یا مقیاس‌های مطلوبیت انرژی مقایسه می‌شوند.

به هر حال، راندمان‌های انرژی اغلب منجر به گمراهی نیز می‌شوند. زیرا آنها همیشه معیاری از چگونگی نزدیکی عملکرد سیستم به عملکرد حالت ایده‌آل سیستم را ارائه نمی‌دهند. علاوه بر این، تلفات ترمودینامیکی که درون یک سیستم به وجود می‌آیند (یعنی فاکتورهایی که باعث انحراف عملکرد سیستم از حالت ایده‌آل می‌شوند)، اغلب به صورت صحیح همراه آنالیز انرژی تعیین و ارزیابی نمی‌شوند. نتایج آنالیز انرژی می‌توانند نشان دهند که ناکارایی‌های عمده درون بخش‌های اشتباه سیستم وجود داشته و همچنین بیان راندمان تکنولوژی، از آنچه به واقع وجود دارد متفاوت است.

آنالیز انرژی بسیاری از نقایص آنالیز انرژی را از بین می‌برد. آنالیز انرژی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک است و جهت تعیین علل، موقعیت و بزرگی ناکارایی فرآیندها بسیار مفید است. انرژی موجود در مقدار مشخصی انرژی در واقع برآوردی کمی از میزان مفید بودن آن انرژی یا به تعبیری کیفیت آن انرژی است. آنالیز انرژی تصدیق می‌کند که اگرچه انرژی نمی‌تواند تولید و یا نابود شود، اما از کیفیت آن می‌تواند کاسته شود و در نهایت می‌تواند به حالتی برسد که در آن در حالت تعادل کامل با محیط بوده و از این‌رو قادر به انجام کار نخواهد بود.

برای مثال، در مورد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، با استفاده از آنالیز انرژی قادر هستیم پتانسیل ماکزیمم موجود در انرژی ورودی به سیستم را تعیین کنیم. تنها چنانچه انرژی دستخوش

فرآیندهای برگشت پذیر باشد، این ماکزیمم پتانسیل حفظ شده و قابل بازیابی خواهد بود. در دنیای واقعی و به دلیل برگشت ناپذیر بودن همیشگی فرآیندها، به هنگام بازیابی این پتانسیل با تلفات روبرو خواهیم بود.

جریان انرژی یک ماده در حال جریان زمانی بیشینه است که کار حاصل از آن هنگامی بدست آید که فرآیند به صورت برگشت پذیر به حالت محیط برسد و تبادل جرم و حرارت تنها با محیط صورت گیرد. در اصل، آنالیز انرژی بیان می کند که محدودیت های تئوریک که در سیستم وجود دارد، آشکارا بیانگر این است که هیچ سیستم واقعی نمی تواند همه انرژی را حفظ نموده و تنها بخشی از انرژی ورودی به سیستم قابل بازیابی است. همچنین آنالیز انرژی محدودیت های عملی را از طریق ارائه تلفات به صورتی که مقیاس مستقیمی از تلفات انرژی است، به شکل کمی مشخص می کند.

اصطلاح انرژی اغلب با عناوینی نظیر انرژی در دسترس، قابلیت استفاده، قابلیت انجام کار و ... نیز به کار برده می شود. مصرف انرژی نیز اغلب بازگشت ناپذیری، کار تلف شده، اتلاف و ... نامیده می شود. نامگذاری ترم های انرژی منطبق بر نامگذاری تحلیل انرژی استاندارد کتاس<sup>۱</sup> و همکاران او در سال ۱۹۸۷ می باشد [۱].

جدول (۱-۱): مقایسه مفهوم انرژی و انرژی

انرژی	انرژی
فقط وابسته به خواص ماده یا جریان انرژی بوده و مستقل از محیط است.	وابسته به خواص ماده، جریان انرژی و محیط است.
وقتی با محیط در تعادل است مقادیری غیر از صفر می تواند داشته باشد.	وقتی که در حالت مرده (تعادل با محیط) قرار دارد مقدار آن صفر است.
با توجه به قانون اول ترمودینامیک اصل بقا دارد. (اصل بقای انرژی)	فقط برای فرآیندهای برگشت پذیر اصل بقا دارد و برای فرآیندهای برگشت ناپذیر اصل بقا ندارد.
به هیچ عنوان نابود یا خلق نمی شود.	برای فرآیندهای برگشت پذیر نابود یا خلق نمی شود ولی برای فرآیندهای برگشت ناپذیر نابود می شود.
به صورت های مختلف (جنبشی، پتانسیل، کار و غیره) وجود دارد و به همان گونه نیز اندازه گیری می شود.	به صورت های مختلف وجود دارد و بر مبنای کار و یا قابلیت تولید کار تعریف می گردد.
مقیاسی برای کمیت است.	مقیاسی هم برای کیفیت و هم کمیت است.

## ۲-۱) بالانس جرم، انرژی و آنتروپی

بالانس کلی یک کمیت در یک سیستم را می توان به صورت زیر نوشت:

$$Input + Generation - Output - Consumption = Accumulation \quad (1-1)$$

ورودی و خروجی به ترتیب به کمیت های وارد شده و خارج شده از مرزهای سیستم اشاره دارند. تولید و اتلاف نیز به ترتیب به کمیت های تولید شده و تلف شده (از بین رفته) در سیستم اشاره دارند. انباشتگی به افزودن (منفی یا مثبت) یک کمیت در درون سیستم اشاره می کند.

بالانس کلی بالا را می‌توان برای کمیت‌های جرم، انرژی، آنتروپی و انرژی نوشت. جرم و انرژی، بر اساس قوانین پایستگی (صرف نظر از واکنش‌های هسته‌ای) نه به وجود می‌آیند و نه از بین می‌روند. و لذا بالانس کلی بالا برای هر کدام از این کمیت‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Mass\ input - Mass\ Output = Mass\ Accumulation \quad (2-1)$$

$$Energy\ input - Energy\ Output = Energy\ Accumulation \quad (3-1)$$

قبل از نوشتن معادله بالانس برای انرژی، بهتر است که این کار را برای آنتروپی انجام دهیم:

$$Entropy\ input + Entropy\ generation - Entropy\ Output = Entropy\ accumulation \quad (1-)$$

(4)

به واسطه وجود بازگشت ناپذیری‌ها در طول فرآیند، آنتروپی به وجود می‌آید اما از بین نمی‌رود. این معادلات بالانس نشان می‌دهند که در یک بازه زمانی در یک سیستم چه اتفاقی می‌افتد. در یک فرآیند چرخه‌ای کامل که حالت‌های ابتدایی و نهایی سیستم یکسان است، ترم انباشتگی در همه معادلات بالانس صفر خواهد بود.

### ۳-۱) معادلات دقیق بالانس

در حالت کلی دو نوع سیستم در نظر می‌گیریم: سیستم باز (جریان دار) و سیستم بسته (بدون جریان). در حالت کلی سیستم‌های باز دارای بر هم کنش‌های جرم، حرارت و کار می‌باشند در حالی که سیستم‌های بسته دارای بر هم کنش‌های کار و حرارت می‌باشند. ورود جریان جرم و انتقال حرارت به سیستم و گرفتن کار از سیستم را معمولاً مثبت تعریف می‌کنیم.

یک فرآیند جریان ناپایدار را در بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  در نظر بگیرید. معادلات بالانس جرم، انرژی و آنتروپی را می‌توان به ترتیب به صورت زیر نوشت:

$$\sum_i m_i - \sum_e m_e = m_2 - m_1 \quad (5-1)$$

$$\sum_i (e + pv)_i m_i - \sum_e (e + pv)_e m_e + \sum_r (Q_r)_{1,2} - (W')_{1,2} = E_2 - E_1 \quad (6-1)$$

$$\sum_i s_i m_i - \sum_e s_e m_e + \sum_r \left( \frac{Q_r}{T_r} \right)_{1,2} + \prod_{1,2} = S_2 - S_1 \quad (7-1)$$

در این روابط  $m_e$  و  $m_i$  به ترتیب مقادیر جرم وارد شده به سیستم از ورودی  $i$  و جرم خارج شده از سیستم از خروجی  $e$  را نشان می‌دهند.  $(Q_r)_{1,2}$  مقدار حرارت وارد شده به حجم کنترل از طریق ناحیه  $r$  واقع بر سطح کنترل را نشان می‌دهد.  $(W')_{1,2}$  مقدار کار خارج شده از سطح کنترل است.  $\prod_{1,2}$  مقدار آنتروپی تولید شده در حجم کنترل است (همچنین به صورت  $S_{gen}$  نیز نشان داده می‌شود).  $m_1$  و  $E_1$  و  $S_1$  به ترتیب مقادیر جرم، انرژی و آنتروپی موجود در حجم کنترل در لحظه  $t_1$  را نشان می‌دهند. همچنین  $m_2$  و  $E_2$  و  $S_2$  نیز به ترتیب مقادیر جرم، انرژی و آنتروپی موجود در حجم کنترل در لحظه  $t_2$  را نشان می‌دهند.  $T, P, s, e$  و  $v$  به ترتیب نمایانگر انرژی مخصوص، آنتروپی مخصوص، فشار مطلق، دمای مطلق و حجم مخصوص می‌باشند. کار کل انجام شده توسط سیستم  $W'$ ، شامل کار جریان نبوده و آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$W' = W + W_x \quad (8-1)$$

در رابطه فوق  $W$  کار انجام شده توسط سیستم به واسطه تغییر حجم است و  $W_x$  کار محوری انجام شده توسط سیستم است. ترم کار محوری شامل تمامی حالت‌های کار می‌شود که می‌تواند جرمی را از روی زمین بلند کند (مانند کار مکانیکی، کار الکتریکی و ...) اما کار انجام شده توسط سیستم به واسطه تغییر حجم را در بر نمی‌گیرد.

انرژی مخصوص به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$e = u + ke + pe \quad (9-1)$$

در این رابطه  $pe, ke, u$  به ترتیب بیانگر انرژی داخلی مخصوص، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل

می‌باشند. در یک فرآیند بازگشت ناپذیر  $\prod_{1,2} > 0$  و در یک فرآیند بازگشت پذیر  $\prod_{1,2} = 0$

است.

برای جریان جرمی  $m_j$  که از ورودی (خروجی)  $j$  عبور می‌کند، رابطه زیر برقرار است:

$$m_j = \int_{t_1}^{t_2} \left[ \int_j (\rho V_n dA)_j \right] dt \quad (10-1)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی جرم عبوری از المان سطحی  $dA$  روی سطح کنترل و در بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  است و  $V_n$  مولفه سرعت جریان جرم عمود بر المان سطحی  $dA$  است. در جریان یک بعدی (جریانی که در آن سرعت و دیگر ویژگی‌های شدتی در موقعیت‌های مختلف نسبت به مقطع تغییر نمی‌کنند)، معادله فوق به صورت زیر خواهد بود:

$$m_j = \int_{t_1}^{t_2} (\rho V_n dA)_j dt \quad (11-1)$$

پیش از این فرض شده بود که انتقال حرارت در نواحی مجزا روی سطح کنترل رخ دهد و دمای هر ناحیه ثابت باشد. چنانچه دما در ناحیه انتقال حرارتی تغییر کند:

$$(Q_r)_{1,2} = \int_{t_1}^{t_2} \left[ \int_r (q dA)_r \right] dt \quad (12-1)$$

$$\left( \frac{Q_r}{T_r} \right)_{1,2} = \int_{t_1}^{t_2} \left[ \int_r \left( \frac{q}{T} \right)_r dA_r \right] dt \quad (13-1)$$

در روابط فوق  $T_r$  دمای نقطه‌ای روی سطح کنترل است که شار حرارتی در آنجا  $q_r$  است. همچنین در این روابط انتگرال گیری بر روی سطح جانبی ناحیه  $A_r$  انجام گرفته است. کمیت‌های جرم، انرژی و آنتروپی موجود در حجم کنترل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$m = \int \rho dV \quad (14-1)$$

$$E = \int \rho e dV \quad (15-1)$$

$$S = \int \rho s dV \quad (16-1)$$

انتگرال‌های فوق بر روی حجم کنترل محاسبه می‌شوند.

در یک سیستم بسته  $m_i = m_e = 0$  معادلات (۳-۵) تا (۳-۷) به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$0 = m_2 - m_1 \quad (17-1)$$

$$\sum_r (Q_r)_{1,2} - (W')_{1,2} = E_2 - E_1 \quad (18-1)$$

$$\sum_r \left( \frac{Q_r}{T_r} \right)_{1,2} + \Pi_{1,2} = S_2 - S_1 \quad (19-1)$$

#### ۴-۱) اگزرژی سیستم بسته

اگزرژی  $Ex_{non-flow}$  یک سیستم بسته با جرم  $m$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Ex_{non-flow} = Ex_{ph} + Ex_o + Ex_{kin} + Ex_{pot} \quad (20-1)$$

ترم‌های رابطه فوق به صورت زیر می‌باشند:

$$Ex_{pot} = PE \quad (21-1)$$

$$Ex_{kin} = KE \quad (22-1)$$

$$Ex_o = \sum_i (\mu_{io} - \mu_{i0o}) N_i \quad (23-1)$$

$$Ex_{non-flow, ph} = (U - U_o) + P_o (V - V_o) - T_o (S - S_o) \quad (24-1)$$

در این روابط سیستم دارای دمای  $T$ ، فشار  $P$ ، پتانسیل شیمیایی  $\mu_i$  برای انواع  $i$ ، آنترپی  $S$ ، انرژی  $E$ ، حجم  $V$  و تعداد مول  $N_i$  برای انواع  $i$  است. سیستم در محیطی فرضی قرار دارد که آن محیط در حالت تعادل قرار داشته و خواص شدتی آن عبارتند از:  $\mu_{io}, P_o, T_o$ .

کمیت  $\mu_{io}$  نشانگر مقدار  $\mu$  در حالت محیطی است (یعنی در شرایط  $(P_o, T_o)$ ). ترم‌های موجود در سمت راست معادله (۲۰-۱) به ترتیب نمایانگر اگزرژی فیزیکی، اگزرژی شیمیایی، اگزرژی سینتیک و اگزرژی پتانسیل یک سیستم غیر جریانی می‌باشند.

اگزرژی خاصیتی از سیستم و محیط اطراف آن است که خواص شدتی و مقداری سیستم را با خواص شدتی محیط در هم می‌آمیزد.

اگرژی فیزیکی یک سیستم بسته بیشترین کار قابل حصول از سیستم است که در حالتی بدست آمده است که فرآیند به حالت تعادل مکانیکی و گرمایی با محیط رسیده است و اگرژی شیمیایی یک سیستم بسته بیشترین کار قابل حصول از سیستم است در حالی که فرآیند از حالت محیط به حالت مرده برسد (یعنی تعادل کامل با محیط).

## ۵-۱) اگرژی جریان‌ها

### ۱-۵-۱) اگرژی جریان یک ماده

اگرژی جریان یک ماده  $Ex_{flow}$  مجموع اگرژی غیر جریانی ماده به همراه کار جریان ماده است (نسبت به نقطه مرجع  $P_o$ )، یعنی:

$$Ex_{flow} = Ex_{non-flow} + (P - P_o)V \quad (25-1)$$

با جایگزینی از روابط مربوط به اگرژی سیستم بسته بدست می‌آوریم:

$$Ex_{flow} = Ex_{ph} + Ex_o + Ex_{kin} + Ex_{pot} \quad (26-1)$$

$$Ex_{pot} = PE \quad (27-1)$$

$$Ex_{kin} = KE \quad (28-1)$$

$$Ex_o = \sum_i (\mu_{io} - \mu_{i00})N_i \quad (29-1)$$

$$Ex_{flow,ph} = (H - H_o) - T_o(S - S_o) \quad (30-1)$$

### ۱-۵-۲) اگرژی انرژی گرمایی

یک جرم کنترل را در نظر بگیرید که ابتدا در حالت مرده قرار دارد و در یک واکنش شیمیایی با یک سیستم دیگر و در حجم ثابت شروع به گرم شدن یا سرد شدن می‌کند. حرارت جذب شده توسط جرم کنترل را  $Q$  می‌نامیم. چنانچه جریان اگرژی همراه با حرارت منتقل شده  $Q$  را توسط  $Ex_Q$  نشان دهیم خواهیم داشت:

$$Ex_Q = \int_i^f (1 - T_o/T) \delta Q \quad (31-1)$$

در این رابطه  $\delta Q$  انتقال حرارت افزایشی است و انتگرال گیری از حالت اولیه تا حالت نهایی انجام می‌شود. این انرژی گرمایی معادل حداقل کار مورد نیاز سیستم ترکیبی جرم کنترل و محیط است و به منظور تغییر حالت جرم کنترل از حالت مرده به حالت نهایی مورد نیاز است. اغلب کمیت بدون بعد درون پرانتز عبارت فوق را فاکتور دمای انرژی‌گذری می‌نامند و با  $\tau$  نشان می‌دهند:

$$\tau = 1 - T_o/T \quad (32-1)$$

رابطه بین  $\tau$  و نسبت دمایی  $T_o/T$  در شکل (1-1) نشان داده شده است.

چنانچه دمای جرم کنترل ثابت باشد، انرژی‌گذری گرمایی منتقل شده همراه با انتقال حرارت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Ex_Q = (1 - T_o/T)Q = \tau Q \quad (33-1)$$

در حالتی که انتقال حرارت در ناحیه  $r$  روی سطح کنترل رخ دهد و در این ناحیه تغییر دما نیز داشته باشیم:

$$Ex_Q = \int_r [q_r (1 - T_o/T) dA_r] \quad (34-1)$$

در این رابطه  $q_r$  جریان حرارت بر واحد سطح را در ناحیه‌ای بر روی سطح کنترل نشان می‌دهد که دمای آن  $T_r$  است.

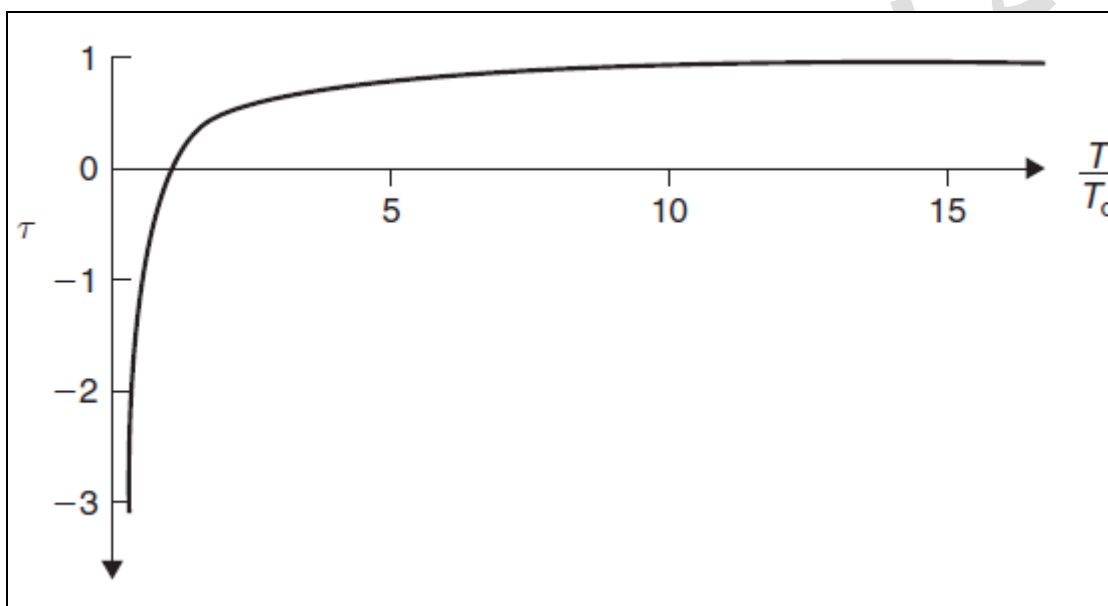
### ۳-۵-۱) انرژی‌گذری کار

معادله (۸-۱) کار کل  $W'$  را به دو مولفه  $W_x$  و  $W$  تجزیه می‌کند. انرژی‌گذری همراه با کار محوری  $Ex_W$  توسط  $W_x$  تعریف می‌شود.

انتقال انرژی همراه با کار انجام شده به واسطه تغییر حجم توسط سیستم، کار خالص قابل استفاده به واسطه تغییر حجم بوده و توسط  $W_{NET}$  نشان داده می‌شود. لذا برای یک فرآیند در بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  داریم:

$$(W_{NET})_{1,2} = W_{1,2} - P_o(V_2 - V_1) \quad (35-1)$$

در این رابطه  $W_{1,2}$  کار انجام شده توسط سیستم به دلیل تغییر حجم  $(V_2 - V_1)$  است. ترم  $P_o(V_2 - V_1)$  کار جابجایی لازم جهت تغییر حجم در برابر فشار ثابت  $P_o$  اعمال شده از محیط است.



شکل (۱-۱): رابطه بین فاکتور دمای انرژی و نسبت دمای مطلق

#### ۱-۵-۴) انرژی الکتریکی

همانند کار محوری انرژی همراه با الکتریسیته معادل انرژی است.

#### ۱-۶) اتلاف انرژی

در یک فرآیند که در یک سیستم رخ می‌دهد، اختلاف بین انرژی کل ورودی به سیستم و انرژی کل خروجی از آن منهای انباشتگی انرژی در سیستم، اتلاف انرژی نامیده می‌شود و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I = T_o S_{gen} \quad (36-1)$$

معادله فوق بیان می کند که اتلاف انرژی متناسب با تولید آنتروپی است و این رابطه به عنوان رابطه گوی-استودولا شناخته می شود.

### ۷-۱) بالانس انرژی

از ترکیب قانون پایستگی انرژی و قانون عدم پایستگی آنتروپی، بالانس انرژی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$Exergy\ input - Exergy\ output - Exergy\ consumption = Exergy\ accumulation \quad (37-1)$$

اتلاف (مصرف) انرژی به دلیل بازگشت ناپذیری ها است. اتلاف انرژی متناسب با تولید آنتروپی است. معادلات (۳-۱) و (۳۷-۱) یک تفاوت اساسی بین انرژی و انرژی را بیان می کنند و آن این است که انرژی پایسته است در حالی که انرژی (میزان کیفیت یا پتانسیل انجام کار انرژی) می تواند اتلاف داشته باشد.

معادلات بالانس مشابهی همانند معادلات (۵-۱) تا (۷-۱) را می توان برای انرژی نیز به کار برد. با استفاده از تعبیر فیزیکی معادله (۳۷-۱)، برای یک فرآیند غیر دائم و در خلال بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  خواهیم داشت:

$$\sum_i ex_i m_i - \sum_e ex_e m_e + \sum_r (Ex_{Qr})_{1,2} - (Ex_W)_{1,2} - (W_{NET})_{1,2} - I_{1,2} = Ex_2 - Ex_1 \quad (38-1)$$

در معادله فوق ترم  $(W_{NET})_{1,2}$  توسط معادله (۳-۳۵) تعریف می شود. همچنین:

$$(Ex_{Qr})_{1,2} = \int_{t_1}^{t_2} \left[ \int_L (1 - T_o/T_r) q_r dA_r \right] dt \quad (39-1)$$

$$I_{1,2} = T_o S_{gen,1,2} \quad (40-1)$$

$$Ex = \int \rho \xi dV \quad (41-1)$$

در روابط فوق  $I$  و  $S_{gen}$  به ترتیب اتلاف انرژی و تولید آنروپی را نشان می‌دهند.  $Ex$  بیانگر انرژی و انتگرال  $Ex$  روی حجم کنترل محاسبه شده است. دو ترم اول سمت چپ معادله (۳۸-۱) نشانگر انرژی خالص ورودی همراه با جرم هستند و ترم سوم انرژی خالص ورودی همراه با حرارت را نشان می‌دهد، ترم چهارم و پنجم معرف انرژی خالص ورودی همراه با کار بوده و ترم ششم اتلاف انرژی را نشان می‌دهد. سمت راست معادله (۳۸-۱) معرف انباشتگی انرژی می‌باشد.

برای یک سیستم بسته معادله (۳۸-۱) به معادله زیر ساده می‌شود:

$$\sum_r (Ex_{Qr})_{1,2} - (Ex_W)_{1,2} - (W_{NET})_{1,2} - I_{1,2} = Ex_2 - Ex_1 \quad (42-1)$$

چنانچه حجم ثابت باشد  $(W_{NET})_{1,2} = 0$  خواهد بود. همچنین هنگامی که حالت‌های ابتدایی و انتهای یکسان هستند (مثلاً در یک چرخه کامل)، سمت راست معادلات (۳۸-۱) و (۴۲-۱) صفر می‌شود.

## ۸-۱ محیط مرجع

انرژی نسبت به یک محیط مرجع سنجیده می‌شود، از اینرو خواص شدتی محیط مرجع انرژی جریان یا سیستم را تعیین می‌کنند.

### ۸-۱-۱ مشخصات تئوری محیط مرجع

محیط مرجع با تمامی اجزای آن در تعادل پایدار قرار دارد. همچنین بین اجزای محیط واکنش‌های شیمیایی وجود ندارد. محیط مرجع همانند یک سیستم بی‌نهایت رفتار می‌کند و برای حرارت و ماده نقش چشمه و چاه را ایفا می‌کند. محیط مرجع تنها فرآیندهای بازگشت پذیر داخلی را تجربه می‌کند که در آنها خواص شدتی محیط بدون تغییر باقی می‌مانند (یعنی  $T_o$ ،  $P_o$  و پتانسیل شیمیایی  $\mu_{io}$  هر مولفه  $i$  ثابت باقی می‌مانند). انرژی محیط مرجع صفر است. انرژی یک جریان یا یک سیستم در تعادل با محیط مرجع نیز صفر است.

