دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

گرایش سیستم‌های انرژی

ارائه روش تحلیل ترموانوایرونومیک در تحلیل سیستم‌های حرارتی و به‌کارگیری آن در یک مسئله نمونه

استاد راهنما:

دکتر حسین صیادی

نگارش:

وحید دهقان نیری

پروژه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک

بهمن ماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

ارائه روش تحلیل ترموانوایرونومیک در تحلیل سیستم‌های حرارتی و بکارگیری آن در یک مسئله نمونه

چکیده

امروزه با توجه به محدودیت منابع انرژی تجدید ناپذیر، یافتن ساختار بهینه برای سیستم‌های تولید توان به شدت مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که در چند دهه‌ی اخیر کارهای بسیاری به منظور بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی انجام شده است. از طرفی با روند رو به رشد آلودگی‌های زیست محیطی در جهان امروز، محققان سعی بر تولید انرژی با کم‌ترین مقدار آلاینده‌ها را دارند. از آنجایی که هدف نهایی از بهینه‌سازی سیستم‌های مذکور دست یافتن به یک طرح بهینه قابل اجرا و عملی می‌باشد، لازم است که برای رسیدن به این هدف هر سه پارامتر ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست محیطی به صورت هم‌زمان مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گیرند. به این نوع بهینه‌سازی، بهینه‌سازی چند هدفه[1] گفته می‌شود.

هدف از انجام این پایان‌نامه، بهینه‌سازی چند هدفه سیستم‌های تولید هم‌زمان توان و حرارت به عنوان یکی از سیستم‌های انرژی پرکاربرد می‌باشد. توابع هدف مورد نظر در این بهینه‌سازی شامل تابع هدف اگزرژتیکی (ترمودینامیکی)، اقتصادی و اثرات محیطی می‌شود. برای این منظور سیستم تولید هم‌زمان معروف[2] *CGAM* که پیش از این با استفاده از روش‌های گرادیانی و ترمواکونومیکی و به صورت تک هدفه مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است، به عنوان یک مسئله محک انتخاب می‌گردد و به صورت دقیق در نرم‌افزار *MATLAB* مدل خواهد شد. سپس به‌وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک چند هدفه مورد بهینه-سازی قرار خواهد گرفت. بهینه‌سازی‌ها به صورت تک هدفه، دو هدفه و سه هدفه انجام خواهد شد، که بهینه‌سازی سه هدفه کامل‌ترین بهینه‌سازی خواهد بود. یکی از نوآوری‌های موجود در این پایان‌نامه، در

[1] Multi-Objective Optimization

[2] Christos Frangopoulos, George Tsatsaronis, Atonio Valero, Michael R. von Spakovsky

نظر گرفتن اثرات محیطی به صورت مستقیم در بهینه‌سازی سیستم مورد نظر می‌باشد. در ابتدا به منظور اعتبارسنجی[۳] مدل خود، به مقایسه نتایج بهینه‌سازی تک هدفه با نتایج حاصل از مطالعات پیشین خواهیم پرداخت. در ادامه بهینه‌سازی‌های چند هدفه صورت گرفته و نتایج این بهینه‌سازی‌ها با یکدیگر مقایسه خواهند شد. به علاوه در هر یک از بهینه‌سازی‌ها سعی می‌شود که یک نقطه کاری مناسب انتخاب شود.

نتایج نشان می‌دهد که بکارگیری روش بهینه‌سازی چند هدفه در سیستم‌های انرژی ضمن ایجاد قدرت پیش‌بینی و بهبود نتایج حاصل از تصمیمات مختلف، امکان تحلیل تعادل اهداف چندگانه و متناقض در سیستم‌های انرژی را نیز بدست می‌دهد. همچنین به کار گرفتن تابع اثرات محیطی به عنوان یک تابع هدف تأثیر زیادی در تحلیل سیستم خواهد داشت. و نتیجه گیری را دقیق‌تر کرده و موجب نزدیکی سیستم به یک سیستم واقعی و عملی می‌شود.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک، سیستم تولید هم‌زمان توان و حرارت، سیستم *CGAM*، تحلیل اگزرژوانوایرونومیک

[3] validation

تقدیم به

مهربان‌ترین، خواستنی‌ترین و دوست داشتنی‌ترین مخلوقین آفریدگار...