محیط طبیعی دارای خواص تئوریکی محیط مرجع نمی‌باشد. محیط طبیعی در حالت تعادل قرار ندارد و خواص شدتی آن دارای تغییرات مکانی و زمانی می‌باشند. اگزرژی محیط طبیعی صفر نیست و چنانچه محیط طبیعی به حالت تعادل برود می‌توان از آن کار دریافت کرد. بنابراین مدل-های محیط مرجع را مورد استفاده قرار می‌دهیم تا بتوانیم سازگاری‌های لازم بین نیازمندی‌های تئوریکی محیط مرجع و رفتار واقعی محیط طبیعی را بدست آوریم.

### ۲-۸-۱ مدل‌های محیط مرجع

در زیر چندین مدل محیط مرجع را مورد بررسی قرار می‌دهیم:

- مدل‌های زیر سیستمی محیط طبیعی: یکی از دسته‌های مهم مدل‌های محیط طبیعی، مدل زیر سیستمی محیط طبیعی است. این مدل‌ها در تلاش‌اند تا زیر سیستم‌های واقعی محیط طبیعی را شبیه‌سازی کنند. جدول (۲-۱) یکی از مدل‌های زیر سیستمی را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۱): یکی از انواع مدل‌های محیط مرجع

Temperature	$T_0 = 298.15 \text{ K}$														
Pressure	$P_0 = 1 \text{ atm}$														
Composition	(i) Atmospheric air saturated with $\text{H}_2\text{O}$ at $T_0$ and $P_0$ , having the following composition: <table border="1"><thead><tr><th>Air constituents</th><th>Mole fraction</th></tr></thead><tbody><tr><td><math>\text{N}_2</math></td><td>0.7567</td></tr><tr><td><math>\text{O}_2</math></td><td>0.2035</td></tr><tr><td><math>\text{H}_2\text{O}</math></td><td>0.0303</td></tr><tr><td>Ar</td><td>0.0091</td></tr><tr><td><math>\text{CO}_2</math></td><td>0.0003</td></tr><tr><td><math>\text{H}_2</math></td><td>0.0001</td></tr></tbody></table>	Air constituents	Mole fraction	$\text{N}_2$	0.7567	$\text{O}_2$	0.2035	$\text{H}_2\text{O}$	0.0303	Ar	0.0091	$\text{CO}_2$	0.0003	$\text{H}_2$	0.0001
Air constituents	Mole fraction														
$\text{N}_2$	0.7567														
$\text{O}_2$	0.2035														
$\text{H}_2\text{O}$	0.0303														
Ar	0.0091														
$\text{CO}_2$	0.0003														
$\text{H}_2$	0.0001														
	(ii) The following condensed phases at $T_0$ and $P_0$ : Water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) Limestone ( $\text{CaCO}_3$ ) Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )														

Source: Adapted from Gaggioli and Petit (1977).

- مدل‌های ماده مرجع: در این مدل یک ماده مرجع انتخاب می‌شود و برای هر المان شیمیایی آن انرژی صفر در نظر گرفته می‌شود.
- مدل‌های تعادلی: مدلی که در آن تمامی مواد موجود در اتمسفر، اقیانوس‌ها و پوسته زمین با یکدیگر ادغام می‌شوند و ترکیب تعادلی در یک دمای مشخص تعیین می‌شود. این مدل توسط آرنتز<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۰ ارائه شده است.
- مدل‌های تعادلی محدود: آرنتز در سال ۱۹۸۰، مدل اصلاح شده‌ای از مدل تعادلی خود را ارائه نمود که در آن محاسبه ترکیب تعادلی بدون در نظر گرفتن احتمال تشکیل اسید نیتریک ( $HNO_3$ ) انجام شده است.
- مدل‌های مستقل فرآیندی: این مدل تنها مولفه‌هایی را در بر می‌گیرد که در فرآیند مورد آزمایش که در ترکیب تعادلی پایدار و در دما و فشار کل محیط طبیعی انجام شده است سهیم باشند. این مدل توسط بوسنجاکوویچ<sup>۵</sup> در سال ۱۹۶۳ ارائه شده است.

### ۹-۱) راندمان‌ها و دیگر مقیاس‌های مورد اهمیت

همیشه در تصمیم‌گیری راجع به بهره‌وری منابع، راندمان از اهمیت بالایی برخوردار است. راندمان به صورت توانایی تولید یک اثر مطلوب، بدون اتلاف و یا حداقل استفاده از انرژی، زمان، منابع و ... تعریف می‌شود و نشانگر میزان نزدیکی به حالت ایده آل در انجام یک فرآیند است. برای تعیین راندمان در اغلب سیستم‌های مهندسی از نسبت‌های بی بعد کمیت‌ها استفاده می‌شود. از نسبت‌های انرژی معمولاً برای تعیین راندمان‌های سیستم‌های مهندسی که هدف اولیه آنها تبدیل انرژی است استفاده می‌شود. این راندمان‌ها بر اساس قانون اول ترمودینامیک می‌باشند. مطابق با قانون اول ترمودینامیک چنانچه در یک فرآیند میزان انرژی ورودی معادل انرژی قابل بازیافت خروجی باشد (یعنی اتلاف انرژی وجود ندارد)، راندمان ماکزیمم است. با این وجود راندمان‌های

انرژی اغلب ما را به اشتباه می‌اندازد زیرا این راندمان‌ها مقیاس مناسبی از نزدیکی به حالت ایده‌آل نیستند.

برای تعیین راندمان‌های معنی‌دارتر، کمیته‌ی نیاز است که نسبت‌های آن مقیاس درست‌تری از نزدیکی به حالت ایده‌آل ارائه دهند. بنابراین می‌بایست از قانون دوم ترمودینامیک استفاده کنیم. قانون دوم ترمودینامیک بیان می‌کند که بیشترین راندمان مربوط به فرآیند برگشت پذیر است. بنابراین باید قانون دوم را به صورت کمی ارائه کنیم تا راندمان‌ها قابل تعریف باشند.

اصل افزایش آنتروپی، که بیانگر تولید آنتروپی به واسطه بازگشت ناپذیری‌ها است، قانون دوم ترمودینامیک را کمی می‌کند. از نقطه نظر آنتروپی، راندمان فرآیندی ماکزیمم است که در آن فرآیند آنتروپی پایسته باشد. در فرآیندهای غیر ایده‌آل آنتروپی تولید می‌شود. مقدار تولید آنتروپی معیاری از غیر ایده‌آل بودن یا بازگشت ناپذیری فرآیند است. در حالت کلی نسبت‌های آنتروپی معیاری از میزان نزدیکی فرآیند به حالت ایده‌آل ارائه نمی‌کنند.

با توجه به قانون دوم ترمودینامیک، کمیته‌ی که معیار مناسبی از میزان نزدیکی به حالت ایده‌آل ارائه می‌کند نجنترروپی می‌باشد. تعریف این کمیت به این صورت است که اتلاف نجنترروپی به واسطه بازگشت ناپذیری‌ها معادل تولید آنتروپی به واسطه بازگشت ناپذیری‌ها است. در نتیجه اصل افزایش آنتروپی، از نقطه نظر نجنترروپی، راندمان ماکزیمم یک فرآیند وقتی حاصل می‌شود که نجنترروپی پایسته باشد. در فرآیندهای غیر ایده‌آل نجنترروپی تلف می‌شود. به هر حال راندمان‌های کلی را نمی‌توان بر اساس نجنترروپی تعریف نمود، زیرا مقدار مطلق نجنترروپی تعریف نشده است.

می‌توان از طریق توانایی انجام کار، نجنترروپی را بیشتر کمی کرد. پس راندمان ماکزیمم تنها وقتی قابل حصول است که در پایان فرآیند، مجموع کل انرژی‌های موجود که قابلیت انجام کار دارند با مجموع این انرژی‌ها قبل از انجام فرآیند برابر باشد. انرژی معیاری از توانایی انجام کار است و از نقطه نظر انرژی، راندمان فرآیندی ماکزیمم است که انرژی در آن پایستار باشد. راندمان‌های

تعریف شده با استفاده از نسبت‌های انرژی، معیار مناسبی از نزدیکی به حالت ایده‌آل ارائه می‌کند. راندمان انرژی نسبت به راندمان انرژی بهتر درک می‌شود زیرا مقادیر آن همیشه بین ۰٪ تا ۱۰۰٪ است. مقادیر بیشتر از ۱۰۰٪ در راندمان انرژی، نظیر مقادیر ضریب عملکرد یخچال‌ها، با در نظر گرفتن راندمان انرژی به مقادیر بین ۰٪ تا ۱۰۰٪ تبدیل می‌شوند. در واقع برخی محققان<sup>۶</sup> راندمان‌های انرژی را واقعی و درست می‌نامند در حالی که راندمان‌های انرژی را تخمینی از واقعیت می‌نامند.

راندمان‌های انرژی ( $\eta$ ) و انرژی ( $\Psi$ ) برای فرآیندهای جریان پایدار که در یک سیستم رخ می‌دهند، اغلب به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\eta = \frac{\text{Energy in product outputs}}{\text{Energy in inputs}} = 1 - \frac{\text{Energy loss}}{\text{Energy in inputs}} \quad (43-1)$$

$$\Psi = \frac{\text{Exergy in product outputs}}{\text{Exergy in inputs}} = \frac{\text{Exergy loss plus consumption}}{\text{Exergy in inputs}} \quad (44-1)$$

دو نوع راندمان معمول دیگر که بر اساس انرژی می‌باشند مطابق زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{Rational efficiency} = \frac{\text{Total exergy output}}{\text{Total exergy input}} = 1 - \frac{\text{Exergy consumption}}{\text{Total exergy input}} \quad (45-1)$$

$$\text{Task efficiency} = \frac{\text{Theoretical min exergy input required}}{\text{Actual exergy input}} \quad (46-1)$$

در یک فرآیند، راندمان انرژی اغلب دیدگاه روشن‌گرانه‌تری نسبت به راندمان انرژی ارائه می‌کند، زیرا راندمان انرژی انرژی جریان‌ها را بر طبق محتوی انرژی آنها می‌سنجد و همچنین ناکارآمدی‌ها را به دو بخش تلفات جریان‌ات خروجی و تلفات ناشی از بازگشت ناپذیری‌ها تقسیم می‌کند. در حالت کلی راندمان انرژی معیاری از پتانسیل بهبود فرآیند را ارائه می‌کند.

## ۱۰-۱) فرآیند آنالیز انرژی و انرژی

یک روش ساده برای انجام آنالیز انرژی و انرژی شامل مراحل زیر می‌باشد:

- تقسیم فرآیند مورد نظر به تعداد بخش‌های دلخواه که به عمق جزئیات آنالیز بستگی دارد
- انجام بالانس جرم و انرژی بر روی فرآیند، و تعیین تمامی کمیت‌های اساسی از جمله کار و حرارت، و ویژگی‌هایی همچون دما و فشار
- انتخاب مدل محیط مرجع بر اساس ماهیت فرآیند، میزان پیچیدگی و قابل قبول بودن تحلیل، و پرسش‌هایی که برای آنها به دنبال جواب هستیم
- تعیین مقادیر انرژی و انرژی نسبت به مدل محیط مرجع انتخاب شده
- انجام بالانس انرژی و تعیین مقادیر اتلافات انرژی
- انتخاب تعریف راندمان‌ها بر اساس معیارهای مورد نظر و تعیین مقادیر راندمان‌ها
- تفسیر نتایج و ترسیم نتایج و پیشنهادات

## ۱-۱) خواص انرژی و انرژی

جهت آنالیز انرژی و انرژی فرآیندها، بسیاری از خواص ماده مورد نیاز است. خواص بسیاری از مواد (مانند بخار، هوا، گازهای حاصل از احتراق و مواد شیمیایی)، در مراجع متعددی وجود دارد.

مقادیر انرژی جریان‌های کار و حرارت مطلق می‌باشند در حالی که مقادیر انرژی جریان‌های جرمی نسبی هستند. آنتالپی‌ها نسبت به یک سطح مبنا سنجیده می‌شوند. از آنجائی که آنالیز انرژی با اختلاف انرژی سر و کار دارد، سطح مبنای انتخاب شده در محاسبه آنتالپی‌ها می‌تواند دلخواه باشد. اما با این وجود هنگام تعیین برخی راندمان‌های انرژی، آنتالپی‌ها می‌بایست نسبت به سطوح مبنای خاصی سنجیده شوند (برای مثال در فرآیندهای تبدیل انرژی، اغلب سطح مبنا به گونه‌ای انتخاب می‌شود که آنتالپی ماده معادل ارزش حرارتی بیشینه آن شود).

اما چنانچه بخواهیم نتایج آنالیزهای انرژی و انرژی را مقایسه کنیم، لازم است که سطوح مبنای محاسبات آنتالپی را به گونه‌ای تعیین کنیم که آنتالپی یک ماده مرکب نسبت به مولفه‌های پایدار

محیط مرجع سنجیده شود. بنابراین، ترکیبی که به عنوان مولفه پایدار محیط مرجع وجود دارد، طوری تعریف می‌شود که آنتالپی آن در  $P_o$  و  $T_o$  برابر صفر باشد. آنتالپی‌های محاسبه شده نسبت به چنین شرایطی، آنتالپی‌های پایه نامیده می‌شوند.<sup>۹</sup> آنتالپی پایه مشابه آنتالپی تشکیل است. آنتالپی تشکیل یک ترکیب، آنتالپی آن ترکیب در  $P_o$  و  $T_o$  است که نسبت به اجزای سازنده آن در  $P_o$  و  $T_o$  سنجیده می‌شود. آنتالپی پایه یک ترکیب، آنتالپی آن ترکیب در  $P_o$  و  $T_o$  است که نسبت به مولفه‌های پایدار محیط در  $P_o$  و  $T_o$  سنجیده می‌شود. در بسیاری از مدل‌های محیط مرجع، آنتالپی‌های پایه مواد سوختی برابر ارزش حرارتی بیشینه آنها است.

### ۱۲-۱) مفاهیم نتایج آنالیز انرژی

نتایج آنالیز انرژی فرآیندها و سیستم‌ها مستقیماً بر تصمیم‌گیری‌های کاربردی و مسیرهای تحقیق و توسعه موثر است. علاوه بر این، آنالیز انرژی در تعیین بهترین مسیرهای تحقیق و توسعه، بینش جامع‌تری نسبت به آنالیز انرژی در اختیار قرار می‌دهد. دو دلیل اصلی برای این امر وجود دارد:

۱. تلفات انرژی معرف تلفات واقعی پتانسیل موجود تولید محصول دلخواه از ورودی محرک است. در حالت کلی این امر برای تلفات انرژی صحیح نیست. بنابراین چنانچه هدف ما افزایش راندمان باشد، تمرکز بر تلفات انرژی باعث تمرکز تحقیقات بر کاهش تلفات شده که باعث برآورده شدن هدف خواهد شد.
۲. راندمان‌های انرژی همیشه بیانگر معیار نزدیکی عملکرد سیستم به حالت ایده‌آل هستند. این موضوع در حالت کلی برای راندمان‌های انرژی صحیح نیست. با تمرکز تحقیقات بر آن بخش‌ها یا فرآیندهایی از یک سیستم که کمترین راندمان انرژی را دارند، تلاش تحقیقاتی بر بخش‌هایی متمرکز شده است که ذاتاً بیشترین ظرفیت بهبود راندمان را دارند.

به عبارت دیگر با تمرکز بر راندمان‌های انرژی، تلاش تحقیقاتی صرف مواردی می‌شود که ظرفیت بالایی برای بهبود ندارند.

نتایج آنالیز انرژی معمولاً بیان می‌کنند که تلاش تحقیقاتی باید بیشتر بر روی تلفات انرژی داخلی متمرکز شود نه تلفات انرژی خارجی و نیز تقدم بررسی با فرآیندهایی است که تلفات انرژی آنها بیشتر است. این بیان به این مفهوم نیست که تلاش تحقیقاتی نباید بر روی فرآیندهایی با تلفات انرژی کمتر انجام شود بلکه این فرآیندها نیز مهم می‌باشند.

در حالت بسیار کلی‌تر، قابل ذکر است که تلاش تحقیقاتی نباید تنها بر اساس تحلیل‌های انرژی و انرژی انجام شود. عوامل مهم دیگری نیز باید در نظر گرفته شوند که از جمله آنها می‌توان از اقتصاد، تاثیرات محیطی، اصول ایمنی و پیامدهای اجتماعی و سیاسی نیز نام برد.

پایان  
پارسا  
پژوه

## فصل ۲: مقدمه‌ای بر تولید همزمان کار و حرارت

### مقدمه

تولید همزمان برق و حرارت یک روش صرفه‌جویی انرژی است که در آن برق و حرارت به صورت همزمان تولید می‌شوند. مصرف بی‌رویه انواع سوخت، ابعاد زیست محیطی و عدم امنیت در تامین منابع انرژی و همچنین گروهی از فاکتورهای دیگر، عواملی هستند که موجب رشد و توسعه تکنولوژی تولید همزمان در میان مدیران، مهندسان و طراحان شده‌اند. سیستم‌های تولید همزمان دارای پتانسیل لازم برای محدوده وسیعی از کاربردها می‌باشند و بالا بودن راندمان آنها نسبت به سیستم‌های مجزای تولید قدرت و حرارت کاملاً نمایان است.

حرارت حاصل از تولید همزمان می‌تواند به منظور گرمایش ناحیه‌ای<sup>۱</sup> و یا در صنایع فرآیندی مورد استفاده قرار گیرد. مثلاً انرژی حرارتی و الکتریکی یک مجموعه صنعتی مانند پالایشگاه یا پتروشیمی که تشکیل یافته از واحدهای فرآیندی مختلف است، توسط یک سیستم تولید همزمان مرکزی تامین می‌شوند.

سیستم تولید همزمان کار و حرارت نیازمندی‌های حرارتی، فرآیندی و الکتریکی مجموعه را تامین می‌کند. با توجه به تنوع تجهیزات تولید بخار و تبدیل انرژی بخار به برق، سیکل‌های تولید همزمان

دارای انواع مختلفی می‌باشند. اما در تمام آنها بخار با فشار بالا با عبور از توربین، جریان برق تولید می‌کند و در خروجی توربین یا استخراج از قسمت‌های میانی، بخار با فشار پایین تولید می‌شود که به مصارف حرارتی و فرآیندی مجموعه می‌رسد.

در یک شرایط مناسب موازنه جرم و انرژی، سیکل تولید همزمان کار و حرارت دارای بازده ۸۵٪ می‌باشد. در حالی که در یک نیروگاه بزرگ و کوچک با سیکل ساده این مقیاس در بهترین حالت به ترتیب ۴۰ و ۲۵٪ می‌باشد و قابل ذکر است که دلیل اصلی این امر تلفات حرارتی ایجاد شده در کندانسور می‌باشد [۲].

به منظور کاهش هزینه‌ها، به جای استفاده از سوخت‌های ارزان قیمت که همواره باعث تولید آلودگی می‌شوند، می‌توان از تولید همزمان استفاده کرد. محدودیت‌های زیست محیطی، منجر به افزایش کیفیت سوخت‌های مصرفی در صنایع شده که این عاملی برای تقویت انگیزه ذخیره سازی انرژی سوخت است که تولید همزمان از روش‌های تحقق این امر می‌باشد. بعد از بحران انرژی، تامین منابع انرژی یا به زبان ساده‌تر سوخت، یک امر ضروری بوده و رویه طراحی و ساخت صنایع بر اساس تجهیزات بازیافت قدرت و حرارت صورت گرفته است [۳].

## ۱-۲) انواع کاربردهای عمومی تولید همزمان

موضوع بیشتر کارهای انجام شده در سال‌های اخیر شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. گرمایش ناحیه‌ای: منجر به ساختن سیستم‌های گرمایش ناحیه‌ای با دمای آب در حدود  $80 - 150^{\circ}C$  برای گرم کردن فضا و تهیه آب گرم مصرفی شده است.
۲. کاربردهای صنعتی: برای تامین حرارت فرآیندهای واحدهای صنعتی می‌توان از بخار خروجی از توربین و یا گازهای خروجی از توربین گاز استفاده کرد [۴].

## ۲-۲) انواع سیستم‌های تولید همزمان

در یک سیستم تولید همزمان چندین تکنولوژی در کنار هم منجر به تولید الکتریسیته و گرما در یک واحد شده بطوریکه در پالایشگاه‌های امروزی اجزای سیستم عبارتند از توربین‌های گاز، مولدهای بخار بازیافت حرارت و توربین‌های بخار. نیروگاه‌های تولید همزمان در حالت کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

### ۱-۲-۲) چرخه بالایی<sup>۱۲</sup>

سیکل تولید همزمان بالایی، سیکلی است که در آن تمرکز اولیه بر تامین نیاز انرژی الکتریکی است. سوخت در ابتدا برای تولید برق استفاده می‌شود، در حالیکه هر گرمای اضافی قابل دسترس از فرآیند تولید برق، در فرآیند صنعتی که گرما نیاز دارد استفاده می‌گردد. فرآیندهای صنعتی برای تامین گرمای اضافی به یک مولد بخار کمکی نیاز دارند.

### ۲-۲-۲) چرخه پایینی<sup>۱۳</sup>

سیکل تولید همزمان پایینی، سیکلی است که در آن تمرکز اولیه بر تامین نیاز انرژی گرمایی است. سوخت در ابتدا برای تولید گرما برای فرآیند صنعتی مورد نظر استفاده می‌شود، در حالیکه هر گرمای اضافی قابل دسترس از فرآیند صنعتی برای تولید برق استفاده می‌گردد. پس می‌توان گفت که تنها چرخه بالایی است که موجب صرفه‌جویی واقعی در انرژی اولیه می‌شود. افزون بر آن، در بسیاری از موارد کاربرد، به بخار با کیفیت پایین (از نظر دما و قابلیت انجام کار) نیاز است که به آسانی می‌توان آن را در چرخه بالایی تولید کرد.

## ۳-۲ مزایای استفاده از تولید همزمان

مزایای استفاده از تولید همزمان شامل موارد زیر است:

- ارتقاء کارایی سوخت: در واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، تلفات به حداقل می‌رسد. بازده کلی این واحدها بین ۸۰ تا ۹۰٪ است در حالی که در یک نیروگاه متداول راندمان حرارتی عموماً بیشتر از ۵۰٪ نخواهد بود.
- سیستم تولید همزمان به صورت استراتژیک در نقاط مصرف انرژی به کار گرفته می‌شود، بطوریکه تولید انرژی در محل مصرف آن از افت‌ها و تلفات انتقال و توزیع که همراه انرژی الکتریکی است جلوگیری می‌کند.
- تامین حرارت مطمئن و انعطاف‌پذیر: با توجه به اینکه واحدهای تولید همزمان از حرارت تولیدی نیروگاه‌ها استفاده می‌کنند، تولید انرژی حرارتی در آنها بدون وقفه انجام می‌شود. همچنین میزان تولید برق و حرارت، با توجه به تقاضای آنها قابل تغییر است.
- قابلیت سوزاندن سوخت‌های مختلف شامل گاز طبیعی، ذغال سنگ، نفت و سوخت‌های جانبی برای تولید توان یا انرژی حرارتی وجود دارد. انرژی حرارتی سیستم می‌تواند به طور مستقیم در فرآیندهای مورد نیاز و به طور غیر مستقیم در تولید بخار، آب گرم، هوای گرم برای خشک کردن و سرد کردن در فرآیندهای سرمایشی مورد استفاده قرار گیرد [۴].

- هزینه‌های کمتر: در توجیه‌پذیری واحدهای تولید همزمان باید محدودیت‌های مالی را به دقت لحاظ نمود. لازم است در هر ناحیه انرژی‌های رقیب با واحدهای تولید همزمان مقایسه و به دقت تصمیم‌گیری شود. معمولاً واحدهای تولید همزمان به سرمایه‌گذاری بیشتری نسبت به سیستم‌های معمول تبدیل انرژی نیاز دارند. ولی باید دقت داشت که میزان مصرف انرژی در آنها بسیار پایین‌تر است. به عبارت دیگر هزینه‌های متوسط تبدیل یک واحد انرژی در واحدهای تولید همزمان پایین‌تر از سایر روش‌ها است.
- استفاده بیشتر از فضای ساختمان‌ها: با استفاده از واحدهای تولید همزمان، تجهیزات نصب شده در تاسیسات گرمایشی ساختمان‌ها کاهش می‌یابد، به همین دلیل فضای بیشتری در ساختمان‌ها قابل استفاده خواهد بود.
- هزینه‌های پایین‌تر تعمیرات و نگهداری: با توجه به اینکه برای استفاده از حرارت تولیدی در یک واحد تولید همزمان، تجهیزات کمتری در هر ساختمان مورد نیاز است، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری تجهیزات نیز کمتر خواهد شد.

## ۲-۴) روش‌های تولید همزمان

نیروگاه‌های تولید همزمان را می‌توان به پنج دسته کلی تقسیم نمود:

۱. بازیافت از توربین‌های زیرکش دار<sup>۱۴</sup>
۲. بازیافت از توربین‌های پس فشاری<sup>۱۵</sup>
۳. بازیافت حرارت از توربین‌های گازی<sup>۱۶</sup>
۴. بازیافت از سیکل ترکیبی<sup>۱۷</sup>
۵. بازیافت از موتورهای رفت و برگشتی<sup>۱۸</sup>

---

<sup>۱۴</sup> Extraction Condensing

<sup>۱۵</sup> Back Pressure

<sup>۱۶</sup> Gas Turbine Heat Recovery

<sup>۱۷</sup> Combined Cycle

<sup>۱۸</sup> Reciprocating Engines

نکته: بخار زیرکش معمولاً قبل از رسیدن به آخرین مرحله توربین از آن خارج می‌شود و به مصرف می‌رسد در حالی که در توربین پس فشاری بخار از قسمت‌های میانی توربین و با فشار بالاتر خارج می‌شود و در مصارف گرمایشی استفاده می‌شود. در صورتی که این بخارها به مصرف داخلی نیروگاه برسد، به آن سیستم تولید همزمان نمی‌گویند.

## ۵-۲) بازده نیروگاه تولید همزمان

از دیدگاه منابع انرژی، تولید همزمان تنها هنگامی سودمند است که در مصرف انرژی اولیه، در مقایسه با تولید جداگانه برق و بخار (یا گرما) صرفه جویی شود. بازده سیستم تولید همزمان از رابطه زیر بدست می‌آید [۵]:

$$\eta_{COGEN} = \frac{W_{GEN} + Q_{SITE}}{Q_{FUEL}} \quad (1-2)$$

ترم‌های رابطه فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$W_{GEN}$ : توان الکتریکی خالص تولید شده

$Q_{SITE}$ : انرژی حرارتی مورد نیاز مجموعه

$Q_{FUEL}$ : انرژی حاصل از سوخت مصرفی

$\eta_{COGEN}$ : بازده تولید همزمان

سیستم تولید همزمان وقتی سودبخش است که در آن بازده تولید همزمان بیشتر از بازده سیستم تولید جداگانه باشد.

بازده توان تولید شده مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{POWER} = \frac{W_{GEN}}{Q_{FUEL}} \quad (2-2)$$

در رابطه فوق  $\eta_{POWER}$  بازده توان تولیدی می‌باشد.

در سیستم‌های تولید همزمان، انرژی حاصل از سوختی که مصرف می‌شود، مقداری جهت تولید توان و مقداری دیگر صرف تامین حرارت فرآیندها می‌شود و قسمتی هم از بین می‌رود.

بازده تولید همزمان عبارت است از مقدار سوختی که مصرف می‌شود تا توان و حرارت مفید فرآیندها را تامین کند. اگرچه تعریف بازده تولید همزمان بسیار ساده و بی دردسر است، لیکن پیچیدگی‌هایی نیز دارد، مثلاً شامل فرآیندهای گرمایشی است که نیاز به سوزاندن سوخت از سیستم تولید همزمان نمی‌باشد و یا شامل تولید بخار فرآیندی<sup>۱۹</sup> از سیستم بازیافت حرارت اتلافی<sup>۲۰</sup> می‌باشد. حرارت تامین شده به نوعی مجموع تمام حرارت‌هایی است که از احتراق سوخت در مولدهای بخار و گرم‌کن‌های حرارتی سیستم و همچنین بازیافت حرارتی حاصل می‌شود [۵]:

$$Q_{SUPPLY} = \sum_{FIREDHEATERS} Q_{FUEL} + \sum_{BOILERS} Q_{FUEL} + \sum_{STEAMMAINS} Q_{GEN} \quad (۳-۲)$$

$$\sum_{BOILERS} Q_{FUEL} = \sum_{BOILERS} \frac{(h_{STEAM} - h_{BFW}) \dot{m}_{STEAM}}{\eta_{BOILER}} \quad (۴-۲)$$

ترم‌های رابطه فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$h_{STEAM}$  و  $h_{BFW}$ : به ترتیب آنتالپی مخصوص بخار تولید شده در مولدهای بخار و آب تغذیه می‌-

باشند.

$\dot{m}_{STEAM}$ : نرخ جریان بخار تولید شده در مولدهای بخار می‌باشد.

$\eta_{BOILER}$ : بازده مولد بخار می‌باشد.

اکنون تعریف دقیق‌تری از بازده تولید همزمان به صورت زیر ارائه می‌کنیم [۵]:

$$\eta_{COGEN} = \frac{W_{GEN} + Q_{SITE}}{Q_{SUPPLY}} \quad (۵-۲)$$

۶-۲) نسبت توان به گرمای یک مجموعه

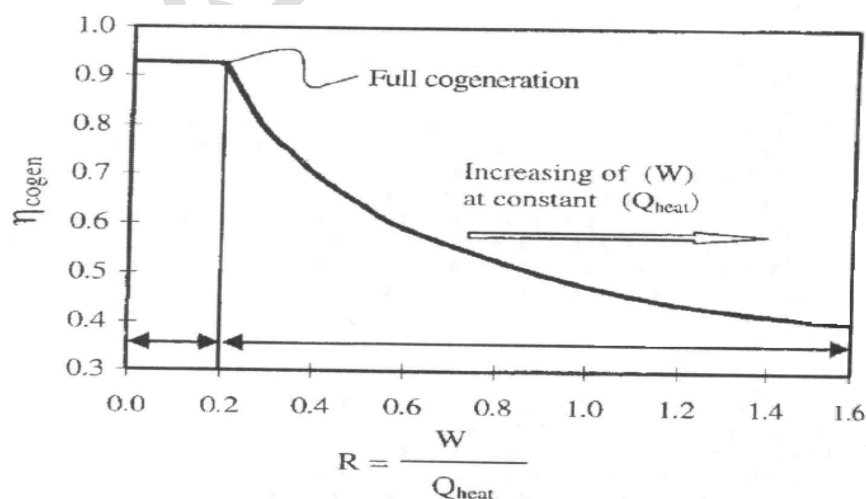
اکثر سیستم‌های تولید همزمان که عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند، وابسته به نسبت توان به گرمای کل مجموعه می‌باشند. در واقع برای سنجش میزان کارایی یک مجموعه نیاز به ابزاری است تا به واسطه آن بتوان ارزیابی درستی از عملکرد آن را داشت. این نسبت قابل تعریف برای هر مجموعه تولید همزمان به صورت زیر است [۶]:

$$R_{SITE} = \frac{W_{GEN}}{Q_{SITE}} \quad (۶-۲)$$

که  $R_{SITE}$  نسبت توان به گرما می‌باشد.

## ۷-۲ تحلیل نسبت توان به گرمای یک مجموعه

یک ترسیم گرافیکی مانند تغییرات بازده تولید همزمان بر اساس نسبت توان به گرما می‌تواند به عنوان معیاری مناسب برای ارزیابی کارایی یک مجموعه مورد توجه قرار گیرد. این نمودار در شکل (۱-۱) آمده است. ابتدا فرض بر این است که هیچ توانی در مجموعه تولید نمی‌شود. برای ترسیم این نمودار حرارت مورد نیاز مجموعه ثابت فرض می‌شود. آنگاه توان مورد نیاز به تدریج افزایش می‌یابد تا موجب افزایش نسبت توان به گرمای کل مجموعه شود [۶].



شکل (۱-۲): نمودار تغییرات بازده تولید همزمان بر حسب نسبت توان به گرما [۶]

در شروع همانطور که مشاهده می‌شود توان تولیدی مجموعه صفر می‌باشد، در این نقطه هیچ تلاشی جهت تولید توان توسط انبساط بخار در توربین شکل نمی‌گیرد. در عوض تمام بخار از محل خروج آبه عنوان انرژی حرارتی مفید دفع می‌شود.

از مقدار صفر شروع و بخار از طریق توربین‌ها برای تولید توان عبور داده می‌شود. تا این مرحله بخار از مسیر عبور آزاد انتقال می‌یافت. با افزایش  $R_{SITE}$  پتانسیل بخار منبسط شده در توربین به حد واقعی خود می‌رسد.

اگر بازده تولید همزمان معیاری برای هدف گذاری واردات و صادرات الکتریسیته از مجموعه فرض شود، نواحی که الکتریسیته باید وارد یا خارج شود را می‌توان در شکل تعیین نمود. در مقادیر بزرگتر  $R_{SITE}$  همانند آنچه در شکل قابل رویت است،  $\eta_{COGEN}$  تنزل می‌یابد و مجموعه مقادیر کمتری از تولید برق مرکزی را می‌گیرد. در چنین موقعیتی توقف در تولید برق، از نظر بازده در درون مجموعه امری اقتصادی است. به همین دلیل سیاست واردات توان برای توازن در مصرف مورد نیاز پیشنهاد می‌شود.

البته بحث‌هایی که پیرامون صادرات و واردات برق انجام شد، بر اساس معیار بازده ترمودینامیکی بود و صحبتی در مورد هزینه صورت نگرفت. به همین دلیل یک آنالیز اقتصادی کامل برای چنین مسائلی باید انجام گیرد. به عنوان مثال، در دسترس بودن مقادیر عظیم سوخت ارزان موجب توجیه اقتصادی تولید برق حتی در بعد وسیعی از  $R_{SITE}$  می‌شود، حتی با وجود اینکه بازده تولید همزمان در مجموعه ضعیف باشد.

همچنین نباید فراموش کرد که هزینه توان تبادل شده توسط مجموعه معمولاً تحت تاثیر تعرفه‌های متغیری است که عواملی مانند تغییرات فصلی (زمستان یا تابستان)، روزانه (شب یا روز) و یا تغییرات هفته‌ای (آخر هفته یا وسط هفته) در تعیین قیمت تمام شده نقش بسزایی دارند. حتی با

وجود اینکه ممکن است شکل پروفایل هدف گذاری تولید همزمان با توجه به ضرایب اقتصادی گذرا به هم بریزد، اما نکته اصلی و قابل تامل تفهیم اصول ارزیابی صحیح است.

علاوه بر آنچه در مورد سیستم‌های انحصاری توربین بخار گفته شد، ترکیبی از توربین گاز و توربین بخار را می‌توان در نظر گرفت که در مقادیر بالای  $R_{SITE}$  استفاده از توربین گاز منجر به افزایش بازده تولید همزمان نسبت به حالت اولیه خواهد شد.

تحلیل سیستم‌های تولید همزمان با استفاده از مقادیر  $R_{SITE}$ ، اگرچه دارای محدودیت‌هایی بوده و محاسبات هزینه را شامل نمی‌شود، دیدگاه مناسبی برای بهبود بازده مجموعه به طراح ارائه می‌دهد.

مجموعه پیرس پیرو همه

### فصل ۳: زباله سوزها و محاسبات پایه مربوط به بازیافت انرژی از زباله

#### مقدمه

یکی از روش‌های از بین بردن زباله‌ها سوزاندن آنها است که در واقع همان اشتعال مواد آلی (دارای کربن) و یا مواد خالص می‌باشد [۷].

زباله سوزها و سیستم‌های متنوع دیگر دما بالا که جهت منهدم کردن زباله‌ها طراحی شده‌اند، به عنوان سیستم‌های گرما درمانی یاد می‌شوند. سوزاندن مواد زایدی مانند زباله‌ها، آنها را به خاکستر جمع شده در کف زباله سوز، گازهای خروجی از دودکش، ذرات بسیار ریز و از همه مهمتر حرارت تبدیل می‌کند که این حرارت می‌تواند برای تولید توان الکتریکی به کار گرفته شود. آلودگی گازهای خروجی از دودکش قبل از تخلیه شدن به اتمسفر گرفته می‌شود.

منهدم نمودن زباله‌ها همراه با بازیافت انرژی حاصل از آن، یکی از انواع تکنولوژی‌های تبدیل زباله به انرژی<sup>۳۳</sup> می‌باشد. از جمله این تکنولوژی‌ها می‌توان از گاز سازی،<sup>۳۴</sup> تجزیه شیمیایی مواد بر اثر گرما و تجزیه بی‌هوازی نام برد.

منهدم کردن زباله می‌تواند بدون بازیافت انرژی و مواد حاصله نیز مورد استفاده قرار بگیرد. در بسیاری از کشورها نگرانی‌های جوامع تخصصی و محلی درباره آثار محیطی زباله سوزها همچنان

وجود دارد. زباله سوزها حجم زباله‌های اولیه را، بسته به ترکیب مواد و میزان بازیافت مواد، مانند بازیافت فلزات از خاکستر جهت استفاده مجدد، بین ۹۵-۹۶٪ کاهش می‌دهند [۸]. این بدان معنا است که با وجود اینکه سوزاندن زباله‌ها کاملاً جایگزین دفن آنها نشده است، حجم لازم برای دور انداختن زباله‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است.

فرآیند سوزاندن زباله‌ها دارای فواید فوق العاده مسلمی برای رسیدگی به انواع خاصی از زباله‌ها در مکان‌های مناسب می‌باشد. از جمله می‌توان به زباله‌های درمانگاهی و زباله‌های خطرناک بخصوصی اشاره نمود که عوامل بیماری‌زا و سمی آنها را می‌توان در دماهای بالا از بین برد. مثال‌هایی از این قبیل عبارتند از: مجتمع‌های شیمیایی چند محصولی با جریان‌های فاضلابی گوناگون سمی یا خیلی سمی که نمی‌توان آنها را به مجتمع‌های تصفیه فاضلاب معمولی هدایت نمود. سوزاندن زباله‌ها خصوصاً در کشورهایی نظیر ژاپن که زمین یک منبع کمیاب است، رایج است. دانمارک و سوئد پیشگام استفاده از انرژی تولید شده از زباله سوزها هستند. این کار در تاسیسات متمرکز تولید حرارت و توان انجام گرفته و طرح‌های حرارتی ناحیه‌ای را نیز تامین می‌کند. لازم به ذکر است که قدمت این کار در آنها بیش از صد سال می‌باشد [۹].

در دانمارک و در سال ۲۰۰۵، ۴,۸٪ از مصرف انرژی الکتریسیته و ۱۳,۷٪ از کل مصرف گرمای خانگی از طریق زباله سوزها تامین شده است [۱۰].

تعداد دیگری از کشورهای اروپایی جهت رسیدگی کردن به زباله‌های شهری، به شدت متکی به استفاده از زباله سوزها هستند. از جمله آنها می‌توان از لوکزامبورگ، هلند، آلمان و فرانسه نام برد [۸].

### ۳-۱) انواع زباله سوزها

یک زباله سوز کوره‌ای است برای سوزاندن زباله. زباله سوزهای پیشرفته دارای دستگاه کاهش دهنده آلودگی می‌باشند که از جمله آنها تمیز کننده گازهای خروجی از دودکش است. انواع مختلفی از طراحی مجتمع‌های زباله سوز وجود دارد که عبارتند از: آتشدان متحرک، آتشدان ثابت، آتشدان دوار و بستر روان.

### ۳-۱-۱) زباله سوز با آتشدان متحرک

یک نوع زباله سوز که برای زباله‌های شهری استفاده می‌شود، زباله سوز با آتشدان متحرک است. در این زباله سوز امکان حرکت زباله‌ها درون محفظه احتراق وجود دارد و این کار باعث کارایی بیشتر و احتراق کامل‌تر زباله‌ها می‌شود. دیگر یک زباله سوز با آتشدان متحرک به تنهایی قادر است تا ۳۵ تن زباله را در خود جای دهد و همچنین می‌تواند تا ۸۰۰۰ ساعت در سال کار کند و در این مدت تنها یک بازه زمانی ۱ ماهه جهت تعمیرات و نگهداری آن در نظر گرفته می‌شود [۱۱].

زباله سوزهای با آتشدان متحرک را گاهی زباله سوزهای زباله‌های جامد شهری<sup>۵</sup> نیز می‌نامند.

### ۳-۱-۲) زباله سوز با آتشدان ثابت

نوع قدیمی‌تر و ساده‌تر زباله سوز محفظه‌ای محدود به دیواره‌های آجری به همراه یک آتشدان فلزی ثابت است که بر روی یک مخزن جمع‌آوری خاکستر قرار گرفته و دارای یک ورودی زباله در بالا یا کنار آتشدان می‌باشد و همچنین دارای یک ورودی دیگر در کنار آتشدان است که جامدات سوخته نشده که سرباره نیز نامیده می‌شوند، از آنجا تخلیه می‌شوند. بسیاری از زباله سوزهای کوچک که پیشتر در مجتمع‌های آپارتمانی یافت می‌شدند، اکنون توسط فشرده سازهای زباله جایگزین شده‌اند.

### ۳-۱-۳) زباله سوز با آتشدان دوار

زباله سوز با آتشدان دوار [۱۲]، اغلب توسط شهرداری‌ها و مجتمع‌های بزرگ صنعتی استفاده می‌شود. این نوع از زباله سوزها دارای دو نوع محفظه می‌باشند. محفظه اولیه از یک تیوب استوانه‌ای نسوز تشکیل شده است. جابجایی استوانه بر روی محورش حرکت زباله را تسهیل می‌کند. در محفظه اولیه، بخشی از جامد به گاز تبدیل می‌شود. وجود محفظه ثانویه به منظور تکمیل فرآیندهای احتراقی فاز گازی، ضروری می‌باشد. تکه‌های سرباره سوخته نشده نیز از انتهای استوانه خارج می‌شوند. خاکستر حاصل از فرآیند احتراق به درون آتشدان می‌ریزد، اما با این وجود ذرات بسیاری به همراه گازهای داغ وارد محیط می‌شوند. به همین دلیل این ذرات به همراه گازهای حاصل دوباره در مکانی دیگر سوزانده می‌شوند.

### ۳-۱-۴) زباله سوز با بستر روان

در این نوع از زباله سوزها یک جریان هوای قوی از یک بستر شنی می‌وزد. هوا از میان شن‌ها نفوذ می‌کند تا به نقطه‌ای برسیم که ذرات شن از هم جدا شده و به هوا اجازه عبور دهند و اختلاط انجام پذیرد. بنابراین یک بستر روان ایجاد شده و اکنون می‌توان سوخت و زباله را وارد زباله سوز نمود. سپس شن به همراه زباله یا سوخت به صورت معلق بر روی جریان هوای پمپاژی قرار گرفته و نقش سیال به خود می‌گیرد. بدین صورت بستر به صورت شدیدی درهم آمیخته و در حرکت است و ذرات کوچک ساکن و هوا را به شکل یک سیال نگه می‌دارد. این کار باعث می‌شود که تمامی جرم زباله، سوخت و شن کاملاً درون کوره در حرکت باشند.

### ۳-۲) گرمای احتراق

گرمای احتراق  $\Delta H_c^0$  انرژی آزاد شده به شکل حرارت است که از احتراق کامل یک مول از یک مخلوط با اکسیژن به دست می‌آید. واکنش‌های شیمیایی انجام گرفته عمدتاً واکنش هیدروکربن‌ها

با اکسیژن است که منجر به تولید دی‌اکسید کربن، آب و گرما می‌شود. گرمای حاصله را می‌توان توسط روش‌های زیر توصیف نمود:

- هر مول سوخت / واحد انرژی (ژول) یا  $J/mol$
- واحد جرم سوخت / واحد انرژی (ژول) یا  $J/kg$
- واحد حجم سوخت / واحد انرژی (ژول) یا  $J/m^3$

گرمای حاصل از احتراق به صورت رایج معمولاً توسط بمب کالریمتر اندازه‌گیری می‌شود. همچنین می‌توان این گرما را به صورت اختلاف بین گرمای شکل‌گیری  $\Delta_f H^0$  محصولات و واکنش‌گرها در نظر گرفت.

### ۳-۳ ارزش حرارتی

ارزش حرارتی یا ارزش کالریکی یک ماده، معمولاً سوخت یا غذا، مقدار حرارتی است که حین احتراق مقدار مشخصی از ماده آزاد می‌شود. ارزش کالریکی یکی از مشخصات هر ماده است که معمولاً به صورت واحد انرژی بر واحد ماده (معمولاً جرم) اندازه‌گیری می‌شود، به عنوان مثال:  $kJ/kg$ ،  $kcal/kg$ ،  $J/mol$  و  $BTU/m^3$ . ارزش حرارتی معمولاً توسط بمب کالریمتر معین می‌شود. گرمای احتراق سوخت‌ها معمولاً به صورت‌های  $HHV$ ،  $LHV$ ، و یا  $GHV$  بیان می‌شوند.

- کمیتی که به عنوان ارزش حرارتی بالاتر شناخته می‌شود، به نحوی تعیین می‌شود که بتوان تمامی محصولات احتراق را به دمای حالت اصلی قبل از احتراق رساند و همچنین بتوان همه بخار تولید شده را تقطیر نمود. این مقدار در واقع همان گرمای احتراق ترمودینامیکی است زیرا اختلاف آنتالپی واکنش با فرض یکسان بودن دمای محصولات احتراق و مواد اولیه محاسبه می‌شود و همچنین فرض می‌شود که تمامی آب تولید شده در واکنش مایع است.

- کمیتی که به عنوان ارزش حرارتی پایین تر<sup>۷</sup> شناخته می شود، از تفریق گرمای تبخیر آب از ارزش حرارتی بالاتر بدست می آید. در واقع در اینجا فرض می شود که همه آب تولیدی به صورت بخار است. بنابراین انرژی مورد نیاز برای تبخیر آب در اینجا حساب نمی شود.
  - ارزش حرارتی کلی<sup>۸</sup> (AR) را ملاحظه نمائید، در این حالت فرض بر این است که آب در در محصولات احتراق به شکل بخار است اما قبل از احتراق مقداری آب را در سوخت در نظر می گیرد. این مقدار برای سوخت هایی نظیر چوب و زغال سنگ اهمیت دارد زیرا این سوخت ها معمولاً قبل از احتراق دارای مقادیری آب می باشند
- یک روش رایج برای مرتبط نمودن HHV به LHV رابطه زیر است:

$$HHV = LHV + h_v \times \left( \frac{\eta_{H_2O, out}}{\eta_{fuel, in}} \right) \quad (1-3)$$

در رابطه فوق  $h_v$  گرمای تبخیر آب است،  $\eta_{H_2O, out}$  تعداد مول آب تبخیر شده است و  $\eta_{fuel, in}$  تعداد مول سوخت محترق شده است [۷].

در بسیاری از فرآیندهای احتراق بخار آب تولید شده مورد استفاده قرار نمی گیرد و لذا گرمای تبخیر آن تلف می شود. در چنین کاربردهایی، ارزش حرارتی پایین تر به کار می رود. خصوصاً این موضوع بیشتر در مورد گاز طبیعی صادق است زیرا محتوی بسیار زیاد هیدروژن گاز طبیعی منجر به تولید آب بیشتری می شود. ارزش حرارتی بالاتر بیشتر به گاز سوخته شده در بویلرهای تقطیری و نیروگاه هایی مربوط است که در آنها بخار آب تولید شده در فرآیند احتراق، تقطیر می شود و لذا گرمای آن بازیابی می شود.

هر دوی HHV و LHV را می توان بر حسب AR (همه رطوبت جمع آوری شده)، MF و MAF (تنها آب ناشی از احتراق هیدروژن)، توصیف نمود. AR، MF و MAF اغلب برای تعیین ارزش حرارتی زغال سنگ به کار می روند:

- AR: نشانگر این است که ارزش حرارتی سوخت با احتساب تمامی رطوبت و خاکستر تشکیل دهنده مواد سوختی محاسبه شده است
- MF: نشانگر این است که ارزش حرارتی سوخت پس از خشک نمودن سوخت و البته با احتساب خاکستر همراه آن محاسبه شده است
- MAF: نشانگر این است که ارزش حرارتی سوخت در غیاب رطوبت و خاکستر همراه سوخت محاسبه شده است

### ۳-۴) محاسبات پایه مربوط به بازیافت انرژی از زباله

حدود ارزش گرمایی اجزای زباله بر اساس مراجع علمی در جدول زیر ذکر شده است:

جدول (۳-۱): حدود ارزش گرمایی و رطوبت اجزای زباله در حالت طبیعی و مرطوب [۱۳] و [۱۴]

جزء	حدود ارزش گرمایی <i>kJ / kg</i>	حدود رطوبت (%)	ارزش گرمایی منتخب <i>kJ / kg</i>	درصد رطوبت منتخب
کاغذ	۱۱۶۰۰ - ۱۸۶۰۰	۴ - ۲۳	۱۶۰۰۰	۱۵
مقوا	۱۳۹۰۰ - ۱۷۵۰۰	۵ - ۱۷	۱۵۸۰۰	۱۲
پلاستیک نرم	۲۷۹۰۰ - ۳۴۸۰۰	۲ - ۲۶	۳۰۶۰۰	۱۲

۱۲	۳۶۶۰۰	۲-۲۶	۳۲۰۰۰-۳۸۵۰۰	پلاستیک سخت
۵	۲۳۲۰۰	۲-۱۰	۲۰۹۰۰-۲۷۹۰۰	لاستیک
۱۹	۱۶۱۰۰	۱۰-۲۸	۱۵۱۰۰-۱۸۶۰۰	منسوجات
۷۰	۶۰۰۰	۳۸-۸۰	۳۵۰۰-۷۰۰۰	بقایای غذایی
۲۰	۱۵۳۰۰	۱۲-۵۰	۵۰۰۰-۱۷۲۰۰	چوب
۵۰	۶۸۰۰	۴۰-۶۰	۲۳۰۰-۱۸۶۰۰	زائدات باغبانی

میانگین درصد عناصر موجود در اجزای زباله در جدول زیر موجود بوده و به عنوان پیش فرض در برنامه استفاده می‌شود.

جدول (۲-۳): رطوبت و عناصر شیمیایی اجزای موجود در زباله [۱۳]

درصد وزنی بر اساس وزن مرطوب							
جزء	رطوبت	کربن	هیدروژن	اکسیژن	نیتروژن	گوگرد	خاکستر
کاغذ	۱۵	۳۷	۴,۹	۳۷,۶	۰,۱۱	۰,۲	۵,۱۹
مقوا	۱۲	۳۸,۷	۵,۲	۳۹,۲	۰,۲۶	۰,۱۸	۴,۴۶
پلاستیک نرم	۱۲	۶۴,۴	۱۰,۵	۶,۴	۰,۳۵	۰,۰۵	۶,۳
پلاستیک سخت	۱۲	۷۲	۱۱,۷	۱,۱۲	۰,۱	۰,۱	۲,۹۸
لاستیک	۵	۶۶,۲	۸,۳	-	۱,۹	۱,۵	۱۷,۱
منسوجات	۱۹	۴۴,۷	۴,۷	۲۵,۹	۴,۴	۰,۱	۱,۲
بقایای غذایی	۷۰	۱۴,۸	۲,۲	۹,۷	۰,۶۸	۰,۱۲	۲,۵

۲,۳۱	۰,۱	۰,۶۹	۳۱,۹	۴,۸	۴۰,۲	۲۰	چوب
۲,۲۵	۰,۱۵	۱,۷	۱۹	۳	۲۳,۹	۵۰	زائدات باغبانی

برای تخمین ارزش گرمایی اجزای زباله، با کمک فرمول دیولانگ از نتایج آنالیز شیمیایی آنها استفاده می‌شود [۱۳]:

$$HHV = 337.8C + 1418.8(H - \frac{1}{8}O) + 93S + 23.2N \quad (2-3)$$

ارزش گرمایی بر حسب  $kJ/kg$  محاسبه می‌شود.