پدرم که قلب من است،

او برای زنده بودنم همواره می‌تپد.

مادرم که گل زندگی من است،

و به روحم طراوت می‌بخشد.

تقدیر و تشکر

با حمد و سپاس از آفریدگار متعال که همواره لطف و موهبتش را در زندگی احساس می‌کنم.

تشکر فراوان از پدر و مادر مهربانم که در تمامی دوران تحصیل حامی و مشوق من بوده‌اند. و با تشکر از همسر مهربانم که حمایتش مایع دلگرمی من است.

سپاس ویژه از استاد راهنمایم، جناب آقای دکتر حسین صیادی که در تمامی مراحل پژوهش، علم و رهنمودهایشان را از من دریغ نداشته‌اند.

تشکر فراوان از جناب آقایان دکتر ترابی و دکتر پورعلی که زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را بر عهده دارند.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول - مقدمه	
۱-۱-مقدمه	**۲**
۱-۲-انگیزه و ضرورت نیاز	**۲**
۱-۳-هدف و روش اجرا	**۳**
۱-۴-درباره پایان نامه	**۴**
فصل دوم- مروری بر پیشینه پژوهش	
۲-۱-مقدمه	**۶**
۲-۲-پیشینه‌ی روش اگزرژوانوایرونومیک	**۶**
فصل سوم- مبانی اگزرژوانوایرونومیک	
۳-۱-مقدمه	**۱۲**
۳-۲-تحلیل اگزرژی	**۱۳**
۳-۲-۱-اجزای اگزرژی	۱۴
۳-۲-۲-بالانس اگزرژی و تخریب اگزرژی	۱۹
۳-۲-۲-۱-بالانس اگزرژی در یک سیستم بسته	۲۰
۳-۲-۲-۲-بالانس اگزرژی برای حجم کنترل	۲۱
۳-۲-۲-۳-تخریب اگزرژی	۲۲
۳-۲-۳-متغیرهای اگزرژتیک	۲۵
۳-۳-تحلیل اقتصادی	**۲۹**
۳-۳-۱-تخمین هزینه سرمایه گذاری	۳۰
۳-۳-۲-محاسبه نیازهای درآمدی	۳۲

۳-۳-۳-هزینه‌های همسطح شده ۳۳
۳-۳-۴-تحلیل حساسیت ۳۵
۳-۴-تحلیل ترمواکونومیک ۳۶
۳-۴-۱-هزینه گذاری اگزرژی ۳۷
۳-۴-۲-بالانس هزینه ۳۸
۳-۴-۳-معادلات کمکی تعیین هزینه ۴۲
۳-۵-ارزیابی ترمواکونومیکی ۴۵
۳-۵-۱-متغیرهای ترمواکونومیکی ۴۶
۳-۵-۲-ارزیابی طراحی ۵۰
۳-۶-تحلیل چرخه عمر (LCA) ۵۱
۳-۷-ارزیابی اگزرژوانوایرومنتال ۵۳
۳-۷-۱-بالانس اگزرژوانوایرومنتال ۵۴
۳-۷-۲-ارزیابی اگزرژوانوایرومنتال ۵۷
فصل چهارم- الگوریتم‌های تکاملی، ژنتیکی و بهینه‌سازی چندهدفه
۴-۱-مقدمه ۶۰
۴-۲-الگوریتمهای ژنتیک ۶۱
۴-۲-۱-مزایا و برتریهای الگوریتم ژنتیک ۶۳
۴-۲-۲-معایب الگوریتم ژنتیک ۶۵
۴-۳-الگوریتم‌های تکامل‌پذیر بهینه‌سازی چند هدفه ۶۶
۴-۳-۱-فرآیند تصمیم‌سازی ۶۸
فصل پنجم- مدل‌سازی سیکل‌های تولید هم‌زمان توان و حرارت
۵-۱-مقدمه ۷۱