در رابطه فوق  $C$ : درصد کربن،  $H$ : درصد هیدروژن،  $O$ : درصد اکسیژن،  $N$ : درصد نیتروژن و  $S$  درصد گوگرد است.

در محاسبات برآورد انرژی برای محاسبه ارزش گرمایی ناخالص زباله از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$HHV_{MSW} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{HHV_i \cdot p_i}{100} \right) \quad (3-3)$$

در رابطه فوق  $HHV_{MSW}$  بیانگر ارزش گرمایی ناخالص در حالت مرطوب است. در رابطه فوق داریم:

$p_i$ : درصد جزء  $i$  در کل زباله

$HHV_i$ : ارزش گرمایی جزء  $i$  در حالت مرطوب ( $kJ/kg$ )

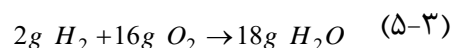
$n$ : تعداد اجزای سوختنی موجود در زباله

همانگونه که گفته شد، ارزش گرمایی توسط کاربر وارد شده یا از مقادیر پیش فرض استفاده می‌شود. انرژی ناخالص یا انرژی اولیه زباله عبارت است از جرم زباله دریافت شده ضرب در ارزش گرمایی ناخالص آن. اما در عمل تنها بخشی از این انرژی قابل بازیافت است. زیرا بخشی از آن صرف تبخیر رطوبت موجود در زباله می‌شود، بخش دیگری از آن صرف تبخیر آبی می‌شود که در اثر واکنش احتراق پدید می‌آید و مقداری از انرژی گرمایی نیز در اثر تلفات کوره هدر می‌رود. با کسر این انرژی‌های غیر مفید از انرژی اولیه، انرژی مفید زباله که می‌تواند بازیافت شود، بدست می‌آید.

گرمای لازم برای تبخیر رطوبت موجود در زباله از حاصل ضرب گرمای نهان تبخیر آب در درصد وزنی جزء  $i$ ، در درصد رطوبت آن جزء بدست می‌آید. گرمای نهان تبخیر آب  $2595 \text{ kJ/kg}$  فرض می‌شود [۱۳].

$$\Delta Q_1 = 2595 \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100} \cdot \frac{w_i}{100} \quad (4-3)$$

برای محاسبه گرمای لازم برای تبخیر آب بوجود آمده در واکنش احتراق، باید توجه نمود که هیدروژن موجود در اجزای زباله بر اساس واکنش زیر با اکسیژن ترکیب شده و ۹ برابر جرم خود آب تولید می‌کند.



با توجه به گرمای نهان تبخیر آب، گرمای لازم برای تبخیر این مقدار آب از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta Q_2 = 2595 \sum_{i=1}^n 9 \left( \frac{p_i}{100} \right) \left( \frac{H_i}{100} \right) \quad (6-3)$$

تلفات گرمایی مربوط به کوره توسط راندمان زباله سوز مطرح می‌شود که در فصل ۵ و حین آنالیز چرخه‌های تولید توان مقدار آن مشخص شده است و در اینجا اثر آن را منظور نمی‌کنیم.

مطابق با تعاریف،  $LHV$  با کسر مقادیر انرژی مورد نیاز تبخیر آب از  $HHV$  بدست می‌آید. لذا چنانچه مقادیر  $\Delta Q_1$  و  $\Delta Q_2$  را از  $HHV_{MSW}$  کم کنیم، مقدار  $LHV$  ( $HHV_{net}$ ) یا همان ارزش حرارتی پایین‌تر حاصل می‌شود که در محاسبات حرارتی به عنوان انرژی مفید ورودی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین:

$$HHV_{net} = HHV_{MSW} - \Delta Q_1 - \Delta Q_2 \quad (7-3)$$

لذا انرژی مفید زباله از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$E_{net} = m_{MSW} \cdot HHV_{net} \quad (8-3)$$

در رابطه فوق  $m_{MSW}$  جرم زباله دریافتی در واحد ( $kg/day$ ) زمان است.

چنانچه واحد زباله سوز همراه با بویلر نیروگاهی و توربین بخار باشد، انرژی برق قابل تولید با توجه به انرژی مفید قابل برآورد است:

$$E_{Electric} = E_{net} \cdot \eta_{Electric} \quad (9-3)$$

در رابطه فوق  $\eta$  بازدهی تولید برق در نیروگاه است.

اکنون ارزش حرارتی زباله مورد استفاده در زباله سوز چرخه تولید توان ارائه شده در فصل ۵ را محاسبه می‌کنیم:

مخبر پارس پترولیم

ترکیب اجزای زباله بر حسب مواد شیمیایی تشکیل دهنده آن به صورت زیر گزارش شده است  
[۱۹]:

جدول (۳-۳): ترکیب اجزای زباله مورد استفاده در زباله سوز چرخه مورد بررسی بر حسب مواد شیمیایی

مجزا

اجزای زباله	درصد وزنی
رطوبت	۳۷
کربن	۲۷,۲۱
هیدروژن	۳,۸۸
اکسیژن	۲۳,۴۵
نیتروژن	۰,۷۲
گوگرد	۰,۰۳
خاکستر	۷
کلر	۰,۷۱

به کمک فرمول دیولانگ:

$$HHV = 337.8C + 1418.8\left(H - \frac{1}{8}O\right) + 93S + 23.2N$$
$$\Rightarrow HHV = 337.8 * 27.21 + 1418.8 * \left(3.88 - \frac{23.45}{8}\right) + 93 * 0.03 + 23.2 * 0.72$$
$$\Rightarrow HHV = 10557.2 \text{ kJ/kg}$$

با کسر مقدار انرژی مورد نیاز جهت تبخیر رطوبت موجود از مقدار فوق ارزش حرارتی مفید زباله‌ها بدست می‌آید. قابل ذکر است که در فرمول دیولانگ اثر تبخیر رطوبت ایجاد شده توسط هیدروژن موجود، حین فرآیند احتراق منظور شده است. بنابراین:

$$\Delta Q_1 = 2595 * \left(\frac{H_2O}{100}\right) = 2595 * 0.37 = 960.15 \text{ kJ/kg}$$
$$HHV_{net} = HHV - \Delta Q_1 \Rightarrow HHV_{net} = 10557.2 - 960.15 = 9597.05 \text{ kJ/kg} \cong 9.6 \text{ MJ/kg}$$

در آنالیز چرخه‌های توان در فصل ۵، عدد فوق به عنوان ارزش حرارتی مفید موجود در زباله در نظر گرفته شده است.

### ۳-۵) ارائه یک برنامه کامپیوتری جهت محاسبه ارزش حرارتی زباله

جهت نوشتن برنامه ۲ حالت در نظر می‌گیریم:

۱- ترکیب فیزیکی اجزای زباله معلوم باشد

۲- ترکیب شیمیایی اجزای زباله معلوم باشد

۱- چنانچه ترکیب فیزیکی اجزای زباله معلوم باشد:

مهمترین اجزای فیزیکی قابل سوختن زباله شامل ۹ ماده می‌شود که عبارتند از: کاغذ، مقوا، پلاستیک نرم، پلاستیک سخت، لاستیک، منسوجات، بقایای غذایی، چوب و زائدات باغی (معادل انگلیسی این لغات در مقاله موجود است)

ورودی‌ها:

- ارزش حرارتی هر جزء:  $HHV_i$
- درصد جرمی رطوبت موجود در هر جزء:  $w_i$
- درصد جرمی هر جزء در کل زباله:  $p_i$
- درصد هیدروژن موجود هر جزء:  $H$
- جرم زباله دریافتی در هر روز:  $m_{MSW}$

برنامه باید ورودی‌های فوق را از کاربر گرفته و مقادیر زیر را محاسبه کند:

$$HHV_{net}, \Delta Q_2, \Delta Q_1, HHV_{MSW}$$

۲- چنانچه ترکیب شیمیایی اجزای زباله معلوم باشد:

مهمترین اجزای شیمیایی قابل سوختن زباله شامل عناصر کربن، هیدروژن، اکسیژن، گوگرد، نیتروژن و رطوبت می‌باشد.

ورودی‌ها:

- درصد کل کربن موجود در زباله:  $C$

- درصد کل هیدروژن موجود در زباله:  $H$
- درصد کل اکسیژن موجود در زباله:  $O$
- درصد کل گوگرد موجود در زباله:  $S$
- درصد کل نیتروژن موجود در زباله:  $N$
- درصد کل رطوبت موجود در زباله:  $H_2O$
- جرم زباله دریافتی در هر روز:  $m_{MSW}$

برنامه باید ورودی‌های فوق را از کاربر گرفته و با استفاده از فرمول دیولانگ مقدار  $HHV_{MSW}$  را محاسبه کند. همچنین سایر مقادیر دیگر نیز مشابه آنچه پیشتر توضیح داده شد محاسبه می‌شوند. قابل ذکر است که مقدار زباله دریافتی به صورت پیش فرض ۱۶۰۰۰ کیلوگرم در هر روز در نظر گرفته شده است.

پایان  
پژوهش

<https://t.me/tephd>

```
clear
clc

SS=input('Phisycal--> 1 or Chemical---> 2');
switch SS
    case 1

        name='Paper Inputs';
        prompt={'Heating Value (Kj/Kg)', 'Weight Percent (%)', 'Humidity Content Percent (%)', 'Hydrogen Content Percent (%)'};
        numlines=1;
        defaultanswer={'16000', '4.23', '15', '4.9'};
        AA(1, [1:4])=str2double(inputdlg(prompt, name, numlines, defaultanswer));

        name='Cardboard Inputs';
        prompt={'Heating Value (Kj/Kg)', 'Weight Percent (%)', 'Humidity Content Percent (%)', 'Hydrogen Content Percent (%)'};
        numlines=1;
        defaultanswer={'15800', '4.31', '12', '5.2'};
        AA(2, [1:4])=str2double(inputdlg(prompt, name, numlines, defaultanswer));

        name='Soft Plastic Inputs';
        prompt={'Heating Value (Kj/Kg)', 'Weight Percent (%)', 'Humidity Content Percent (%)', 'Hydrogen Content Percent (%)'};
        numlines=1;
        defaultanswer={'30600', '2.69', '12', '10.5'};
        AA(3, [1:4])=str2double(inputdlg(prompt, name, numlines, defaultanswer));

        name='Hard Plastic Inputs';
        prompt={'Heating Value (Kj/Kg)', 'Weight Percent (%)', 'Humidity Content Percent (%)', 'Hydrogen Content Percent (%)'};
        numlines=1;
        defaultanswer={'36600', '2.69', '12', '11.7'};
        AA(4, [1:4])=str2double(inputdlg(prompt, name, numlines, defaultanswer));

        name='Rubber Inputs';
        prompt={'Heating Value (Kj/Kg)', 'Weight Percent (%)', 'Humidity Content Percent (%)', 'Hydrogen Content Percent (%)'};
        numlines=1;
        defaultanswer={'23200', '0.32', '5', '8.3'};
        AA(5, [1:4])=str2double(inputdlg(prompt, name, numlines, defaultanswer));

        name='Tissue Inputs';
        prompt={'Heating Value (Kj/Kg)', 'Weight Percent (%)', 'Humidity Content Percent (%)', 'Hydrogen Content Percent (%)'};
```

<https://t.me/tephd>

```
numlines=1;
defaultanswer={'16100','3.71','19','4.7'};
AA(6,[1:4])=str2double(inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer));

name='Food Waste Inputs';
prompt={'Heating Value (Kj/Kg)','Weight Percent (%)','Humidity Content
Percent (%)','Hydrogen Content Percent (%)'};
numlines=1;
defaultanswer={'6000','68.7','70','2.2'};
AA(7,[1:4])=str2double(inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer));

name='Wood Inputs';
prompt={'Heating Value (Kj/Kg)','Weight Percent (%)','Humidity Content
Percent (%)','Hydrogen Content Percent (%)'};
numlines=1;
defaultanswer={'15300','2','20','4.8'};
AA(8,[1:4])=str2double(inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer));

name='Yard Waste Inputs';
prompt={'Heating Value (Kj/Kg)','Weight Percent (%)','Humidity Content
Percent (%)','Hydrogen Content Percent (%)'};
numlines=1;
defaultanswer={'6800','0.6','50','3'};
AA(9,[1:4])=str2double(inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer));

HHV_msw=0;
for ii=1:9
    HHV_msw=HHV_msw+AA(ii,1)*AA(ii,2)/100;
end
HHV_msw;

Delta_Q_1=0;
for ii=1:9
    Delta_Q_1=Delta_Q_1+2595*AA(ii,2)*AA(ii,3)/100/100;
end
Delta_Q_1;

Delta_Q_2=0;
for ii=1:9
    Delta_Q_2=Delta_Q_2+2595*9*AA(ii,2)*AA(ii,4)/100/100;
end
Delta_Q_2;

HHV_Net=HHV_msw-Delta_Q_1-Delta_Q_2;
```

<https://t.me/tephd>

```
fprintf('HHV_msw=%7.2f (Kj / Kg)\t\n Delta_Q1= %7.2f (Kj / Kg)\t\n
Delta_Q2= %7.2f (Kj / Kg)\t\n HHV_Net=%7.2f (Kj / Kg)
\n\n',HHV_msw,Delta_Q_1,Delta_Q_2,HHV_Net)
case 2
name='Chemical Inputs';
prompt={'Carbon Percent','Hydrogen Percent','Oxygen Percent','Sulfur
Percent',...
'Nitrogen Percent','Humidity Percent'};
numlines=1;
defaultanswer={'27.21','3.88','23.45','0.71','0.03','37'};
BB=str2double(inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer));

HHV_msw=337.8*BB(1) + 1418.8*(BB(2)-1/8*BB(3)) + 93*BB(4) + 23.2*BB(5);
Delta_Q1=2595*BB(6)/100;
HHV_Net=HHV_msw-Delta_Q1;
fprintf('HHV_msw=%7.2f (Kj / Kg)\t\n Delta_Q1= %7.2f (Kj / Kg)\t\n
HHV_Net=%7.2f (Kj / Kg) \n\n',HHV_msw,Delta_Q1,HHV_Net)
end

name='Enterance Garbage Capacity';
prompt={'Enterance Garbage Capacity (Kg/day)'}
numlines=1;
defaultanswer={'16000'};
M_Dot=str2double(inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer));

E_Net=M_Dot*HHV_Net;
fprintf('\nE_Net= %7.2f (Kj)\n\n',E_Net)
```

نتایج آنالیز فیزیکی زباله شهر تهران در خرداد ماه ۱۳۷۸ در قالب میانگین درصد اجزاء به صورت پیش فرض برنامه در نظر گرفته شده‌اند که عبارتند از [این اطلاعات از پژوهشکده انرژی و محیط

زیست پژوهشگاه نیرو اقتباس شده است]:

- کاغذ: ۴,۲۳٪

- مقوا: ۴,۳۱٪

- پلاستیک نرم: ۲,۶۹٪

- پلاستیک سخت: ۲,۶۹٪

- لاستیک: ۰,۳۲

- منسوجات: ۳,۷۱

- زائدات غذایی: ۶۸,۷٪

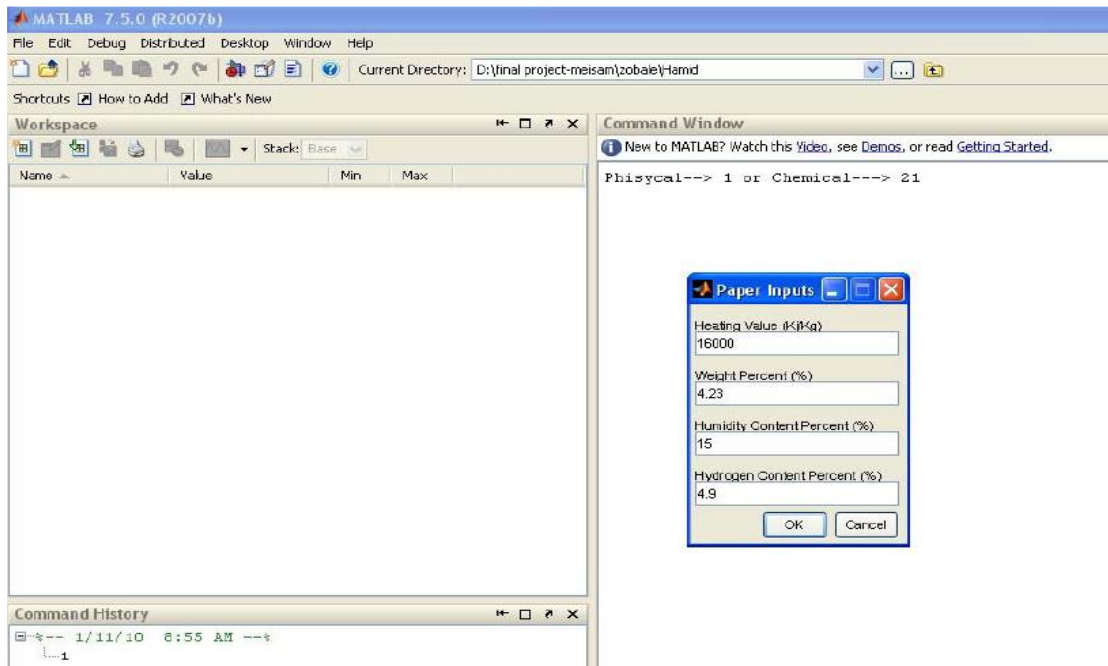
- چوب: ۰,۲٪

- زائدات باغی: ۰,۶٪

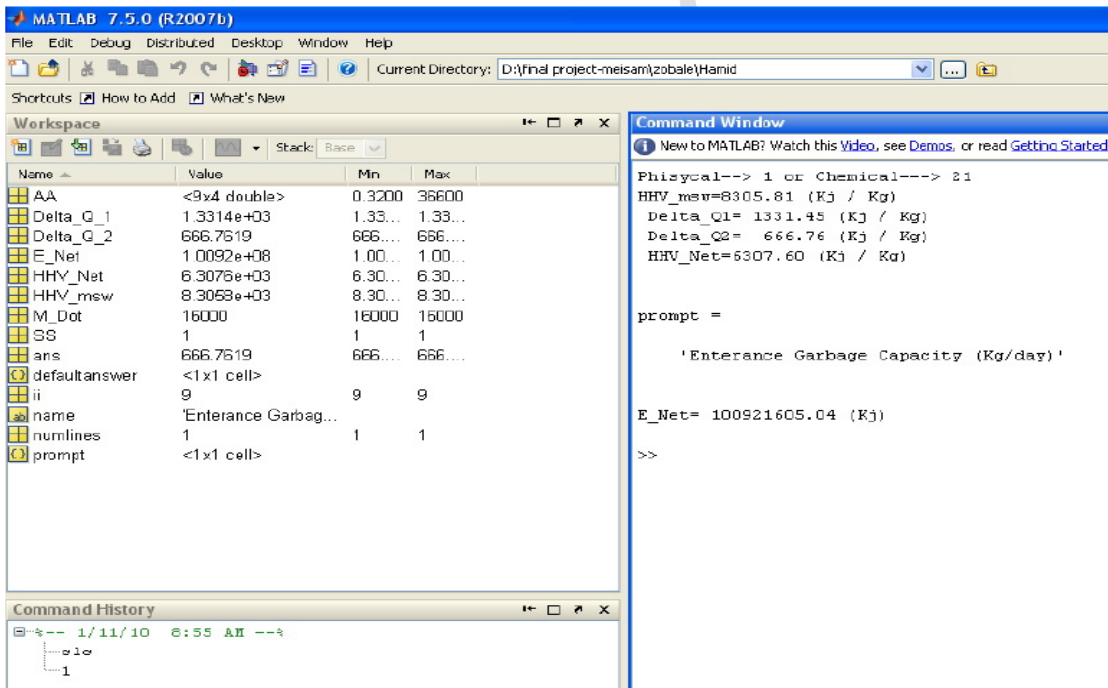
نتایج حاصل از اجرای برنامه:

در صورت ورود اجزای فیزیکی زباله، شکل‌های (۱-۳) و (۲-۳) به ترتیب ورود داده‌ها و نتایج محاسبات را نشان می‌دهند (داده‌های وارد شده متعلق به آنالیز فیزیکی زباله شهر تهران در سال ۱۳۷۸ می‌باشند).

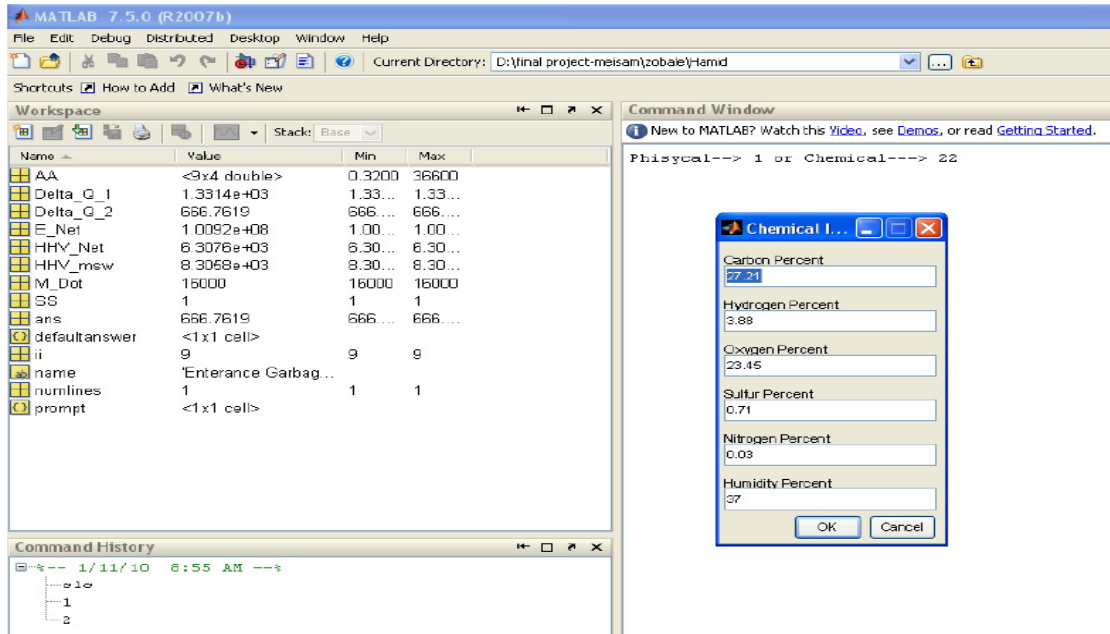
همچنین در صورت ورود اجزای شیمیایی زباله، شکل‌های (۳-۳) و (۴-۳) به ترتیب ورود داده‌ها و نتایج محاسبات را نشان می‌دهند (داده‌های وارد شده متعلق به آنالیز شیمیایی زباله کشور ژاپن می‌باشند).



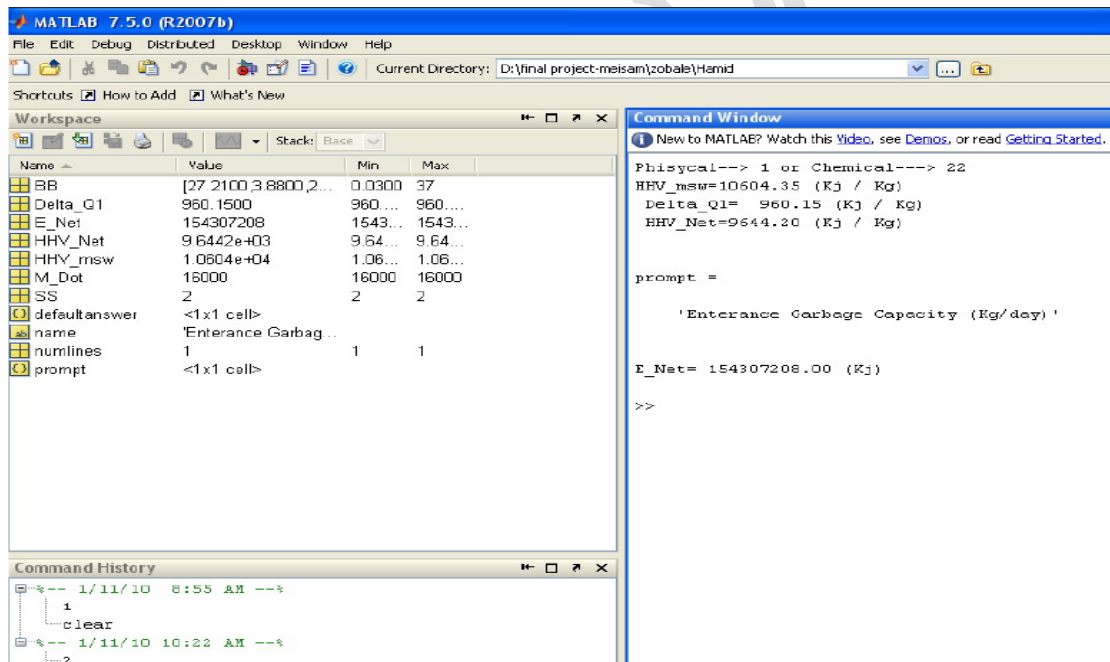
شکل (۳-۱): نحوه وارد کردن اطلاعات در برنامه در حالت معلوم بودن ترکیب فیزیکی زباله



شکل (۳-۲): نحوه نمایش نتایج محاسبات در حالت معلوم بودن ترکیب فیزیکی زباله



شکل (۳-۳): نحوه وارد کردن اطلاعات در برنامه در حالت معلوم بودن ترکیب شیمیایی زباله



شکل (۴-۳): نحوه نمایش نتایج محاسبات در حالت معلوم بودن ترکیب شیمیایی زباله

## فصل ۴: مقدمه‌ای بر گاز طبیعی مایع شده<sup>۳۲</sup>

### مقدمه

گاز طبیعی مایع شده همان گاز طبیعی است که تا نقطه‌ای سرد شده که به مایع تبدیل می‌شود، که این اتفاق در دمای تقریباً  $161^{\circ}C$  ( $-256^{\circ}F$ ) و در فشار اتمسفر رخ می‌دهد. مایع سازی تقریباً ۶۰۰ برابر حجم را کاهش می‌دهد و بنابراین انتقال گاز مایع میان کشورها از طریق مخازن دریایی مخصوص را بسیار اقتصادی می‌کند و این در حالی است که سیستم‌های انتقال از طریق خط لوله‌های مرسوم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و همچنین ممکن است به لحاظ فنی یا سیاسی قابل اجرا نباشد. بنابراین تکنولوژی گاز مایع باعث می‌شود که گاز طبیعی در سراسر دنیا در دسترس باشد. برای اینکه بتوان LNG را در کشوری شبیه آمریکا در دسترس داشت، شرکت های انرژی می‌بایست در زمینه تعداد زیادی از فعالیت‌های متفاوت سرمایه گذاری کنند که بسیار به هم مربوط و وابسته می‌باشند [۱۵] و [۱۶].

مراحل اصلی زنجیره ارزشی LNG، صرف نظر از عملکرد خطوط لوله در میان مراحل، شامل موارد ذیل می‌باشد:

- **اکتشاف<sup>۳۳</sup> برای یافتن گاز طبیعی در پوسته زمین و استخراج گاز برای تحویل به مصرف کنندگان.** در اغلب موارد گاز طبیعی حین جستجو برای نفت یافت شده است.

- **مایع سازی<sup>۳۴</sup> برای تبدیل گاز طبیعی به حالت مایع به طوریکه بتواند توسط کشتی منتقل شود.**

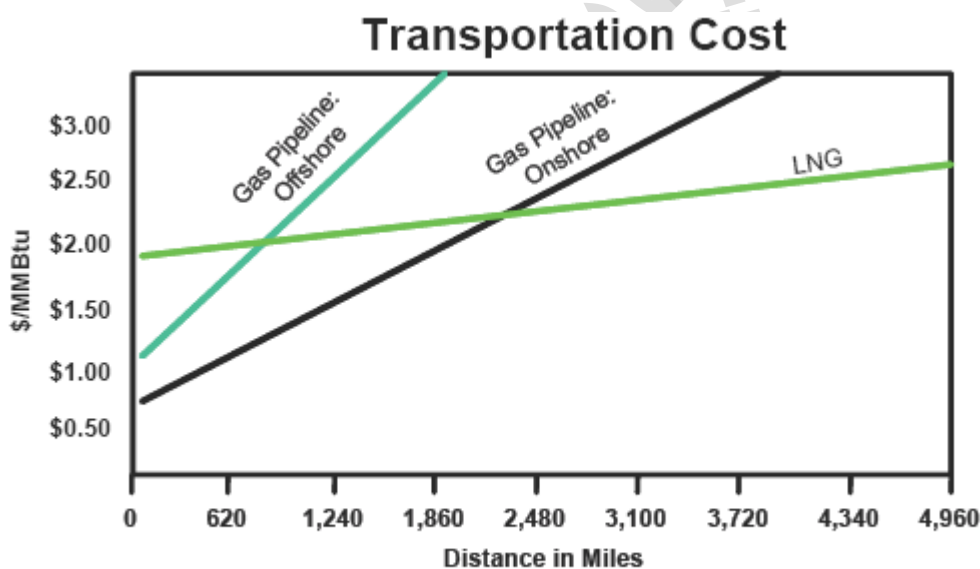
- **حمل LNG<sup>۳۵</sup> در مخازن طراحی شده خاص**

- **ذخیره سازی و تبدیل دوباره به حالت گازی<sup>۳۶</sup> برای تبدیل LNG ذخیره شده موجود در تانک‌های ذخیره سازی مخصوص از فاز مایع به فاز گازی جهت انتقال به مقصد نهایی از طریق خطوط لوله گاز طبیعی.**

مایع سازی همچنین فرصت ذخیره گاز طبیعی برای استفاده حین دوره‌های مصرف بالا در مناطقی را فراهم می‌کند که به لحاظ زمین شناسی برای توسعه تاسیسات ذخیره سازی زیرزمینی مناسب نیستند. در مناطق شمال شرقی آمریکا، که منطقه‌ای فاقد تاسیسات ذخیره سازی زیرزمینی است، LNG بخش حیاتی تامین گاز این مناطق حین دوره‌های سرمای ناگهانی است. در مناطقی که احداث خط لوله از نقاط تامین بسیار گران بوده و استفاده از گاز به شدت فصلی می‌باشد، مایع سازی و ذخیره LNG در خلال دوره های مینیمم بار و به منظور کاستن هزینه های سنگین احداث خط لوله در خلال دوره‌های پیک انجام می‌گیرد.

۴-۱) آیا LNG یک منبع قابل رقابت با گاز طبیعی می‌باشد؟

مخازن بزرگی از گاز طبیعی در مناطقی وجود دارد که بازار داد و ستد قابل توجهی در آنجا وجود ندارد. چنین مخازن هیدروکربنی در شمال آفریقا، غرب آفریقا، آمریکای جنوبی، دریای کارائیب، خاور میانه، اندونزی، مالزی، شمال غرب استرالیا و آلاسکا وجود دارد. مقداری از گاز طبیعی در همین نواحی مایع می‌شود تا به مناطقی حمل شود که میزان مصرف گاز طبیعی آنها بیش از تولیدات داخلی خودشان می‌باشد. چنین بازارهایی شامل ژاپن، تایوان، کره، اروپا و آمریکا می‌باشد. شکل (۱-۴) نشان می‌دهد که چنانچه فاصله‌ای که گاز طبیعی می‌بایست از طریق آن منتقل شود افزایش یابد، استفاده از LNG اقتصادی‌تر می‌باشد. مایع سازی گاز طبیعی و حمل آن از طریق دریا در مقایسه با انتقال گاز طبیعی از طریق خط لوله‌های دریایی با فواصل بیشتر از ۷۰۰ مایل و یا خط لوله‌های واقع در خشکی با فواصل بیش از ۲۲۰۰ مایل، ارزان‌تر می‌شود.



Source: Institute of Gas Technology.

شکل (۱-۴): هزینه‌های انتقال گاز طبیعی بر حسب نوع انتقال

توسعه LNG خصوصاً برای کشورهای نظیر نیجریه و آنگولا حائز اهمیت است. در این کشورها بیشتر گازی که به همراه نفت خام تولید می‌گردد می‌سوزد، چرا که جایگزین‌های کمی برای مصرف گاز اضافی وجود دارد.<sup>۳۶</sup>

#### ۲-۴) تاریخچه مختصری از LNG

تاریخچه مایع سازی گاز طبیعی به قرن نوزدهم میلادی و به زمانی بر می‌گردد، که شیمی دان و فیزیک دان انگلیسی میشل فاراده<sup>۳۷</sup> آزمایش‌هایی برای مایع سازی انواع مختلف گازها از جمله گاز طبیعی انجام داد. مهندس آلمانی کارل ون لینده<sup>۳۸</sup> اولین دستگاه تبرید کمپرسوری عملی را در سال ۱۸۷۳ در مونیخ ساخت. اولین مجتمع LNG در سال ۱۹۱۲ در ویرجیانای جنوبی ساخته شد و در سال ۱۹۱۷ شروع به کار نمود. اولین مجتمع LNG با مقیاس تجاری در کلوندا اهایو<sup>۳۹</sup> در سال ۱۹۴۱ ساخته شد. LNG تولید شده در مخازنی تحت فشار اتمسفر ذخیره سازی شد. مایع سازی گاز طبیعی امکان انتقال آن به مقاصد دور دست را افزایش داد. در ژانویه ۱۹۵۹ اولین کشتی حامل LNG جهان، که شامل پنج مخزن ۷۰۰۰ پوندی (تقریباً ۳۲۰۰ کیلوگرم) آلومینیومی با ساپورت‌هایی از چوب درخت بالسا<sup>۴۰</sup> و عایق‌هایی از تخته‌های چند لایه و اورتان بود، یک محموله LNG را از دریاچه چارلز ایالت لویزیانا به مقصد جزیره کنوی انگلستان حمل کرد. این رویداد حکایت از آن داشت که مقادیر زیاد گاز طبیعی مایع می‌توانست با ایمنی زیادی در طول اقیانوس‌ها منتقل شود.

در طول ۱۴ ماه بعد هفت محموله دیگر LNG نیز با کمترین مشکلات ممکن به جزیره کنوی منتقل شد. در پی موفقیت عملکرد Methane Pioneer، سازمان گاز انگلستان اهداف خود را به

---

<sup>۳۶</sup> \$/MM Btu=dollars per million British thermal unit

<sup>۳۷</sup> Michael Faraday

<sup>۳۸</sup> Karl Von Linde

<sup>۳۹</sup> Cleveland, Ohio

<sup>۴۰</sup> Methane Pioneer

<sup>۴۱</sup> Balsa

<sup>۴۲</sup> Canvey

منظور اجرای پروژه تجاری واردات LNG از ونزوئلا به جزیره کنوی دنبال نمود. اما قبل از اینکه موافقت‌های تجاری نهایی شوند، مقادیر زیاد گاز طبیعی در لیبی و میدان بسیار بزرگ حسیرمیل<sup>۴۳</sup> در الجزایر کشف شد که فاصله آنها تا انگلستان نصف فاصله تا ونزوئلا بود. با شروع ۲۶۰ میلیون فوت مکعب در روز<sup>۴۴</sup> مجتمع آریزو<sup>۴۵</sup> یا مجتمع کامل<sup>۴۶</sup> انگلستان در سال ۱۹۶۴ بزرگترین وارد کننده LNG جهان شد و این در حالی بود که الجزایر نیز لقب بزرگترین صادر کننده را به خود گرفت.



شکل (۲-۴): ترمینال LNG جزیره کنوی انگلستان، اولین در دنیا

پس از اینکه جنبه‌های کاری LNG در انگلستان معین شد، مجتمع‌های مایع سازی و ترمینال‌های واردات دیگری در بخش‌های آتلانتیک<sup>۴۷</sup> و پسیفیک<sup>۴۸</sup> ساخته شد. در طول سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۸۰ چهار ترمینال دریایی در آمریکا ساخته شد. پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم دریافتی ۲۵۳BCF (میلیارد فوت مکعب)، در سال ۱۹۷۹ که نشانگر ۱,۳ درصد از نیاز گازی آمریکا می-باشد، واردات LNG روبه کاهش گذاشت زیرا مازاد گاز مصرفی در آمریکای شمالی افزایش یافت و

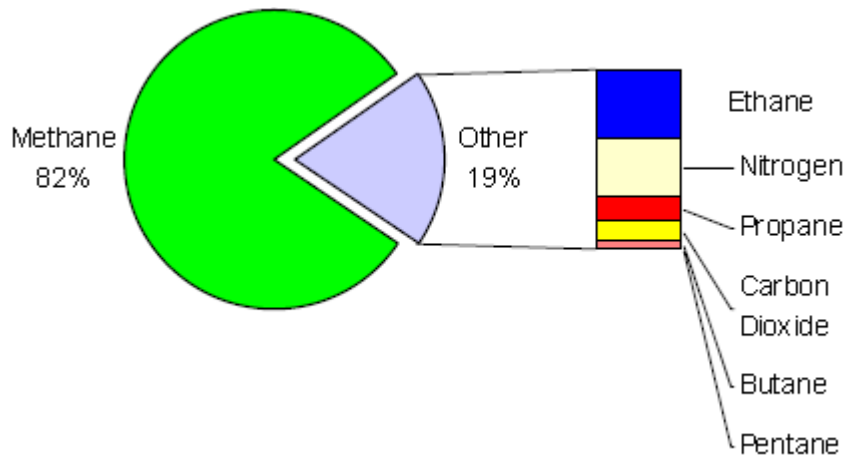
Hassi R' Mel<sup>۴۳</sup>  
mmcf<sup>۴۴</sup>  
Arzew GLAZ<sup>۴۵</sup>  
Camel<sup>۴۶</sup>  
Atlantic<sup>۴۷</sup>  
Pacific<sup>۴۸</sup>

مناقشه قیمتی با الجزایر (تنها تامین کننده گاز آمریکا در آن زمان) به وجود آمد. در نتیجه ترمینال‌های جزیره الباه<sup>۹</sup> و کوو پوینت<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۸۰ از کار باز ایستادند و ترمینال‌های دریاچه چارلز<sup>۱۱</sup> و اورت<sup>۱۲</sup> دچار بهره‌وری بسیار پایین شدند.

اولین صادرات LNG از آمریکا به آسیا در سال ۱۹۶۹ انجام شد که در آن LNG آلاسکا به ژاپن فرستاده شد. از آن زمان به بعد بازار LNG به سرعت هم در اروپا و هم در آسیا به رشد خود ادامه داد. در سال ۱۹۹۹ اولین مجتمع مایع سازی گاز طبیعی در حوزه آبی آتلانتیک در نیم کره غربی فعالیت خود را در ترینیداد آغاز کرد. این رویداد با افزایش تقاضای گاز طبیعی در آمریکا به منظور تولید توان همزمان شد، و افزایش قیمت گاز طبیعی در آمریکا منجر به تمایل جدید در بازار LNG آمریکا شد. در نتیجه دو ترمینال دریافتی LNG دوباره فعال شدند. جزیره الباه دوباره در سال ۲۰۰۱ فعال شد. در اکتبر ۲۰۰۲، کمیسیون تنظیم انرژی فدرال<sup>۱۳</sup> به منابع محلی اجازه داد تا تاسیسات LNG کوو پوینت را در سال ۲۰۰۳ بازگشایی کند.

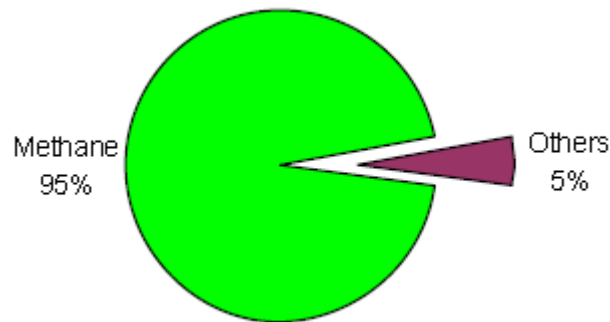
#### ۳-۴) ترکیبات گاز طبیعی و LNG

گاز طبیعی اصولاً از متان تشکیل شده است اما ممکن است از اتان، پروپان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر نیز تشکیل شده باشد. مقادیر کم نیتروژن، اکسیژن، دی اکسید کربن، ترکیبات سولفور و آب نیز ممکن است در گاز طبیعی وجود داشته باشند. شکل (۳-۴) ترکیبات گاز طبیعی را به صورت نمونه نشان می‌دهد:



شکل (۳-۴): ترکیبات گاز طبیعی

فرآیند مایع سازی نیازمند زدودن برخی ترکیبات غیر متانی از جمله آب و دی اکسید کربن از گاز طبیعی است تا هنگامی که گاز تا دمای LNG سرد می شود از جامد شدن آنها جلوگیری شود. در نتیجه مطابق شکی (۴-۴) LNG عمدتاً از متان تشکیل شده است:



شکل (۴-۴): ترکیبات LNG

LNG ماده ای بی بو، بی رنگ، غیر خورنده و غیر سمی است. با این وجود گاز حاصل از تبخیر LNG می تواند در محیط های محدود و تهویه نشده، باعث خفگی گردد.

## LNG Value Chain



شکل (۴-۵): زنجیره ارزشی LNG

- **اکتشاف و تولید:** طبق اعلام سازمان جهانی نفت، در سال ۲۰۰۱ مخازن اثبات شده جهانی گاز طبیعی ۵۹۱۹ تریلیون فوت مکعب اعلام شده که نسبت به سال ۲۰۰۰ رشد ۸,۴ درصدی را نشان می‌دهد و همچنان مخازن بیشتری از گاز در حال کشف می‌باشند. بیشتر این گاز طبیعی فاصله زیادی با بازار آن داشته و در کشورهای وجود دارد که نیازمند این مقادیر زیاد انرژی نمی‌باشند. مخازن گاز طبیعی آمریکا با رشد ۳,۴ درصدی در طول سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ به ۱۸۳ تریلیون فوت مکعب رسید. کشورهای تولید کننده عمده گاز طبیعی که آن را به صورت LNG به بازار جهانی می‌فروشند عبارتند از: الجزایر، اندونزی و قطر. کشورهای بسیار دیگری از جمله استرالیا، نیجریه و ترینیداد و توباگو نقش کمتر اما مهم و روبه رشدی را به عنوان تولید کنندگان گاز طبیعی و صادر کنندگان LNG بازی می‌کنند. کشورهای نظیر آنگولا و ونزوئلا در تلاش‌اند تا به ماکزیمم ظرفیت خود در بازار LNG دنیا دست یابند و کشورهای نظیر عربستان سعودی، مصر و ایران، که دارای مخازن بسیار گسترده گاز طبیعی می‌باشند نیز می‌توانند در زمره صادر کنندگان LNG قرار گیرند.
- **مایع سازی گاز طبیعی:** خوراک گاز مجتمع‌های مایع سازی از میادین تولید تامین می‌شود.

تقریباً ۸ تا ۱۰ درصد محتوی کل انرژی گاز طبیعی صرف مایع سازی آن می‌شود. موارد محدود کننده در گاز طبیعی تولید شده باید حذف شوند تا از یخ زدگی و آسیب تجهیزات به هنگام کاهش دما تا دمای LNG (۲۵۶- درجه فارنهایت) جلوگیری شود و در نقطه تحویل با مشخصات خطوط لوله همخوانی داشته باشد. فرآیند مایع سازی می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود تا LNG به متان تقریباً ۱۰۰ درصد پالایش شود. فرآیند مایع سازی شامل سرمایش خوراک گازی تمیز با استفاده از تبرید است. مجتمع مایع سازی ممکن است شامل چندین واحد موازی باشد که اصطلاحاً Trains نامیده می‌شود. با استفاده از مایع سازی گاز طبیعی حجم آن ۶۰۰ برابر کاهش می‌یابد که به این معنی است که LNG در دمای ۲۵۶- درجه فارنهایت به ۱/۶۰۰ فضای مورد نیاز همان مقدار گاز طبیعی در دمای اتاق و فشار اتمسفر نیاز دارد. LNG یک مایع کرایوجنیک است. ترم کرایوجنیک عموماً به دماهای پایین‌تر از ۱۰۰- درجه فارنهایت اطلاق می‌شود. همچنین LNG مایعی شفاف است که چگالی آن حدوداً ۴۵ درصد چگالی آب است. LNG در تانک‌های دو جداره و در فشار اتمسفر ذخیره می‌شود. تانک ذخیره سازی در واقع یک تانک درون تانک دیگر است. فضای حلقوی میان دیواره این دو تانک با عایق پر می‌شود. تانک درونی که در تماس با LNG می‌باشد از موادی ساخته می‌شود که برای کارهای کرایوجنیک و بارهای سازه‌ای LNG مناسب باشد. این مواد شامل فولاد با ۰.۹٪ نیکل، آلومینیوم و بتن پیش تنش دار شده می‌باشد. تانک خارجی معمولاً از کربن استیل یا بتن پیش تنش دار شده ساخته می‌شود.

- **حمل LNG به صورت دریایی:** تانک‌های LNG کشتی‌های دوجداره‌ای می‌باشند که به صورت خاصی طراحی و عایق کاری شده‌اند تا از نشتی و ترکیدگی در تصادفات جلوگیری شود. LNG در یک سیستم نگهداری خاص و در لایه درونی‌تر که فشار آن اتمسفریک و دمای آن ۲۵۶- درجه فارنهایت است ذخیره سازی می‌شود. سه نوع از سیستم‌های

نگهداری محموله LNG به عنوان سیستم‌های استاندارد مشخص شده‌اند که عبارتند از:

۱- طراحی کروی ۲- طراحی پوسته‌ای ۳- طراحی منشوری

در حال حاضر اغلب کشتی‌های LNG از تانک‌های کروی استفاده می‌کنند و این کشتی‌ها به

راحتی قابل شناسایی می‌باشند چون نیمه بالایی تانک‌ها در روی عرشه دیده می‌شوند:



شکل (۴-۶): یک کشتی حمل LNG

یک کشتی معمولی حمل LNG می‌تواند در حدود ۱۲۵۰۰۰ تا ۱۳۸۰۰۰ متر مکعب LNG را حمل کند که می‌تواند حدود ۲,۶ تا ۲,۸ میلیارد فوت مکعب گاز طبیعی را تامین کند. کشتی معمولی دارای ۹۰۰ فوت طول، ۱۴۰ فوت عرض می‌باشد و ارتفاع روی سطح آب آن ۳۶ فوت است و در حدود ۱۶۰ میلیون دلار قیمت دارد. اندازه این کشتی مشابه اندازه یک ناو هواپیمابر است، اما به طور قابل ملاحظه‌ای از حامل‌های بزرگ نفت خام کوچک‌تر است. آلاینده‌های کشتی‌های حامل LNG بسیار کمتر از کشتی‌های حامل دیگر است، چون علاوه بر نفت کوره از گاز طبیعی نیز برای تولید نیروی پیشران استفاده می‌کنند.

• **ذخیره سازی و تبدیل دوباره LNG به گاز:** برای برگرداندن LNG به حالت گازی،

باید آن را وارد یک مجتمع تبدیل کننده به گاز نماییم. حدود ۱,۵ تا ۲ درصد محتوی کل انرژی گاز طبیعی مایع یا همان LNG صرف تبدیل دوباره آن به گاز می‌شود. در ورودی ترمینال دریافت کننده، LNG در حالت مایع خود در ابتدا به یک تانک ذخیره دو جداره (مشابه آنچه در مجتمع مایع سازی استفاده می‌شود) و در فشار اتمسفر پمپاژ می‌شود و

سپس در حالی که در یک محیط کنترل شده گرم می‌شود، به صورت پرفشار در طول اجزای مختلف ترمینال پمپاژ می‌شود. LNG به دلیل عبور از لوله‌هایی که توسط هیترهای احتراق مستقیم<sup>۴۵</sup> آب دریا یا آب داغ حرارت می‌بینند، گرم می‌شود. سپس فشار گاز تبخیر شده حاصله تنظیم می‌شود و این گاز به عنوان گاز طبیعی وارد سیستم خط لوله سراسری می‌شود، و در نهایت مصرف کنندگان خانگی و صنعتی گاز مورد نیاز را به شکل گاز یا به صورت الکتریسیته دریافت می‌کنند.

هم اکنون هزینه‌های مربوط به اکتشاف و تولید گاز طبیعی به واسطه پیشرفت‌های حاصل روبه کاهش است. همچنین در زمینه مایع سازی تکنولوژی‌های حاصله باعث ارزان تر شدن فرآیندهای مربوطه شده است. در طراحی کشتی‌های حامل LNG نیز پیشرفت‌های ایجاد شده به کاهش هزینه‌ها کمک کرده است. در زمینه تبدیل دوباره LNG با گاز علاوه بر پیشرفت‌های ایجاد شده، رقابت میان تامین کنندگان مختلف نیز باعث کاهش هزینه‌ها شده است.

#### ۴-۵) آیا LNG یک سوخت ایمن است؟

سال‌های زیادی LNG به صورت ایمن مورد استفاده قرار گرفته است. البته این صنعت بدون حادثه نیست اما قواعد ایمنی را خصوصاً در ۴۰ سال اخیر در بر داشته است. آمریکا دارای بیشترین تعداد تاسیسات LNG در دنیا می‌باشد. یکصد و سیزده جایگاه فعال LNG در سراسر آمریکا گسترده شده است که بیشترین محل تمرکز آنها شمال شرقی آمریکا است.

#### ۴-۶) استفاده از انرژی سرد LNG

چنانچه تمام منبع انرژی دما پایین دریافتی در ترمینال که دارای مقدار مشخصی از بار است، بتواند به طور موثری در تمام محدوده دمایی از ۲۶۰- درجه فارنهایت به بالا مورد استفاده قرار گیرد، ارزش این سرمایه تیریدی، می تواند هزینه اولیه مربوط به مایع سازی را جبران کند. بازیافت تمامی این سرما کاری عملی نیست، اما تعداد زیادی از چنین طرح هایی یا پیشنهاد شده و یا اینکه اجرایی شده اند تا بخشی از سرمایه مفید موجود را مورد استفاده قرار دهند که این کار منجر به کاهش هزینه تبخیر گاز مایع نیز خواهد شد. در زیر چند نمونه از سیستم های بهره برداری از انرژی سرد LNG ذکر شده است:

سیستم های نصب شده:

- استخراج اتان، پروپان و میعانات دیگر
- سرمایش هوای ورودی به توربین و دیگر استفاده های نیروگاهی
- جدسازی هوا و صنایع وابسته
- ذخیره سازی سرد
- تامین آب سرد تیریدی در صنعت

و سیستم های پیشنهاد شده:

- تولید توان الکتریکی
- تولید اتیلن
- منجمد کردن مواد غذایی
- تولید آمونیاک

یک نمونه از سیستم بازیافت کرایوجنیک (سیستم تبخیر کننده با امکان استفاده از انرژی سرد)<sup>۵۶</sup>، موردی است که می تواند برای شرکت های بزرگ انرژی و یا شرکت های خدماتی که علاوه بر گاز

طبیعی، تامین کننده برق نیز می‌باشند، جذابیت داشته باشد. منبع گازی می‌تواند LNG بوده و توان می‌تواند با توربین‌های گاز<sup>۷</sup> تولید شود.