۵-۲-کلیاتی درباره مدل‌سازی سیستم‌ها ۷۱

۵-۳-مدل‌سازی سیستم CGAM ۷۳

۵-۳-۱-معرفی سیستم CGAM ۷۳

۵-۳-۲-مدل‌سازی ترمودینامیکی و تحلیل اگزرژی ۷۵

۵-۳-۲-۱-فرضیات ۷۵

۵-۳-۲-۲-اطلاعات ورودی ۷۶

۵-۳-۲-۳-متغیرهای تصمیم‌گیری ۷۶

۵-۳-۲-۴-متغیرهای وابسته ۷۷

۵-۳-۲-۵-معادلات حاکم ۷۸

۵-۳-۲-۶-تحلیل‌اگزرژی ۸۵

۵-۳-۳-مدل‌سازی اقتصادی و تحلیل اگزرژواکونومیک ۹۷

۵-۳-۴-مدل‌سازی آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از احتراق ۱۰۳

۵-۳-۵-مدل‌سازی محیطی و تحلیل اگزرژوانوایرومنتال ۱۰۵

فصل ششم- نتایج

۶-۱-اعتبار سنجی ۱۱۲

۶-۲-بهینه سازی تک هدفه ۱۱۵

۶-۳-بهینه سازی دو هدفه ۱۱۹

۶-۳-۱-بهینه سازی دو هدفه هزینه و راندمان اگزرژتیک ۱۲۰

۶-۳-۲-بهینه‌سازی دوهدفه هزینه و اثرات محیطی ۱۲۳

۶-۳-۳-بهینه‌سازی دوهدفه بازده اگزرژتیک و اثرات محیطی ۱۲۵

۶-۴-بهینه سازی سه هدفه ۱۲۷

فصل هفتم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱-نتیجه گیری ۱۳۸
۷-۲-پیشنهادات ۱۳۸
پیوست ۱۴۰
مراجع ۱۴۵

فهرست جداول

عنوان		صفحه
جدول ۳-۱	مقادیر اگزرژی شیمیایی استاندارد مولار مواد مختلف در P_{ref} و $298.15\ K$	۱۷
جدول ۳-۲	نرخ اگزرژی جریان‌های سوخت و محصول برای محاسبه راندمان اگزرژتیک تجهیزات فرآیندی در شرایط عملکرد پایدار [۱۵].	۲۷
جدول ۴-۱	مقدار تابع هدف و ارزندگی نسبی	۷۱
جدول ۵-۱	ثوابت بکار رفته در رابطه‌های (۵-۱۰۸) تا (۵-۱۱۲)	۱۰۲
جدول ۵-۲	مقادیر نرخ اثرات محیطی، توان و انتقال حرارت مرجع [۱۳] در محاسبه نرخ‌های جدید.	۱۰۹
جدول ۵-۳	توابع هدف، متغیرهای تصمیم و محدوده متغیرهای تصمیم	۱۱۰
جدول ۶-۱	مقایسه مقادیر متغیرهای وابسته بدست آمده از مدل با مقادیر موجود در [۱۵] برای حالت طراحی پایه	۱۱۲
جدول ۶-۲	مقایسه مقادیر نرخ اگزرژی و هزینه جریان‌های بدست آمده از مدل با مقادیر موجود در [۱۵] برای حالت طراحی پایه	۱۱۳
جدول ۶-۳	مقایسه مقادیر راندمان اگزرژتیک کل و نرخ کلی هزینه تولید محصولات بدست آمده از مدل با مقادیر موجود در [۱۵] برای حالت طراحی پایه	۱۱۴
جدول ۶-۴	مقایسه مقادیر نرخ اثرات محیطی جریان‌های بدست آمده از مدل با مقادیر موجود در [۱۳] برای حالت طراحی پایه	۱۱۴
جدول ۶-۵	مقایسه مقادیر بدست آمده برای متغیرهای تصمیم گیری و توابع هدف در بهینه‌سازی تک هدفه توابع راندمان اگزرژتیک، هزینه کلی محصولات و اثرات زیست محیطی.	۱۱۷