فرآیند مورد نظر را می‌توان با توجه به داشتن مشخصه‌های زیر توصیف نمود:

۱. تولید توان با استفاده از توربین‌های گاز
۲. تبخیر پیوسته LNG با استفاده از مقادیر کمی زیاد اما کم کیفیت انرژی حرارتی که در خروجی توربین گاز موجود می‌باشد.
۳. استفاده از LNG یا گاز طبیعی با دمای پایین، با هدف پیش سرمایه‌گذاری هوای ورودی احتراق به توربین و بنابراین افزایش توان خروجی ژنراتور. افزایش راندمان حرارتی توربین تا بیش از ۳۸٪ برای شرایط کاری معین ممکن می‌باشد.

یک مثال مناسب از تولید توان ترکیبی با تبخیر LNG، ترمینال دریافتی کوو پوینت است که در آن حرارت تلف شده از توربین گاز (که ژنراتور را به حرکت در می‌آورد) برای تامین واحدهای غوطه‌ور (فرو رفته در آب) تبخیر کننده احتراقی<sup>۸</sup> استفاده می‌شود. در این مجموعه سه عدد توربین به منظور تولید توان بیش از ۱۷۰۰۰ کیلو وات از توان الکتریکی مجموعه جهت رفع نیازمندی‌های مجموعه، نصب شده‌اند. مخلوط گلیکول- آب<sup>۹</sup>، از واحدهای بازیافت حرارتی توربین‌ها به سمت دو تبخیر کننده بازیافت حرارت تلف شده 100 MMCFD پمپاژ می‌شود که حاوی ایزوبوتان به عنوان یک سیال واسطه می‌باشد. ایزوبوتان در بخش پوسته‌ای توسط مخلوط گلیکول- آب داغ در تیوب‌های زیرین تبخیر می‌شود و دوباره توسط تبخیر LNG در دسته لوله‌های بالایی به مایع تبدیل می‌شود. اگرچه در هیچ مجتمع LNG ای چنین سیستمی به منظور تولید نیروی برق برای مصارف خارج از سایت، نصب نشده است، این نظریه به طور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته و به نظر می‌رسد که درخور ارزش باشد. همچنین فرآیند شکست گاز شیرین لیبی در

ترمینال اناگاس<sup>۱۰</sup> در بارسلونا انجام شده است. فرآیند به کار برده شده، درصد زیادی از سرمای LNG را به عنوان یک ماده مبرد در مجتمع شکست و همچنین برای سرمایش LPG به منظور ذخیره سازی در فشار اتمسفر، مورد استفاده قرار می‌دهد.

در ترمینال لاسپزیا<sup>۱۱</sup> از سرمای موجود برای جداسازی اتان و میعانات سنگین دیگر با استفاده از فرآیند شکست، و همچنین برای نیازهای سرمایشی در مجتمع میعانات نفتی تحت فشار استفاده می‌شود.

چنانچه در بازیافت انرژی سرد LNG یک پله پای خود را فراتر نهمیم، پیشنهاد شده که توسط مراحل چندگانه از اتان استخراج شده در مرحله قبل برای تولید اتیلن استفاده شود.

در ژاپن، صنعت گاز توکیو نیروی برق این شهر به همراه آب سرد مورد نیاز را تامین نموده است که از تبخیر کننده‌های دریایی برای تامین آب سرد مورد نیاز نیروگاه توربین بخار استفاده می‌کند. صنعت گاز توکیو سرمای جریان LNG را بازیافت می‌کند تا از آن در یک انبار تبریدی (سردخانه) در نزدیکی تاسیسات نجیشی<sup>۱۲</sup> استفاده کند. به این منظور یک مبرد واسطه بین مبدل های حرارتی مجتمع LNG و خنک کننده های سردخانه سیرکوله می‌شود. در این تاسیسات ۶۰٪ صرفه جویی انرژی حاصل شده است.

سرمای قابل حصول LNG، همچنین می‌تواند جهت مایع سازی مجدد گازهای تبخیر شده از تانک و نشت حرارتی سیستم لوله کشی نیز مورد استفاده قرار بگیرد. در ترمینال گازی جزیره کنوی انگلستان، گاز تبخیر شده مازاد بر نیاز، در مقابل جریان LNG دوباره مایع می‌شود. مایع سازی مجدد گازهای تبخیر شده ممکن است بسیار اقتصادی تر از فشرده سازی آن در خط لوله و انتقال آن به صورت فشاری باشد. همچنین در جایی که گاز کم فشار نمی‌تواند به عنوان یک سوخت کارخانه‌ای استفاده شود، مایع سازی می‌تواند اقتصادی تر باشد.

دو منطقه وجود دارند که در آنها سیستم های بازیافت انرژی سرد LNG به این منظور نصب شده- اند که سرما را برای واحدهای جداسازی هوا و برای تولید اکسیژن و نیتروژن مایع فراهم می کنند. یک مجتمع تولید اکسیژن و نیتروژن مایع با ظرفیت ۴۸۰ تن در روز از سال ۱۹۷۱ در خارج از کارخانه نجیشی توکیو در حال فعالیت می باشد که صرفه جویی ۳۸ درصدی انرژی در تولید اکسیژن مایع در این مجتمع گزارش شده است.

انرژی سرد LNG همچنین برای پایین تر آوردن دمای آب مجتمع Oxyton استفاده می شود. آب سرد برای سرمایش کمپرسور و مایع سازی بخار خروجی از توربین ها استفاده می شود.

برای نشان دادن یک مورد دیگر بازیافت انرژی سرد LNG، پیشنهاد های متعددی برای نصب چرخه های توان، با هدف تولید توان الکتریکی به عنوان فرآیندی افزون بر تبخیر LNG، ارائه شده است. انرژی سرد LNG در حالت مایع و گاز، یک چاه حرارتی تقطیری فراهم می کند و آب دریای محیط (یا شاید هوا) فراهم کننده چشمه (منبع) حرارتی می باشد. چرخه توان همانند یک نیروگاه بخار عمل می کند که بین این دو محدوده دمایی قرار دارد که می تواند از هریک از سیالات عامل پیشنهاد شده از جمله پروپان، پروپیلن یا نیتروژن استفاده کند. چنین طرح هایی به لحاظ پیچیدگی متغیراند، با این وجود ممکن است بتوان توان الکتریکی بیش از نیاز سایت را تولید نمود تا از آن برای تخلیه محموله های LNG و ترمینال های گاز سازی استفاده نمود.

اگرچه بخش تبدیل به گاز یا ارسال گازی تاسیسات ذخیره سازی LNG، یکی از ارزان ترین بخش های مجتمع می باشد، نقش بسیار مهمی ایفا می کند چرا که چنانچه در کارکرد خود دچار مشکل شود، به هنگام ماکزیمم تقاضای گاز، کل هدف استفاده از LNG با شکست مواجه می شود. در هنگامی که ماکزیمم تقاضا رخ می دهد، سیستم تبدیل مجدد به گاز<sup>۶۴</sup> می بایست آماده عملکرد سریع و قابل اطمینان باشد.

#### ۷-۴) اصطلاحات علمی سوخت های دیگر

اغلب موارد LNG با اصطلاحات مربوط به سوخت های دیگر اشتباه می شود. این موارد عبارتند از: میعانات گاز طبیعی، گاز طبیعی فشرده (CNG)، گاز مایع پتروشیمیایی (LPG)، گاز به مایع (GTL).

#### ۴-۷-۱) ترکیبات LNG

LNG بیشتر از متان تشکیل شده است (در حدود ۹۵٪). فرآیند مایع سازی نیازمند حذف ترکیبات غیر متانی موجود در گاز طبیعی است. این ترکیبات عبارتند از دی اکسید کربن، آب، بوتان، پنتان و ترکیبات سنگین دیگر که همراه گاز طبیعی تولید شده وجود دارند. LNG بی بو، بی رنگ، غیر خورنده و غیر سمی است. هنگامی که LNG تبخیر می شود تنها هنگامی می سوزد که با غلظت ۵ تا ۱۵ درصد با هوا مخلوط شود.

#### ۴-۷-۲) ترکیبات میعانات گاز طبیعی<sup>۶۵</sup>

میعانات گاز طبیعی بیشتر از مولکول های سنگین تر از متان تشکیل شده است. این مولکول ها بسیار ساده تر از متان مایع می شوند. میعانات گاز طبیعی مولکول های هیدروکربنی هستند که از اتان شروع شده و همچنانکه اتم های کربن به اتان اضافه می شوند اندازه مولکول های بعدی افزایش می یابد. عمدتاً حدود ۹۵٪ میعانات گاز طبیعی از اتان، پروپان و بوتان تشکیل شده است. در آمریکا میعانات گاز طبیعی نوعاً در خلال فرآیند تولید گاز طبیعی برای کاربردهای صنعتی استخراج می شوند. LNG حمل شده به آمریکا می بایست با مشخصات حرارتی خطوط لوله همخوانی داشته باشد، یعنی می بایست تنها حاوی مقادیر محدودی از میعانات گازی باشد. چنانچه LNG به همراه میعانات گازی صادر شود، قبل از ورود گاز طبیعی به خط لوله سراسری، میعانات گاز طبیعی می-

بایست حین دریافت جدا شده و یا اینکه با گاز رقیق یا نیتروژن مخلوط شود. مشخصات ظرفیت حرارتی LNG در کره، ژاپن و دیگر کشورهای آسیایی نسبت به آمریکا و اروپا بیشتر است. در این کشورها میعانات گازی در LNG باقی می ماند و در برخی شرایط LPG در ترمینال دریافتی به LNG تبخیر شده افزوده می شود تا ظرفیت حرارتی افزایش یابد.

LNG شبیه گاز مایع پتروشیمیایی<sup>۶۶</sup> است. LPG اغلب به نادرست پروپان نامیده می شود. در حقیقت LPG به صورت عمده ترکیب پروپان و بوتان در حالت مایع و در شرایط دمای اتاق و فشار متوسط ۲۰۰ psig (تقریباً ۱۳,۸ بار نسبی) می باشد. تبادل ترمهای LPG و پروپان اینطور توضیح داده می شود که در آمریکا و کانادا، LPG اصولاً از پروپان تشکیل شده است. با این حال در بسیاری از کشورهای اروپایی محتوی پروپان LPG می تواند کمتر از ۵۰ درصد نیز باشد.

#### ۴-۷-۳ ترکیبات LPG

در اروپا LPG برای مدتی طولانی به عنوان سوختی برای وسایل نقلیه سبک مورد استفاده قرار گرفته است. بسیاری از جایگاههای بنزین علاوه بر پمپهایی جهت توزیع بنزین دارای پمپهای LPG نیز می باشند. عمدتاً ۹۵٪ LPG از پروپان و بوتان تشکیل شده است.

LPG به شدت اشتعال پذیر بوده و باین می بایست به دور از منابع اشتعالی و در محیطی با تهویه مناسب نگهداری شود تا هرگونه نشتی آن بتواند به صورت قابل اطمینانی زدوده شود. ماده شیمیایی خاصی به نام مرکاپتن ب<sup>۶۷</sup> LPG افزوده می شود تا بوی نامطبوع و مشخص نشتی را مشخص نماید. در سرتاسر جهان LPG برای مصارف خانگی از جمله پخت غذا و گرم کردن آب استفاده می شود.

باید دقت شود که LNG مترادف (GTL) نیست<sup>۸</sup>. GTL در واقع همان تبدیل گاز طبیعی به محصولات نظیر متانول، دی متیل اتر و مواد شیمیایی دیگر است. از مواد یاد شده، در حال حاضر تنها متانول در مقیاس تجاری گسترده تولید می‌شود.

منابع پارس پتروهمه

## فصل ۵: آنالیز انرژی و آگرژی چرخه توان زباله سوز با استفاده از بازیافت انرژی سرد گاز طبیعی مایع شده به همراه استفاده از گاز طبیعی حاصله به عنوان سوخت اضافی زباله سوز

### مقدمه

تکنولوژی آینده جهان در زمینه مصرف انرژی و مسائل زیست محیطی مشتمل بر یک سیستم زنجیره‌ای پیشرفته انرژی است که بر اساس تکنولوژی جدیدی است که گرمای تلف شده از تاسیسات و تجهیزات مختلف را بازیابی نموده و انرژی بازیافت شده را به طور موثری به واحد تقاضا منتقل می‌کند. چرخه‌های توان سوزاننده پسماندها (زباله سوز) به عنوان سیستم‌های نوید دهنده بهره برداری از انرژی‌های اتلافی و حفاظت محیطی در نظر گرفته می‌شوند [۱۷].

در حالت کلی راندمان یک چرخه تولید توان ذغال سنگی در حدود ۴۰٪ است و این در حالی است که راندمان چرخه توان یک زباله سوز کمتر از این مقدار است. دلیل این امر این است که دمای بخار در چرخه زباله سوز به دلیل مشکلات خوردگی در خط بخار سوپرهیت، باید کمتر از  $300^{\circ}C$  باشد، در حالی که دمای بخار در چرخه ذغال سنگ در حدود  $600^{\circ}C$  است. عموماً می‌توان از طریق توسعه موادی که از خوردگی در دماهای بالا جلوگیری می‌کنند و یا از طریق گرمایش مجدد بخار سوپرهیت به دمایی بیش از دمای  $300^{\circ}C$  با استفاده از منبع حرارت اتلافی از توربین گاز،

<https://t.me/tephd>

راندمان چرخه تولید توان زباله سوز را افزایش داد که به عنوان چرخه توان زباله سوز برتر خوانده می‌شود [۱۸].

۵-۱) مختصری در مورد نرم افزار HYSIS



امروزه کاربردهای نرم افزارهای کامپیوتری در زمینه مهندسی فرآیند و صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع دارویی و صنایع معدنی، بیش از گذشته اهمیت یافته است. نرم افزار HYSIS به دلیل پوشش بیشتر فرآیندهای نفت، گاز و پتروشیمی و فرآیندهای شیرین سازی در صنایع نفتی محدوده وسیعی از فرآیندهای موجود در صنایع تولیدی را تحت پوشش قرار می دهد. توانایی مدل سازی بسیار بالای ساده و سریع فرآیندها در حالت های پویا (دینامیک) در HYSIS آن را به عنوان یکی از نرم افزار های جامع و پر کاربرد در زمینه مهندسی فرآیند مطرح می نماید. امکانات این نرم افزار در مقایسه با دیگر نرم افزارهای شبیه سازی فرآیند، مناسب بوده و می توان گفت که در مقایسه با سایر نرم افزارهای این گروه روش بکارگیری آسان تری دارد و جهت استفاده کاربر ساده است.<sup>۶۹</sup>

#### ۵-۲) تحلیل انرژی حرارتی

تعریف راندمان حرارتی:

طبق تعریف برابر است با مقدار کار مفید حاصل از چرخه تقسیم بر مقدار انرژی که وارد چرخه شده است. مقدار کار مفید از جمع کار توربین ها و پمپ های موجود در چرخه بدست می آید با توجه به این نکته که کار توربین ها با علامت مثبت و کار مصرف شده توسط پمپ ها با علامت منفی در نظر گرفته می شود.

#### ۵-۳) تحلیل انرژی

تعریف راندمان انرژی:

طبق تعریف برابر با مقدار انرژی محصولات تولیدی تقسیم بر مقدار انرژی سوخت ورودی به چرخه می باشد. در چرخه ای که هم اکنون تحلیل می کنیم محصولات برابر کار خالص خروجی از

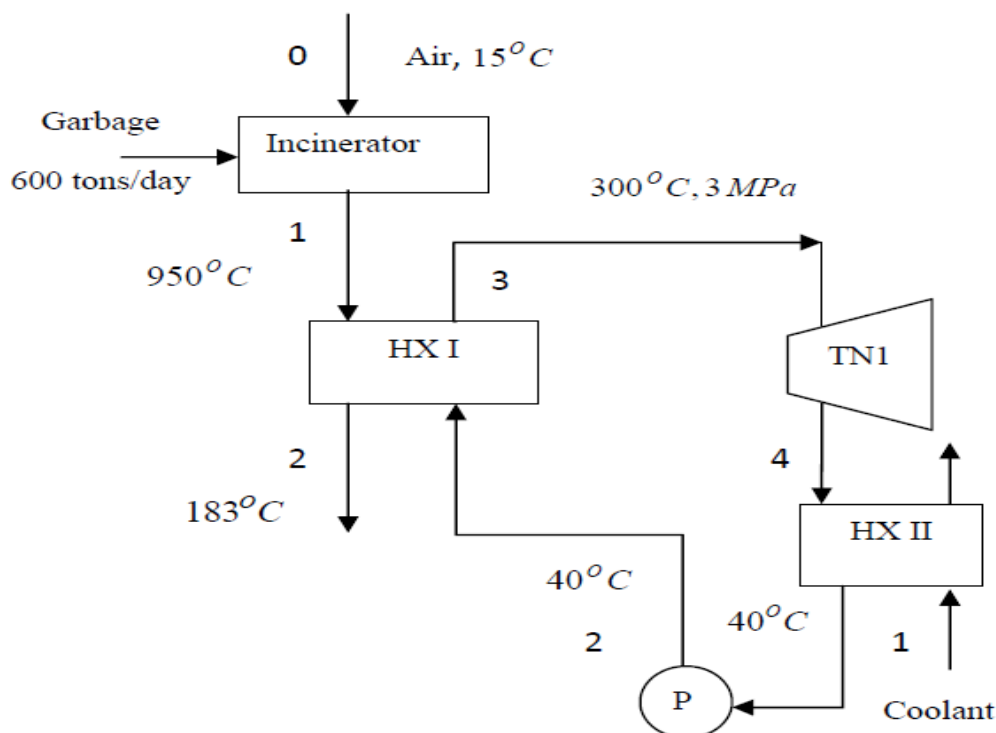
چرخه شماره یک و دو و همچنین گاز شهری خروجی از چرخه می‌باشند. بنابراین مقدار کار خالص در دو چرخه مذکور به همراه اگزرژی گاز خروجی صورت کسر راندمان اگزرژی را تشکیل می‌دهند. در این تحلیل فرض بر این است که اگزرژی حرارتی گاز شهری تنها جزء مهم اگزرژی این محصول می‌باشد و از سایر اجزاء اگزرژی صرفه نظر می‌کنیم.

سوخت در سیستم مورد بررسی برابر مقدار حرارت ورودی به چرخه و گاز مایع ورودی به چرخه می‌باشد. اگزرژی این مقدار حرارت ورودی برابر مقدار کاری است که در صورت ورود این مقدار حرارت به چرخه کارنو حاصل می‌گردد.

در این تحلیل فرض بر این است که اگزرژی حرارتی گاز مایع تنها جزء مهم اگزرژی این سوخت می‌باشد و از سایر اجزاء اگزرژی صرفه نظر می‌کنیم.

#### ۴-۵) توصیف چرخه توان رایج با استفاده از زباله سوز

شکل (۱-۵) چرخه توان رایج با زباله سوز را نشان می‌دهد که متشکل از یک زباله سوز، مبدل حرارتی شماره ۱، یک توربین، مبدل حرارتی شماره ۲ و یک پمپ است. سیال عامل چرخه آب می‌باشد. هوا در دمای محیط  $15^{\circ}C$  از طریق فرآیند سوزاندن زباله تا بیش از  $950^{\circ}C$  داغ می‌شود و منبع حرارتی مبدل شماره ۱ را تامین می‌کند و از این مبدل با دمای  $183^{\circ}C$  خارج می‌شود. سیال عامل تا بیش از  $300^{\circ}C$  و در فشار ۳ مگاپاسکال در مبدل شماره ۱ فوق داغ می‌شود و وارد توربین می‌شود. سیال عامل بعد از خروج از توربین در مبدل شماره ۲ تقطیر شده و با دمای  $40^{\circ}C$  وارد پمپ می‌شود. سیال عامل در پمپ افزایش فشار یافته و به منظور فوق داغ شدن وارد مبدل شماره ۱ می‌شود. شکل (۱-۵) شماتیک چرخه اول را نشان می‌دهد [۱۹]:

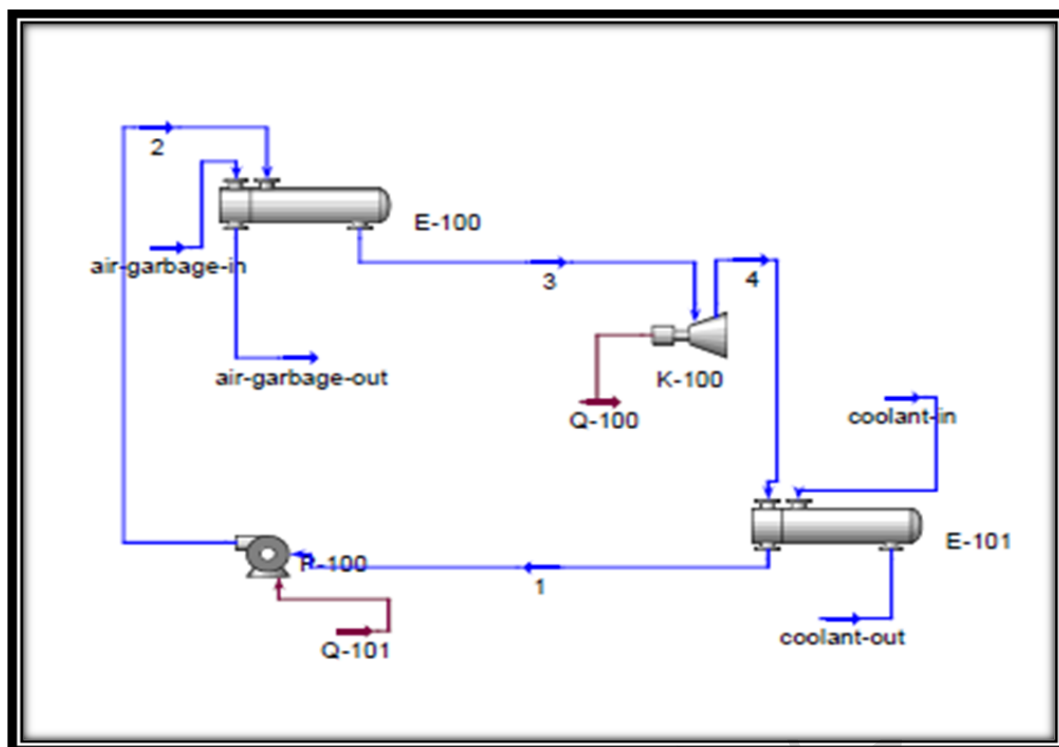


شکل (۵-۱): چرخه توان رایج (چرخه شماره ۱) با استفاده از زباله سوز

برای شبیه سازی فرآیند فرض بر این شده که ترکیب خروجی از زباله سوز را هوا با دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد در نظر بگیریم. در ادامه این هوا وارد یک مبدل می شود که در آن بر اثر تبادل حرارت دمایش به ۱۸۳ درجه سانتی گراد می رسد.

باید توجه داشت که این میزان هوای داغ (۱۸۳ درجه سانتی گراد) خود گزینه مناسبی برای کارهای CHP است. در بخش پیشنهادات پروژه برای استفاده از این حرارت راهکارهایی در نظر گرفته شده است.

در چرخه توان رایج و در مبدل شماره ۲ از یک خنک کننده (به عنوان مثال آب) برای کاهش دمای سیال عامل بهره می بریم. شکل (۵-۲) شبیه سازی چرخه توان رایج را در نرم افزار HYSIS نشان می دهد.



شکل (۵-۲): شبیه سازی چرخه توان رایج (چرخه شماره ۱) در نرم افزار HYSIS

#### ۵-۴-۱) مختصری در مورد زباله سوز

زباله سوزها و سیستم‌های متنوع دیگر دما بالا که جهت منهدم کردن زباله‌ها طراحی شده‌اند، به عنوان سیستم‌های گرما درمانی یاد می‌شوند. سوزاندن مواد زایدی مانند زباله‌ها، آنها را به خاکستر جمع شده در کف زباله سوز، گازهای خروجی از دودکش، ذرات بسیار ریز و از همه مهم‌تر حرارت تبدیل می‌کند که این حرارت می‌تواند برای تولید توان الکتریکی به کار گرفته شود. آلودگی گازهای خروجی از دودکش قبل از تخلیه شدن به اتمسفر گرفته می‌شود. در فصل ۳ چگونگی محاسبه مقدار انرژی مفید ورودی به زباله سوز بر حسب نوع ترکیب زباله تشریح شد. در زباله سوز چرخه-های مورد نظر این عدد معادل  $9,6 \text{ Mj/kg}$  محاسبه گردید.

#### ۵-۴-۲) چگونگی تبدیل زباله سوز به یک مبدل حرارتی

برای شبیه سازی زباله سوز از نرم افزار HYSIS نمی‌توان بهره گرفت. زیرا چنین تجهیزاتی در نوار ابزار نرم افزار موجود نیست و ترکیب درصد گازهای خروجی نیز مشخص نمی‌باشد. برای اینکه

بتوانیم شبیه سازی را صورت دهیم به ناچار از مدل سازی بهره می‌گیریم. به این صورت که گازهای داغ خروجی را با هوای داغ معادل می‌کنیم. مقدار حرارت ورودی به چرخه برابر است با ۹۰ درصد حرارتی که هوای داغ در مبدل شماره ۱ به چرخه می‌دهد. (یعنی بازده مبدل را ۹۰ درصد در نظر می‌گیریم).

برای محاسبه راندمان حرارتی در این چرخه به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$Q = \dot{m}_A * (950 - 183) * 0.9 * 1.17 = 44711.55 \text{ kw}$$

$$W_{net} = (W_{TN1} - W_{P1}) = 12640 - 70.27 = 12569.73 \text{ kw}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q} * 100 = 28.1\%$$

برای محاسبه راندمان انرژی در این سیستم داریم:

انرژی هوای ورودی به مبدل شماره ۱ و انرژی آب ورودی به مبدل شماره ۲ به عنوان سوخت محاسبه شده و انرژی کار خالص خروجی از چرخه به همراه انرژی آب خروجی از مبدل شماره ۲ به عنوان محصولات واکنش تلقی می‌شوند.

انرژی جریان هوای ورودی به چرخه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Ex_Q = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_b} \right)$$

$$Q = 44711.55 \text{ kW}$$

$$T_0 = 298^\circ \text{K}$$

$$T_b = \text{Boreder Temperature} = \frac{(H_{in} - H_{out})}{S_{in} - S_{out}} = 786.88^\circ \text{K}$$

$$\Rightarrow Ex_Q = 27778.8 \text{ kW}$$

در این حالت باید توجه داشت که دمای مرز جریان ( $T_b$ ) در مبدل متغیر است به همین دلیل از دمای متوسط ترمودینامیکی بهره می‌بریم که نحوه محاسبه آن در بالا توضیح داده شده است.

با در نظر گرفتن موارد بالا میزان انرژی در این چرخه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

انرژی آب خنک کننده ورودی به قرار زیر است:

$$Ex_{Waterin} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) = 0 \text{ kW}$$

در مورد انرژی کار باید توجه داشت که مقدار کار صورت گرفته برابر همان مقدار انرژی تولید شده است:

$$Ex_W = 12569.73 \text{ kW}$$

در مورد انرژی آب خنک کن خروجی داریم:

$$Ex_{Waterout} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) = -4486.09$$

$$\eta_{Ex} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} * 100 = \frac{12569.73 - 4486.09}{27778.8 + 0} * 100 = 29.1\%$$

حال که بررسی چرخه یک را به انجام رساندیم نتایج آنرا در قالب جدول زیر بیان می‌کنیم:

جدول (۵-۱): راندمان‌های انرژی و انرژی چرخه شماره ۱

راندمان انرژی	راندمان انرژی	مقدار راندمان
٪۲۹،۱	٪۲۸،۱	۱

۵-۵) توصیف چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز به همراه بازیابی انرژی سرد

### LNG

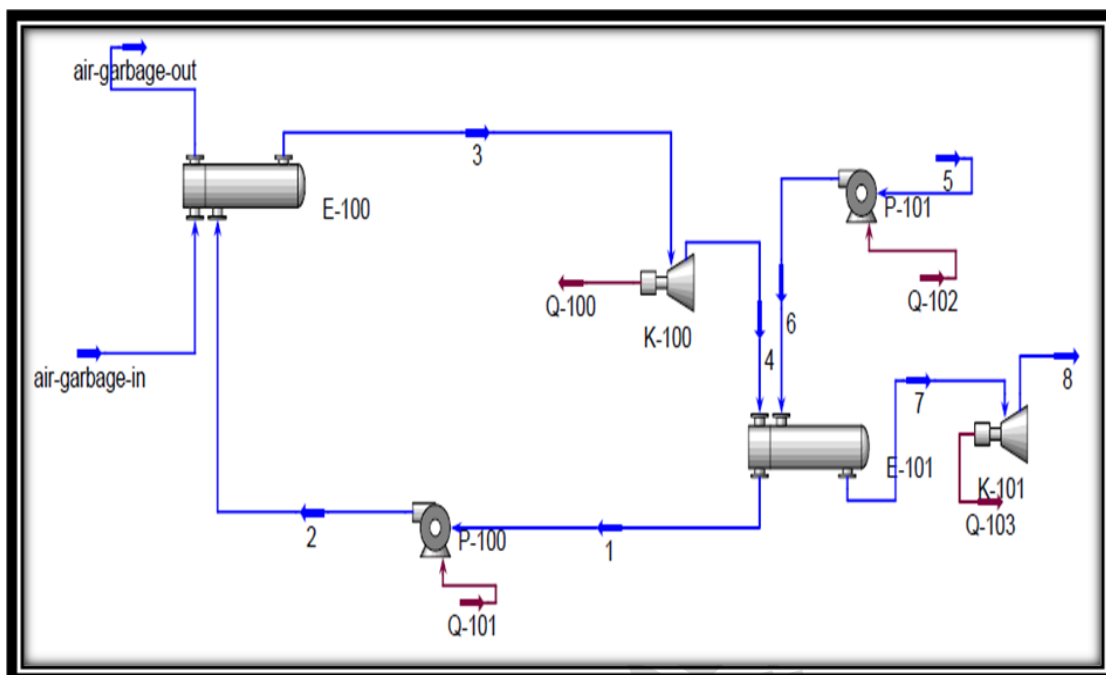
در ادامه به بررسی شبیه سازی چرخه دوم (چرخه ترکیبی با بازیابی انرژی سرد LNG) می‌پردازیم: در این چرخه سیال عامل تغییر کرده و به مخلوطی از آب و آمونیاک تبدیل می‌گردد. دلیل این تغییر را باید در ویژگی‌های مخلوط آب و آمونیاک جستجو کرد.

دمای انجماد این مخلوط زیر صفر درجه سانتی‌گراد است. چون در این چرخه و در نقاطی از چرخه دمای سیال عامل به زیر صفر درجه می‌رسد، اگر سیال عامل آب باشد چرخه دچار اختلال می‌گردد. بنابراین دلیل اصلی استفاده از مخلوط آب و آمونیاک نقطه انجماد پایین آن است.

در شکل (۵-۳) شماتیک چرخه دوم را مشاهده می‌کنیم:



حال به نمودار جریان چرخه شبیه سازی شده در نرم افزار HYSIS می پردازیم. در شکل زیر چرخه شماره دوم را مشاهده می کنیم:



شکل (۴-۵): شبیه سازی چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز (چرخه شماره ۲) به همراه بازیابی انرژی سرد LNG در نرم افزار HYSIS  
 تمامی فرضیاتی که در مورد چرخه شماره یک صورت گرفت عیناً در چرخه شماره دو نیز تکرار می گردد.

ترکیب درصد سیال عامل به این صورت است که (Water = ۰,۳) و (Ammonia = ۰,۷) می باشد. حال به محاسبه راندمان های چرخه ترکیبی می پردازیم. برای محاسبه راندمان حرارتی همانند چرخه شماره یک داریم:

$$Q = \dot{m}_A * (950 - 183) * 0.9 * 1.17 = 44711.55 \text{ kW}$$

$$W_{net} = (W_{TN1} - W_{P1}) + (W_{TN2} - W_{P2}) = (13780 - 480.196) + (256.4 - 91.64) = 13464.56 \text{ kW}$$

$$\eta_{th} = \frac{(W_{TN1} - W_{P1}) + (W_{TN2} - W_{P2})}{Q} * 100 = \frac{13464.56}{44711.55} * 100 = 30.1\%$$

برای محاسبه راندمان اگزرژی در این سیستم داریم:

اگرژی هوای ورودی به مبدل شماره ۱ و اگرژی گاز مایع ورودی به چرخه شماره ۲ به عنوان سوخت محاسبه شده و اگرژی کار خالص خروجی از چرخه به همراه اگرژی گاز طبیعی سرد خروجی از چرخه شماره ۲ به عنوان محصولات واکنش تلقی می‌شوند.  
اگرژی جریان هوای ورودی به چرخه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Ex_Q = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_b} \right)$$

$$Q = 44711.55 \text{ kW}$$

$$T_0 = 298^\circ \text{K}$$

$$T_b = \text{Boreder Temperature} = \frac{(H_{in} - H_{out})}{S_{in} - S_{out}} = 786.88^\circ \text{K}$$

$$\Rightarrow Ex_Q = 27778.8 \text{ kW}$$

در این حالت باید توجه داشت که دمای مرز جریان در مبدل متغیر است به همین دلیل از دمای متوسط ترمودینامیکی بهره می‌بریم. اگرژی گاز مایع ورودی به قرار زیر است:

$$Ex_{LNG,in} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) = 42453.455 \text{ kW}$$

در مورد اگرژی کار باید توجه داشت که مقدار کار صورت گرفته برابر همان مقدار اگرژی تولید شده است:

$$Ex_W = 13464.56 \text{ kW}$$

در مورد اگرژی گاز خروجی از چرخه داریم:

$$Ex_{LNG,out} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) = 8427.1 \text{ kW}$$

$$\eta_{Ex} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} * 100 = \frac{13464.56 + 8427.1}{27778.8 + 42453.455} * 100 = 31.2\%$$

حال که بررسی چرخه یک را به انجام رساندیم نتایج آن را در قالب جدول زیر بیان می‌کنیم:

جدول (۵-۲): راندمان‌های انرژی و اگرژی چرخه شماره ۲

راندمان اگرژی	راندمان انرژی	مقدار راندمان شماره چرخه
٪۳۱،۲	٪۳۰،۱	۲

همانطور که ملاحظه می‌شود، راندمان‌های چرخه شماره ۲ از چرخه شماره ۱ بیشتر است. این افزایش در هر دو راندمان انرژی و اگزرژی مشاهده می‌شود.

منابع پارس پرو همه



۵-۶-۱) معادلات بالانس انرژی

۵-۶-۱-۱) زباله سوز

$$\eta_{INC} \dot{m}_G LHV_G + \dot{m}_{N,G} LHV_{N,G} = \dot{m}_A C_{PA} (T_{A1} - T_{A0}) \quad (1-5)$$

۵-۶-۱-۲) مبدل حرارتی شماره ۱

$$\dot{m}_A C_{PA} (T_{A1} - T_{A2}) = \dot{m}_N (h_{N3} - h_{N2}) \quad (2-5)$$

۵-۶-۱-۳) توربین شماره ۱

$$W_{TN1} = \dot{m}_N (h_{N3} - h_{N4}) = \eta_{TN1} \dot{m}_N (h_{N3} - h'_{N4}) \quad (3-5)$$

۵-۶-۱-۴) توربین شماره ۲

$$W_{TN2} = \dot{m}_L (h_{L3} - h_{L4}) = \eta_{TN2} \dot{m}_L (h_{L3} - h'_{L4}) \quad (4-5)$$

۵-۶-۱-۵) مبدل حرارتی شماره ۲

$$\dot{m}_N (h_{N4} - h_{N1}) = \dot{m}_L (h_{L3} - h_{L2}) \quad (5-5)$$

۵-۶-۱-۶) پمپ شماره ۱

$$W_{P1} = \dot{m}_N (h_{N2} - h_{N1}) = \frac{1}{\eta_{P1}} \dot{m}_N (h'_{N2} - h_{N1}) \quad (6-5)$$

۵-۶-۱-۷) پمپ شماره ۲

$$W_{P2} = \dot{m}_L (h_{L2} - h_{L1}) = \frac{1}{\eta_{P2}} \dot{m}_L (h'_{L2} - h_{L1}) \quad (۷-۵)$$

۵-۶-۱-۸) گاز شهری

$$Q_{CG} = \dot{m}_L (h_{L5} - h_{L4}) \quad (۸-۵)$$

۵-۶-۱-۹) بالانس انرژی کلی

$$\eta_{INC} \dot{m}_G LHV_G + \dot{m}_{N,G} LHV_{N,G} = W_{TN1} - W_{P1} + W_{TN2} - W_{P2} - Q_{CG} + \dot{m}_L (h_{L5} - h_{L1}) + \dot{m}_A C_{PA} (T_{A2} - T_{A0}) \quad (۹-۵)$$

۵-۶-۱-۱۰) راندمان انرژی

$$\eta_{th} = \frac{(W_{TN1} - W_{P1}) + (W_{TN2} - W_{P2})}{\dot{m}_G LHV_G + \dot{m}_{N,G} LHV_{N,G}} \quad (۱۰-۵)$$

۵-۶-۲) معادلات بالانس انرژی

۵-۶-۲-۱) انرژی هوا

$$e = C_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (۱۱-۵)$$

### ۵-۶-۲-۲) اگزرژی مخلوط آمونیاکی

$$e = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (12-5)$$

### ۵-۶-۲-۳) اگزرژی ورودی به چرخه

$$e_{IN} = e_G + e_{L1} + e_{N.G} \quad (13-5)$$

### ۵-۶-۲-۴) اگزرژی خروجی از چرخه

$$e_{OUT} = e_{OUT.N} + e_{OUT.L} + e_{OUT.CG} \quad (14-5)$$

در روابط فوق داریم:

$$e_{OUT.N} = e_{N3} - e_{N4} - (e_{N2} - e_{N1}) \quad (15-5)$$

$$e_{OUT.L} = e_{L3} - e_{L4} - (e_{L2} - e_{L1}) \quad (16-5)$$

$$e_{OUT.CG} = e_{L5} \quad (17-5)$$

### ۵-۶-۲-۵) بالانس اگزرژی کلی

$$e_{IN} = e_{OUT} + e_{Loss} \quad (18-5)$$

### ۵-۶-۲-۶) راندمان اگزرژی

$$\eta_{Ex} = \frac{e_{OUT}}{e_{IN}} \quad (19-5)$$

در این چرخه که از لحاظ ساختار مشابه با چرخه شماره ۲ می باشد فرض بر این شده است که بخشی از گاز شهری تولید شده به زباله سوز برگشت داده شده و در آنجا به عنوان سوخت مصرف می شود و در نتیجه دبی گاز داغ تولیدی در خروجی زباله سوز افزایش می یابد.

در نتیجه در سایر نقاط چرخه نیز تغییراتی در دما و فشار و دبی سیال عامل خواهیم داشت. با این فرضیات افزایش کار تولیدی در چرخه دور از انتظار نخواهد بود.

در شبیه سازی صورت گرفته با نرم افزار HYSIS در نظر گرفته شد که ۱۰ درصد از گاز تولیدی در چرخه شماره ۲ به زباله سوز فرستاده شده و به عنوان سوخت مصرف شود.

دبی گاز شهری تولیدی در چرخه شماره ۲ برابر با (۱۴۱۰۰۰) کیلوگرم در ساعت بوده است. در چرخه ۲ فرض بر این بود که زباله سوز حذف شود و انرژی حاصل از احتراق به هوا منتقل شده و در نتیجه دمای هوا افزوده شود.

در نتیجه افزودن انرژی حاصل از احتراق ۱۰ درصد گاز شهری حاصل شده به زباله سوز دبی هوای داغ تولیدی افزایش می‌یابد.

مقدار این افزایش به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{m}_{CH_4} = 14100 \frac{kg}{h}$$

$$C_{P,CH_4} = 35.56 \frac{kJ}{kmol^{\circ}C}$$

$$T_{TFT} = 1825^{\circ}C$$

مفهوم دمای شعله تئوری<sup>۷۲</sup>

با فرض آدیاباتیک بودن محفظه احتراق دمای حاصل از شعله تولیدی را دمای شعله تئوری می‌نامیم.

$$T_{ambient} = 25^{\circ}C$$

انرژی آزاد شده در اثر احتراق این مقدار سوخت برابر است با:

$$Q_{added\ gas} = 14100 * \frac{35.56}{16.04} * (1825 - 25) = 15629.5 \text{ kw}$$

در عبارت بالا فرض بر این بوده که بازده این احتراق ۸۰ درصد می‌باشد.

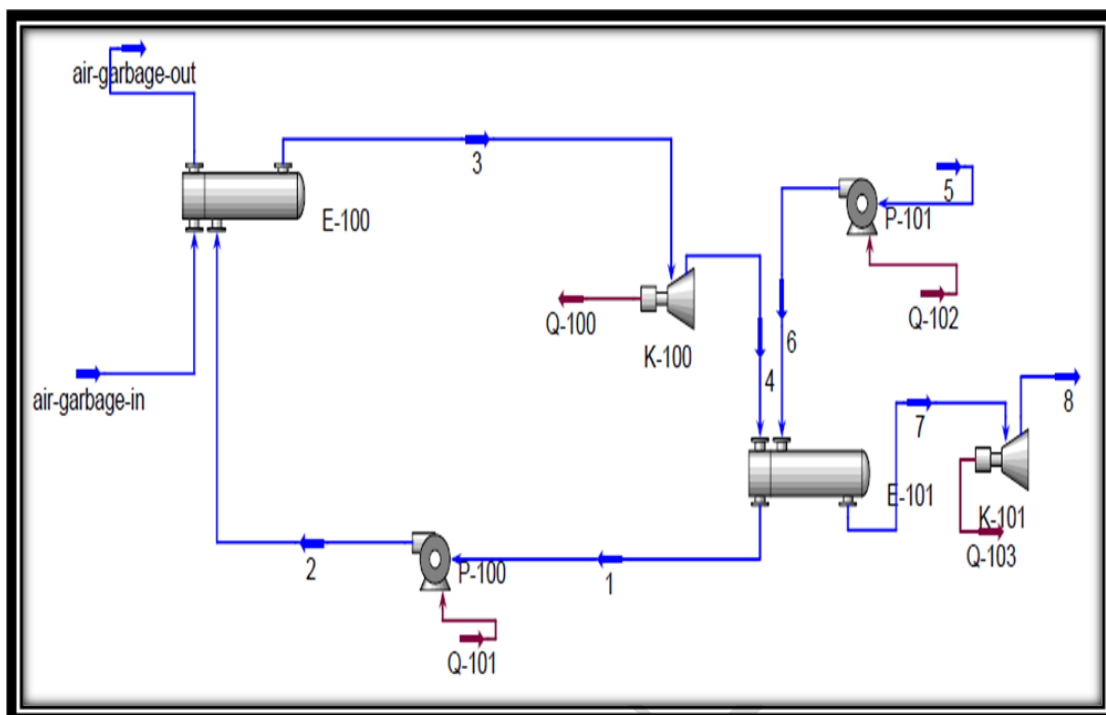
حال با فرض انتقال ۸۰ درصدی این حرارت به هوای داخل زباله سوز میزان افزایش دبی هوای داغ از خروجی زباله سوز به صورت زیر بدست می‌آید.

$$15629.5 * 0.8 = \dot{m}_{A,Excess} C_{PA} (T_{A1} - T_{A0}) \Rightarrow \dot{m}_{A,Excess} = 41301.25 \frac{kg}{h}$$

با در نظر گرفتن مقدار هوای موجود در چرخه دوم دبی هوای موجود در چرخه سوم برابر  $\frac{kg}{h}$

۲۴۱۰۰۰ بدست می‌آید:

حال با این مقدار هوای داغ خروجی از زباله سوز به شبیه سازی چرخه شماره ۳ می پردازیم:



شکل (۵-۶): شبیه سازی چرخه توان ترکیبی با استفاده از زباله سوز (چرخه شماره ۳) به همراه بازیابی انرژی سرد LNG و استفاده از گاز شهری تولید شده به عنوان سوخت اضافی در زباله سوز

حال به محاسبه راندمان چرخه شماره ۳ می پردازیم:

برای محاسبه راندمان حرارتی همانند چرخه شماره دو داریم:

$$Q = \dot{m}_A * (950 - 183) * 0.9 * 1.17 = 54067.74 \text{ kW}$$

$$W_{net} = (W_{TN1} - W_{P1}) + (W_{TN2} - W_{P2}) = (16890 - 578.96) + (360.8 - 110.361) = 16561.479 \text{ kW}$$

$$\eta_{th} = \frac{(W_{TN1} - W_{P1}) + (W_{TN2} - W_{P2})}{Q} * 100 = \frac{16561.479}{54067.74} * 100 = 30.7\%$$

برای محاسبه راندمان انرژی در این سیستم داریم:

انرژی هوای ورودی به مبدل شماره ۱ و انرژی گاز مایع ورودی به چرخه شماره ۳ به عنوان

سوخت محاسبه شده و انرژی کار خالص خروجی در چرخه به همراه انرژی گاز طبیعی سرد

خروجی از چرخه دوم به عنوان محصولات واکنش تلقی می شوند.

انرژی جریان هوای ورودی به چرخه به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$Ex_Q = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_b} \right)$$

$$Q = 54067.74 \text{ kW}$$

$$T_0 = 298^\circ \text{K}$$

$$T_b = \text{Boreder Temperature} = \frac{(H_{in} - H_{out})}{S_{in} - S_{out}} = 786.88^\circ \text{K}$$

$$\Rightarrow Ex_Q = 33591.7 \text{ kW}$$

در این حالت باید توجه داشت که دمای مرز جریان در مبدل متغیر است به همین دلیل از دمای متوسط ترمودینامیکی بهره می‌بریم.

اگرژی گاز مایع ورودی به قرار زیر است:

$$Ex_{LNG,in} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) = 51085 \text{ kW}$$

در مورد اگرژی کار باید توجه داشت که مقدار کار صورت گرفته برابر همان مقدار اگرژی تولید شده است:

$$Ex_W = 16561.479 \text{ kW}$$

در مورد اگرژی گاز خروجی از چرخه داریم:

$$Ex_{LNG,out} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) = 10560.33 \text{ kW}$$

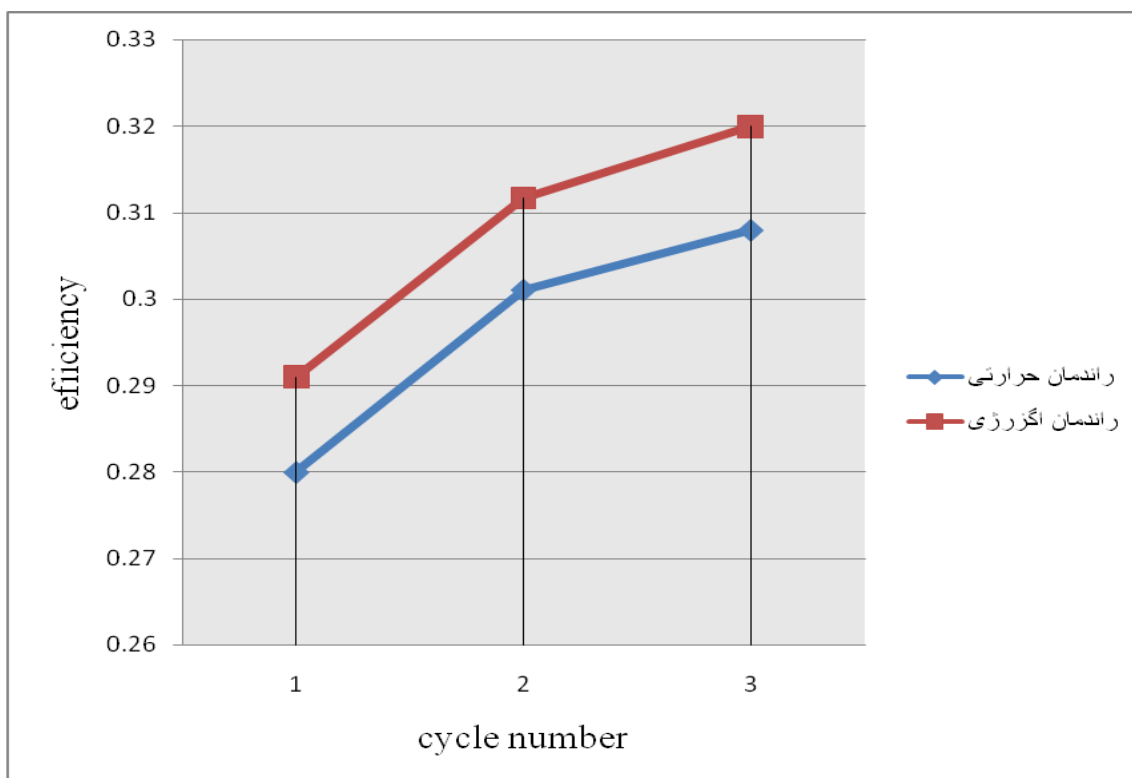
$$\eta_{Ex} = \frac{E_{OUT}}{E_{IN}} * 100 = \frac{16561.479 + 10560.33}{33591.7 + 51085} * 100 = 32\%$$

حال که بررسی چرخه یک را به انجام رساندیم نتایج آنرا در قالب جدول زیر بیان می‌کنیم:

جدول (۳-۵): راندمان‌های انرژی و اگرژی چرخه شماره ۳

راندمان اگرژی	راندمان انرژی	مقدار راندمان
٪ ۳۲	٪ ۳۰,۷	شماره چرخه
		۳

نتایج بررسی های ۳ چرخه مذکور به صورت نموداری در شکل (۷-۵) آورده شده است:



شکل (۷-۵): مقایسه راندمان‌های انرژی و انگرژی چرخه‌های شماره ۱، ۲ و ۳

همانطور که در شکل (۷-۵) مشاهده می‌گردد در اثر تغییرات اعمالی راندمان حرارتی و انگرژی چرخه افزوده می‌گردد.

میزان افزایش راندمان حرارتی و انگرژی بین چرخه دوم و سوم ناچیز است ولی باید توجه کرد که با افزایش گاز به زباله سوز میزان دبی سیال داغ بالا رفته و کار تولیدی در چرخه بیشتر می‌گردد و همچنین با افزایش راندمان چرخه تبدیل گاز مایع به گاز شهری، میزان گاز شهری تولیدی نیز بالاتر می‌رود.

در کشورهایی که انرژی از ارزش پایینی نسبت به (UTILITY) برخوردار است این کار صرفه اقتصادی بالایی دارد.