جدول ۶-۶ مقایسه مقادیر توابع هدف و متغیرهای تصمیم گیری در حالت طراحی پایه با نقطه بهینه حاصل از بهینه‌سازی دوهدفه(بازده-هزینه محصولات) ۱۲۱

جدول ۶-۷ مقایسه مقادیر توابع هدف و متغیرهای تصمیم گیری در حالت طراحی پایه با نقطه بهینه حاصل از بهینه‌سازی دوهدفه(اثرات محیطی-هزینه محصولات) ۱۲۴

جدول ۶-۸ مقایسه مقادیر توابع هدف و متغیرهای تصمیم گیری در حالت طراحی پایه با نقطه حاصل از بهینه‌سازی دوهدفه(بازده-اثرات محیطی) ۱۲۶

جدول ۶-۹ مقایسه مقادیر توابع هدف و متغیرهای تصمیم گیری در حالت طراحی پایه با نقطه بهینه حاصل از بهینه‌سازی سه هدفه ۱۳۰

جدول ۶-۱۰ مقایسه مقادیر هزینه‌های سرمایه گذاری، در حالت طراحی پایه با مقادیر بدست آمده در نقطه بهینه حاصل از بهینه‌سازی سه هدفه مسئله CGAM ۱۳۱

جدول ۶-۱۱ مقایسه مقادیر هزینه‌های سرمایه گذاری، در حالت طراحی پایه با مقادیر بدست آمده در نقطه بهینه حاصل از بهینه‌سازی سه هدفه مسئله CGAM ۱۳۲

جدول ۶-۱۲ مقایسه فاکتورهای اگزرژواکونومیک برای مسئله CGAM در حالت طراحی پایه با مقادیر بدست آمده از نقطه بهینه شده. ۱۳۳

جدول ۶-۱۳ مقایسه فاکتورهای اگزرژوانوایرومنتال برای مسئله CGAM در حالت طراحی پایه با مقادیر بدست آمده از نقطه بهینه شده. ۱۳۴

جدول ۱ تغییرات حرارت مخصوص، آنتالپی مخصوص، آنتروپی مطلق مخصوص و تابع گیبس با دما و در فشار 1bar برای مواد مختلف ۱۴۲

جدول ۲ پارامترها و فرضیات استفاده شده در روش TRR برای تحلیل اقتصادی سیستم CGAM ۱۴۳

جدول ۳ ثابت‌های مورد استفاده در روابط مربوط به محاسبات دمای آدیاباتیک شعله در ناحیه ورودی محفظه احتراق توربین گاز. ۱۴۴

فهرست اشکال

عنوان		صفحه
شکل 3-1	وسیله‌ای برای ارزیابی اگزرژی شیمیایی یک سوخت[17].	18
شکل 3-2	پروفیل دما و دمای متوسط ترمودینامیکی برای دو جریان که از یک مبدل حرارتی آدیاباتیک در فشار ثابت عبور می‌کنند[19].	23
شکل 3-3	شماتیک یک جزء از سیستم برای نمایش بالانس هزینه	38
شکل 3-4	شماتیک یک مولد بخار برای نمایش حالت (ب) در مثال 2	45
شکل 3-5	ارتباط بین هزینه سرمایه گذاری و تخریب اگزرژی (راندمان اگزرژتیک) برای جزء kام یک سیستم حرارتی[17].	48
شکل 3-6	ساختار کلی و روش Eco-indicator99 در تحلیل چرخه عمر[6].	52
شکل 3-7	ساختار کلی روش اگزرژوانوایرومنتال [6].	53
شکل 4-1	تقسیم‌بندی تکنیک‌های هوش محاسباتی (مصنوعی)	60
شکل 4-2	ساختار کلی حل مسائل به کمک الگوریتم ژنتیک[26]	62
شکل 4-3	انتخاب کیفیت و هزینه تولید به صورت مسئله بهینهسازی چند هدفه	68
شکل 5-1	دیاگرام جریان سیستم تولید هم‌زمان CGAM	74
شکل 5-2	پروفیل دمایی در پیش گرمکن هوا و بویلر بازیاب سیستم CGAM	74
شکل 6-1	نمودار همگرایی تابع هزینه	116
شکل 6-2	مقایسه بازده اگزرژتیک در نقاط بهینه بدست آمده در بهینه‌سازی‌های یک هدفه	118
شکل 6-3	مقایسه نرخ هزینه محصولات در نقاط بهینه بدست آمده در بهینه سازی‌های یک هدفه	118
شکل 6-4	مقایسه نرخ اثرات محیطی در نقاط بهینه بدست آمده در بهینه سازی‌های	119

یک هدفه

شکل 6-5 جبهه بهینه پارتو جهت بهینه‌سازی دو هدفه (بازده-هزینه محصولات) مسئله $CGAM$ 120

شکل 6-6 مقایسه بازده اگزرژتیک در نقاط بهینه بدست آمده در بهینه‌سازی‌دو هدفه اگزرژواکونومیک و طراحی پایه 122

شکل 6-7 مقایسه نرخ هزینه محصولات در نقاط بهینه بدست آمده در بهینه‌سازی‌دو هدفه اگزرژواکونومیک و طراحی پایه 122

شکل 6-8 جبهه بهینه پارتو جهت بهینه‌سازی دو هدفه(اثرات محیطی-هزینه محصولات) مسئله $CGAM$ 123

شکل 6-9 جبهه بهینه پارتو جهت بهینه‌سازی دو هدفه (بازده-اثرات محیطی) مسئله$CGAM$ 125

شکل 6-10 روند همگرایی کروموزوم‌ها به سمت ناحیه بهینه نهایی 128

شکل 6-11 نمودار سه بعدی جبهه پارتو برای بهینه‌سازی سه هدفه 129

شکل 6-12 مقدار تابع هدف بازده اگزرژتیک در بهینه‌سازی‌های انجام شده 135

شکل 6-13 مقدار تابع هدف هزینه محصولات در بهینه‌سازی‌های انجام شده 135

شکل 6-14 مقدار تابع هدف اثرات محیطی در بهینه‌سازی‌های انجام شده 136

فهرست علائم و اختصارات

اختصارات

CC	Carrying Charges
CELF	Constant Escalation Levelization Factor
CRF	Capital Recovery Factor
DM	Decision Making
EA	Evolutionary Algorithm
ECT	Exergetic Cost Theory
EFA	Engineering Functional Analysis
FC	Fuel Cost
GA	Genetic Algorithm
IFA	Intelligent Functional Approach
MADM	Multi Attribute Decision Making
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MODM	Multi Objective Decision Making
MOEA	Multi Objective Evolutionary Algorithm
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
NSGA II	Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
OMC	Operating & Maintenance Cost
PEC	Purchased Equipment Cost
TFA	Thermoeconomic Functional Approach
TRR	Total Revenue Requirement
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithm

علائم

A	ثابت
$a_i (i=1,2,3)$	ثابت
$b_i (i=1,2,3)$	ثابت
$c_i (i=1,2,3)$	ثابت
c	هزینه مخصوص
$\dot{C}$	نرخ هزینه
e	اگزرژی مخصوص
$\overline{e}$	اگزرژی مخصوص مولار
$\dot{E}$	نرخ اگزرژی
h	آنتالپی مخصوص
$\overline{h}$	آنتالپی مخصوص مولار
H	آنتالپی
HHV	ارزش حرارتی بالای سوخت

ارزش حرارتی پایین سوخت	LHV
دبی جرمی	$\dot{m}$
دبی مولار	$\dot{n}$
فشار	p
آنتروپی مخصوص	s
آنتروپی مخصوص مولار	$\bar{s}$
آنتروپی	S
دما	T
توان	$\dot{W}$
نام متغیر- کسر مولی	x
نام متغیر	y
ارتفاع- نام متغیر	z
نرخ هزینه های مرتبط با سرمایه گذاری	$\dot{Z}$

حروف یونانی

ثابت	α
ثابت	β
ثابت	λ
نسبت مولار هوا به سوخت	$\overline{\lambda}$
ثابت	σ
نسبت اکی والانی سوخت به هوا	ϕ
دمای بی بعد	θ
فشار بی بعد	π
نسبت تعداد اتمهای کربن به هیدروژن	ψ
تعداد ساعات عملکرد سیستم در حالت تمام بار و در طی یک سال- زمان نشست	τ
راندمان اگزرژتیک	ε
راندمان ایزنتروپیک توربین	η_{st}
راندمان ایزنتروپیک کمپرسور	η_{sc}
ضریب فعالیت	γ

زیرنویسها

هوا	a

AC	کمپرسور هوا
APH	پیش گرمکن هوا
app	اختلاف دمای approach
CC	محفظه احتراق
CO	گاز مونوکسید کربن
CH_4	گاز متان
cv	حجم کنترل
D	تخریب اگزرژی
e	جریان خروجی
ec	اکونومایزر
env	محیط زیست
ev	اواپراتور
F	سوخت
fr	اصطکاکی
fuel	سوخت متان
gas phase	فاز گازی
GT	توربین گاز
HRSG	بویلر بازیاب
i	جریان ورودی
ig	گاز ایده آل
in	ورودی
k	جز k ام
L	اتلاف اگزرژی- تعدیل شده
lm	لگاریتمی
ms	جریان جرمی
NET	خالص
NOx	اکسیدهای نیتروژن
other	سایر تجهیزات فرعی سیستم
out	خروجی
P	محصول
pinch	نقطه پینچ (گلوگاه)
power	توان
pz	ناحیه ورودی محفظه احتراق

شرایط مرجع	ref
بخار	steam
سیستم	sys
کلی	tot
بخار	*v*
متغیر	var

بالا نویسها

هوا	air
شیمیایی	CH
هزینه سرمایه گذاری	CI
جنبشی	KN
جهش ژنی	Mut
عملکرد و نگهداری	OM
فیزیکی	PH
محصول	product
پتانسیل	PT
شرایط مرجع	ref
اجتناب ناپذیر	UN
مربوط به هزینه سرمایه گذاری	Z

۱- مقدمه

۱ - ۱ - مقدمه

کامیابی و موفقیت جوامع در دست‌یابی به اهداف توسعه پایدار در گرو دسترسی به منابع ارزان و پایدار انرژی، استفاده صحیح و بهینه از منابع انرژی تجدیدناپذیر موجود و همچنین محیط زیست سالم است. در این راستا وظیفه دولت‌ها تصمیم سازی صحیح با توجه به شرایط اجتماعی، متغیرهای اقتصادی و عوامل فنی و فناوری می‌باشد. طیف گسترده‌ای از موضوعات در حوزه‌ی سیستم‌های انرژی وجود دارند که در فرآیندهای بهینه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند. افزایش راندمان انرژی، کاهش هزینه‌های اقتصادی و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی از جمله اهداف قابل ذکر در این زمینه هستند که هم در مراحل طراحی سیستم‌های انرژی و هم در فرآیند بازسازی[1] این سیستم‌ها به وسیله مهندسین طراح، متخصصان انرژی و مدیران صنایع مورد توجه قرار می‌گیرند.

از آنجایی که روش‌های بهینه‌سازی حاضر به دلیل عدم توانایی در منظور نمودن این اهداف متناقض و غیر هم مقیاس برای استناد تصمیم سازان می‌باشند، در این پایان نامه به چگونگی تحلیل، مدل‌سازی و بهینه‌سازی چند هدفه[2] سیستم‌های تولید هم‌زمان توان و حرارت به عنوان یکی از سیستم‌های انرژی پرکاربرد پرداخته شده است. با روش مذکور تصمیم سازان می‌توانند ضمن منظور نمودن اهداف پیچیده و متناقض، کیفیت نتایج حاصل از تصمیم گیری‌ها را نیز پیش بینی کرده و آن را بهبود بخشند.

۱ - ۲ - انگیزه و ضرورت نیاز

انگیزه اولیه در انجام این پایان‌نامه نیاز به بهینه‌سازی و طراحی سیستم‌های انرژی با ملاحظه اهداف و محدودیت‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی است. یکی از مسائل پیچیده در تحلیل

[1] Retrofit

[2] Multi Objective