ایران و دیگر کشورهای دارای منابع انرژی از جمله کشورهایی هستند که جزو این گروه می‌باشند.

### ۷-۵) تحلیل حساسیت

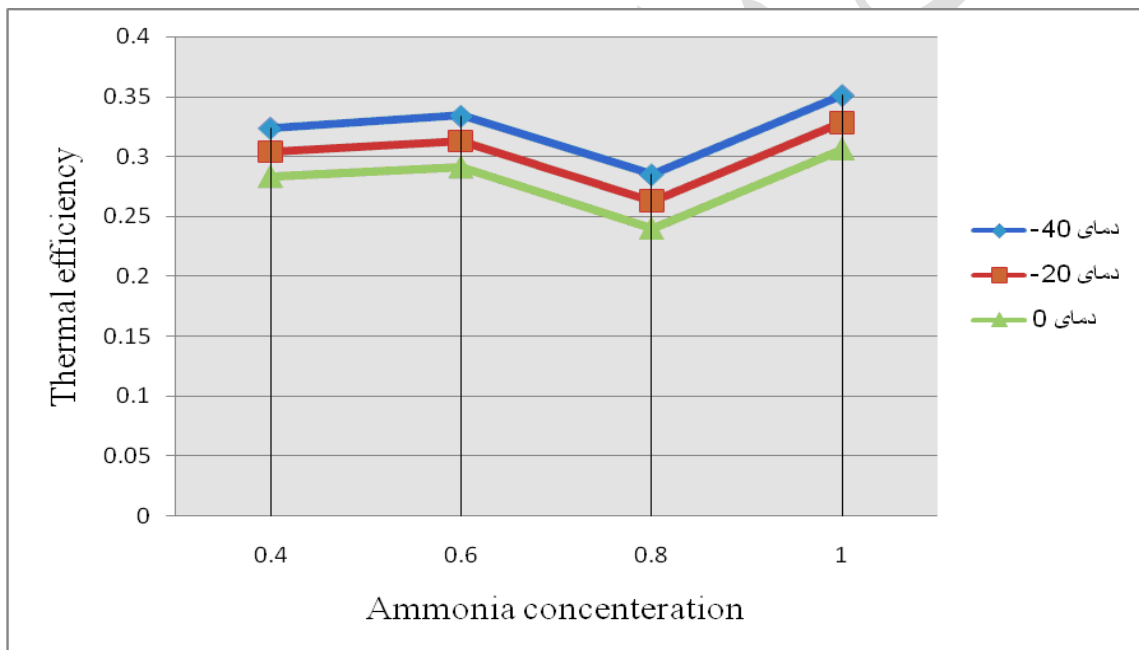
یکی از روش‌های کارآمد مهندسی برای ارزیابی عملکرد چرخه‌ها روش تحلیل حساسیت می‌باشد.

در مسائل مهندسی معمولاً چند پارامتر وجود دارند که نقشی کلیدی را در حل مسئله ایفا می‌کنند.

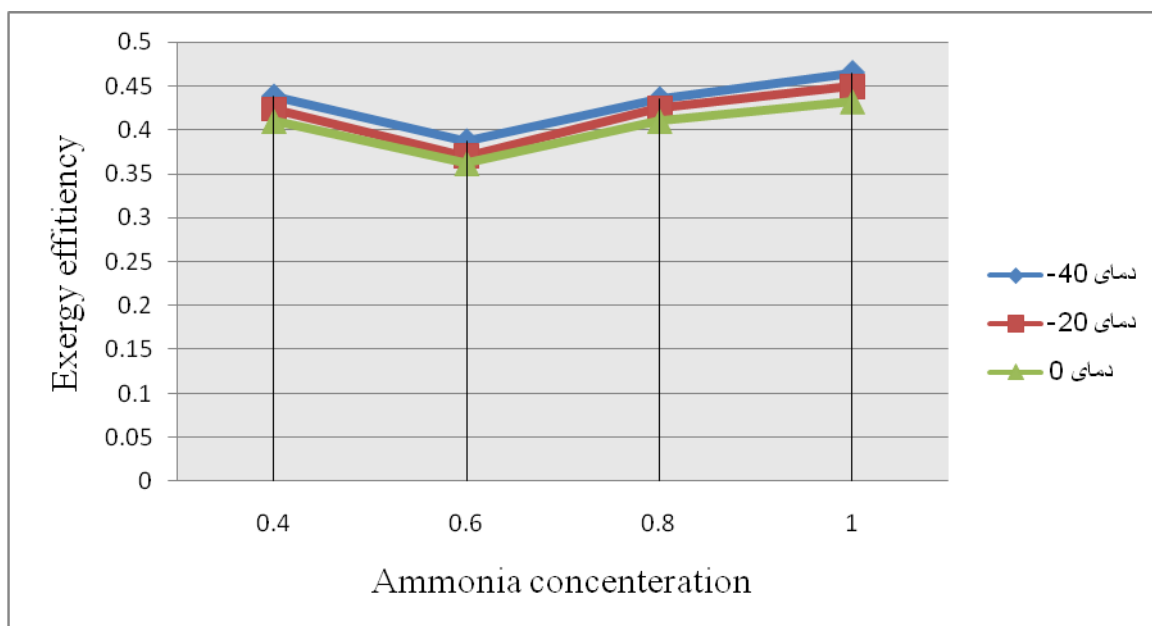
در روش تحلیل حساسیت کلیه پارامترهای اصلی را به جز یکی ثابت فرض کرده و در یک بازه منطقی آن پارامتر مورد نظر را تغییر می‌دهیم و نتایج حاصل از این تغییرات را در تمام چرخه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در این پروژه تحلیل حساسیت ابتدا بر روی دمای ورودی به پمپ در چرخه اول صورت می‌گیرد و دمای جریان شماره ۱ در بازه (صفر تا ۴۰-) درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند.

غلظت آمونیاک در سیال عامل چرخه از (۰,۴) تا (۱) تغییر می‌کند. تمامی این تغییرات به منظور دستیابی به نمودار عملکرد چرخه صورت گرفته می‌شود. در زیر نتایج حاصل را در قالب نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌کنیم:



شکل (۸-۵): تاثیر دمای  $T_{N1}$  بر راندمان حرارتی چرخه شماره ۳ ( $P_{L3} = 4MPa, P_{L4} = 0.4MPa$ )



شکل (۵-۹): تاثیر دمای  $T_{N1}$  بر راندمان اگزرژی چرخه شماره ۳ ( $P_{L3} = 4MPa, P_{L4} = 0.4MPa$ )

#### ۵-۷-۱) تحلیل نمودارهای اگزرژی و انرژی در حالت تغییر دمای جریان شماره ۱

۱) با کاهش دمای جریان شماره ۱ راندمان حرارتی و اگزرژی چرخه افزایش می‌یابد و به همین دلیل است که نمودارهای مرتبط با دمای (-۴۰) بالاترین راندمان را بین سه گروه دمایی مورد مطالعه دارد. دلیل این امر این است که با کاهش دمای جریان شماره ۱ بازیابی حرارتی بالاتری در مبدل شماره ۲ صورت می‌گیرد و موجب افزایش راندمان حرارتی و اگزرژی می‌گردد (تولید کار بیشتر معادل تولید اگزرژی خروجی بیشتر است).

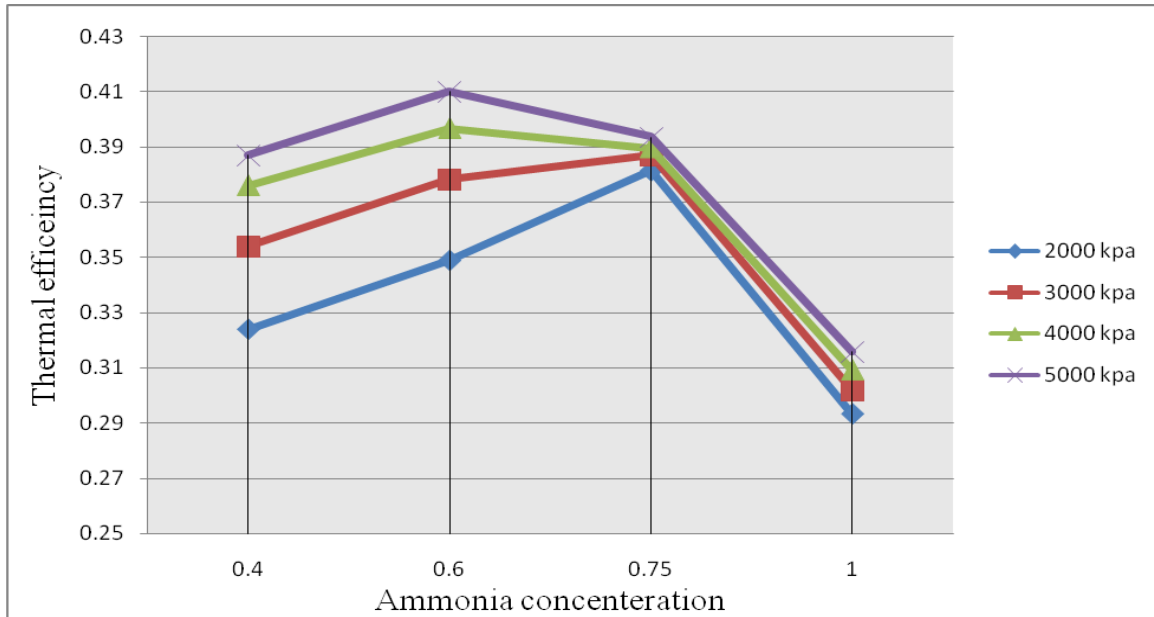
۲) بیشترین راندمان حرارتی در غلظت آمونیاک ۱ دیده می‌شود و کمترین راندمان حرارتی در غلظت ۰,۸ آمونیاک.

۳) بیشترین راندمان اگزرژی در غلظت آمونیاک ۱ دیده می‌شود و کمترین راندمان اگزرژی در غلظت ۰,۶ آمونیاک دیده می‌شود.

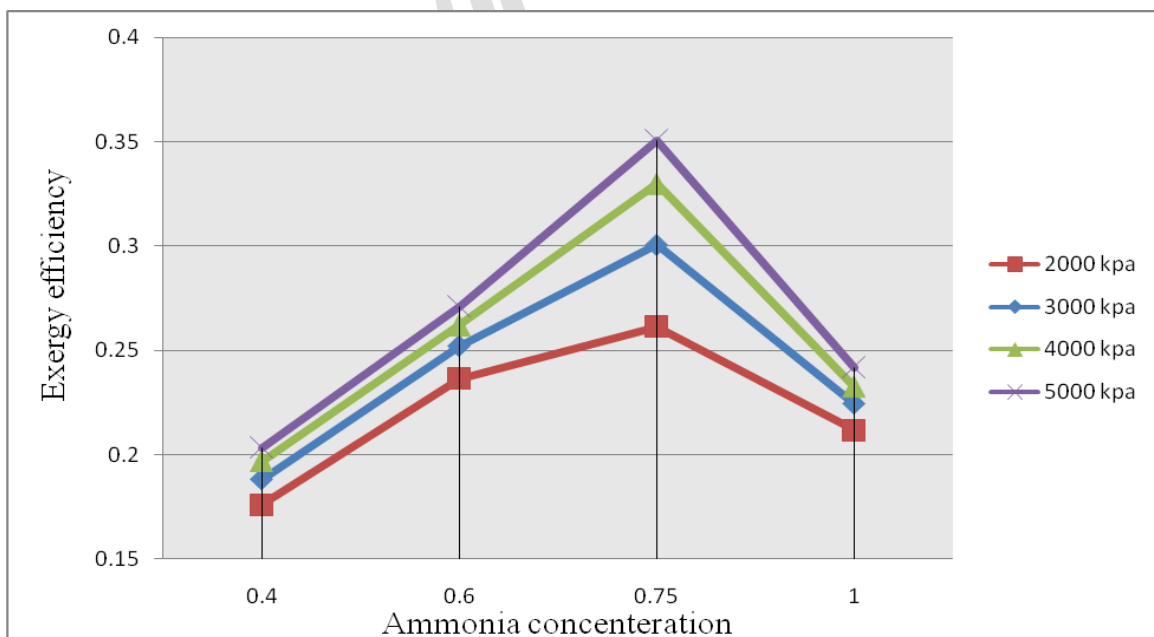
۴) در برخی نقاط نمودار دچار شکستگی در روند صعود می‌باشد که به دلیل محدودیت‌های ترمودینامیکی می‌باشد. این محدودیت‌ها شامل: ورود بخار به پمپ، عدم رعایت حداقل دمایی بین جریانی (CrossPinch) و... است.

در تحلیل بعدی تغییرات راندمان چرخه را نسبت به تغییر فشار گاز ورودی به توربین دوم، مورد بررسی قرار می‌دهیم:

به این صورت که فشار جریان شماره ۷ را در بازه ۲ الی ۵ مگاپاسکال تغییر می‌کند و نتایج زیر بدست آمده است. باقی شرایط اساسی چرخه ثابت فرض می‌شود.  
نمودارهای زیر از نتایج این بررسی حاصل شده است:



شکل (۵-۱۰): تاثیر فشار  $P_{L3}$  بر راندمان حرارتی چرخه شماره ۳ ( $T_{N1} = -40^{\circ}C, P_{L4} = 0.4MPa$ )



شکل (۵-۱۱): تاثیر فشار  $P_{L3}$  بر راندمان اگزرژی چرخه شماره ۳ ( $T_{M1} = -40^{\circ}C, P_{L4} = 0.4MPa$ )

## ۵-۷-۲) تحلیل نمودارهای اگزرژی و انرژی در حالت تغییر فشار جریان شماره ۷

۱) با افزایش فشار جریان شماره ۷ راندمان حرارتی و اگزرژی چرخه افزایش می‌یابد و به همین دلیل است که نمودارهای مرتبط با فشار ۵ مگاپاسکال بالاترین راندمان را بین چهار گروه فشاری مورد مطالعه دارد. دلیل این امر این است که با افزایش فشار گاز ورودی به توربین مقدار کار تولیدی افزایش می‌یابد و میزان راندمان بالاتر می‌رود (تولید کار بیشتر معادل تولید اگزرژی خروجی بیشتر است).

۲) بیشترین راندمان حرارتی در غلظت آمونیاک ۰,۶ دیده می‌شود و کمترین راندمان حرارتی در غلظت ۱ آمونیاک دیده می‌شود.

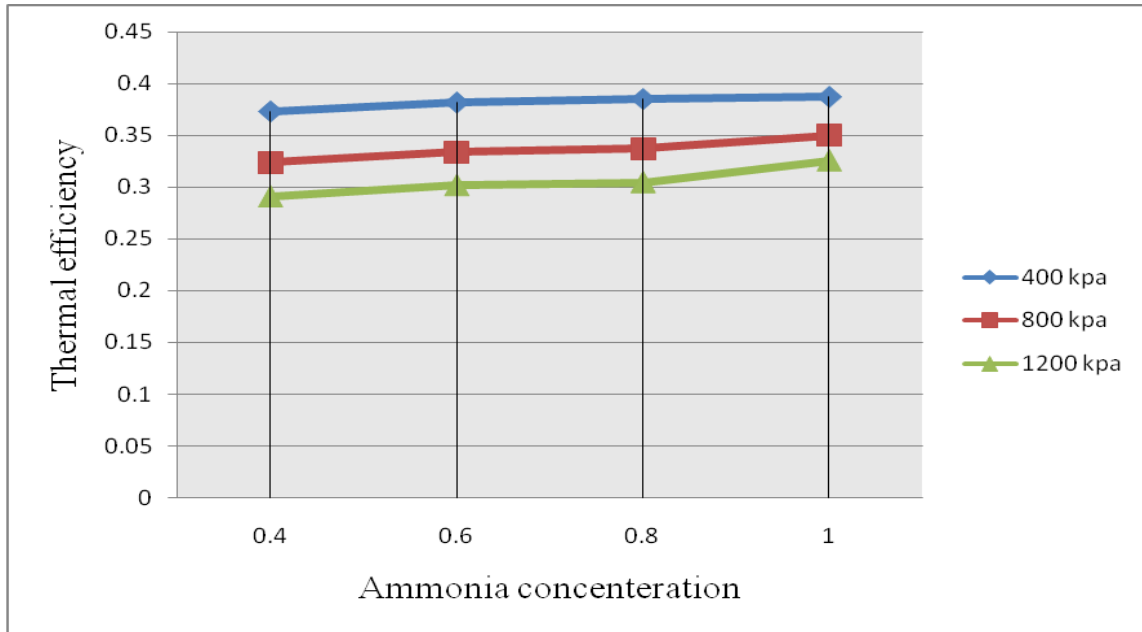
۳) بیشترین راندمان اگزرژی در غلظت آمونیاک ۰,۷۵ دیده می‌شود و کمترین راندمان اگزرژی در غلظت ۰,۴ آمونیاک دیده می‌شود.

۴) در برخی نقاط نمودار دچار شکستگی در روند صعود می‌باشد که به دلیل محدودیت‌های ترمودینامیکی می‌باشد. این محدودیت‌ها شامل: ورود بخار به پمپ، عدم رعایت حداقل دمایی بین جریانی (Cross Pinch) و... است.

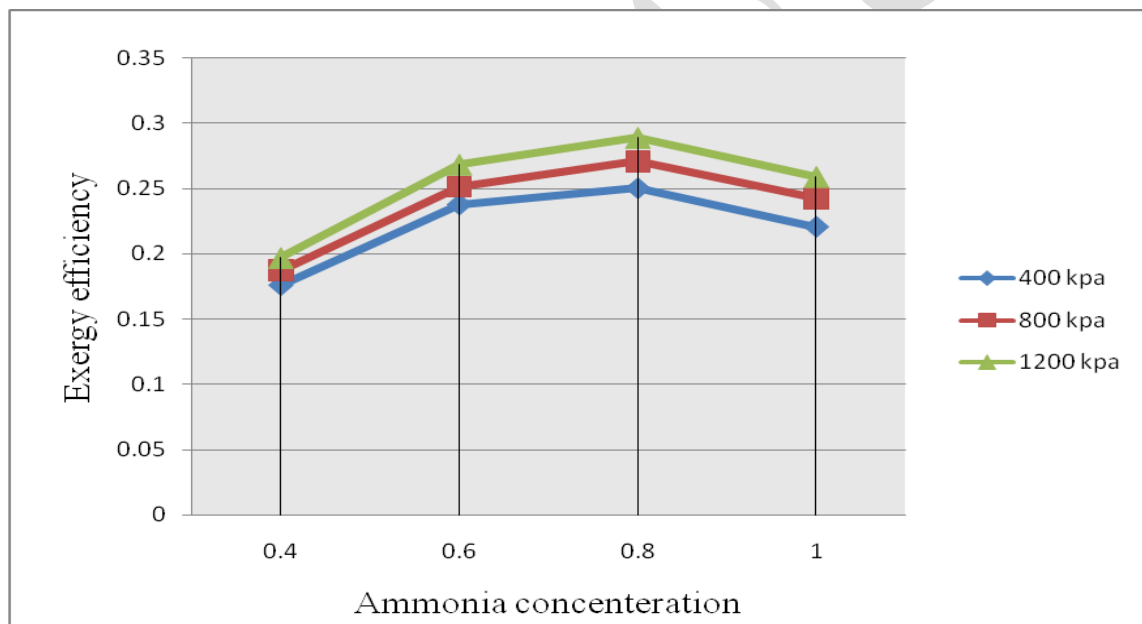
در تحلیل بعدی تغییرات راندمان چرخه را نسبت به تغییر فشار گاز خروجی از توربین دوم، مورد بررسی قرار می‌دهیم:

به این صورت که فشار جریان شماره ۸ را در بازه ۴۰۰ الی ۱۲۰۰ کیلوپاسکال تغییر می‌کند و نتایج زیر بدست آمده است. باقی شرایط اساسی چرخه ثابت فرض می‌شود.

نمودارهای زیر از نتایج این بررسی حاصل شده است:



شکل (۵-۱۲): تاثیر فشار  $P_{L4}$  بر راندمان حرارتی چرخه شماره ۳ ( $T_{M1} = -40^{\circ}C, P_{L3} = 4MPa$ )



شکل (۵-۱۳): تاثیر فشار  $P_{L4}$  بر راندمان انرژی چرخه شماره ۳ ( $T_{M1} = -40^{\circ}C, P_{L3} = 4MPa$ )

### ۵-۷-۳ تحلیل نمودارهای انرژی و انرژي در حالت تغییر فشار جریان شماره ۸

(۱) با افزایش فشار جریان شماره ۸ راندمان حرارتی چرخه کاهش می‌یابد در حالی که با

افزایش فشار جریان شماره ۸ راندمان انرژی چرخه افزایش می‌یابد (افزایش فشار جریان

شماره ۸ یعنی تولید کار کمتر چرخه اما در عمل اگزرژی خروجی از چرخه به دلیل افزایش فشار افزایش یافته است).

(۲) بیشترین راندمان حرارتی در غلظت آمونیاک ۱ دیده می‌شود و کمترین در غلظت ۰,۴ آمونیاک دیده می‌شود.

(۳) بیشترین راندمان اگزرژی در غلظت آمونیاک ۰,۸ دیده می‌شود و کمترین در غلظت ۰,۴ آمونیاک دیده می‌شود.

(۴) در برخی نقاط نمودار دچار شکستگی در روند صعود می‌باشد که به دلیل محدودیت‌های ترمودینامیکی می‌باشد. این محدودیت‌ها شامل: ورود بخار به پمپ، عدم رعایت حداقل دمایی بین جریانی (CrossPinch) و... است.

پایان  
پرسش  
پژوه



## پیشنهادها

به عزیزانی که تمایل دارند در راستای ارتقای اهداف مورد نظر در این پایان نامه فعالیت نمایند، موارد زیر پیشنهاد می‌شوند:

- از هوای خروجی از مبدل برای تولید بخار با فشار پایین می‌توان بهره برد و از آن در تولید آب شیرین در آب شیرین کن استفاده کرد.
- تحلیل اقتصادی در کنار تحلیل ترمودینامیکی، توجیه اقتصادی از سیستم تولید همزمان را افزایش داده بنابراین توصیه می‌شود در صورت امکان تحلیل‌های ترمودینامیکی با تحلیل‌های اقتصادی ترکیب شده و نتایج مورد بررسی قرار گیرد.
- این سیکل ترکیبی قابلیت کوپل با سیستم‌های زباله سوز شهری را دارد. داشتن طرحی توجیهی برای ساخت این نوع از زباله سوزها می‌تواند این پروژه را به سرآغازی برای یک طرح بزرگ ملی در راستای بهبود مصرف انرژی بگرداند.
- می‌توان قابلیت ترکیب زباله سوزهای بیمارستانی را با یک سیکل تولید همزمان برای تامین بخشی از انرژی بیمارستان مورد بررسی قرار داد. نکته مهم در مورد این زباله سوزها این است که خروجی آنها نمی‌تواند وارد اتمسفر بشود زیرا از آلاینده‌گی بالایی برخوردار می‌باشد.
- می‌توان با استفاده از موادی با خاصیت ضد خوردگی بالا در خطوط انتقال بخار سوپرهمیت دمای مخلوط آب و آمونیاک را بالاتر برده و تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی را بررسی نمود.

مراجع

- [1] EXERGY Energy, Environment and Sustainable Development, June 2007, MARC A.ROSEN & IBRAHIM DINCER
- [2] Introduction to CHP Technologies, [www.esru.strath.ac.uk](http://www.esru.strath.ac.uk), 2002
- [3] Zoran Milosevic & Wade Cowart, Refinery energy efficiency and environmental goals, 2002, [www.eptq.com](http://www.eptq.com)
- [4] J. H. Horlock, COGENERATION: COMBINED HEAT AND POWER (CHP), PERGAMON PRESS, 1987
- [5] Nishio, M., Itoh, J. and Umeda, T.; A thermodynamic approach to steam power system design, Ind Eng Chem Proc Des Dev 19(2): 306. 1980.
- [6] H. Kimura and X.X. Zhu; R-Curve concept and its application for industrial energy management, Ind Eng Chem Res, 39: 2315-2335., 2000
- [7] Air Quality Engineering, CE 218A, W. Nazaroff and R. Harley, University of California Berkeley, 2007.
- [8] Waste to Energy in Denmark , publication by Ramboll (2006)
- [9] Kleis, Heron and Dalager, Søren (2004) 100 Years of Waste Incineration in Denmark , A historical review of incineration in Denmark.
- [10] Danish Energy Statistics 2005 by the Danish Ministry of Energy.
- [11] Vestforbrænding anlag 6 - Danmarks største forbrændingsovn , Brochure (in Danish) on the largest incineration line in Europe, 2004
- [12] Rotary-kiln incinerators an excellent detailed description of rotary-kiln incinerators
- [13] Tchobanoglous.G,H. Theisen, S.Vigil-Integrated Solid Waste Management- McGraw Hill-1993
- [14] Robinson. W.D. -The Solid Waste Handbook-John Wiley & Sons, Inc-1986
- [15] Utilizing the Cold Potential in LNG Regasification Terminal: Potential for Industrial Symbiosis; A.M. Al Taweel and R. Cote, Dalhousie University, Halifax NS.
- [16] INTRODUCTION TO LNG; Institute for Energy, Law & Enterprise, University of Houston Law Center
- [17] Ogawa K. Outline of political consideration of waste to power generation in Japan in comparison with the situation in Europe and America. J Japan Inst Egy 1998; 77(854):460-71.
- [18] Miyazaki T, Akisawa A, Kashiwagi T. LNG cold energy cycle. Proc. JSRAE, 1998:157-160.
- [19] T. Miyazaki, Y.T. Kang \*, A. Akisawa, T. Kashiwagi; A combined power cycle using refuse incineration and LNG cold energy, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Nakacho, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan