دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی یک سیستم تولید همزمان حرارت، سرما و برق ...

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو :

علی مومن زاده

استاد راهنما :

دکتر علی کشاورزولیان

آبان ۱۳۹۲

دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی یک سیستم تولید همزمان حرارت، سرما و برق (CCHP) مسکونی با موتور رفت و برگشتی گاز سوز و سیستم گرمایش خورشیدی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو :

علی مومن زاده

استاد راهنما :

دکتر علی کشاورزولیان

آبان ۱۳۹۲

تقدیم به :

پدر و مادر بزرگوارم

بزرگانی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند و در سایه وجودشان توانستم در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

بسمه تعالی

تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	**تأییدیه هیأت داوران**	**شماره:** **تاریخ:**

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان :

.....

.....

.....

توسط آقای / خانم ..... ، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ..... گرایش ..... در تاریخ ...../...../.....۱۳ مورد تأیید قرار می‌هند.

۱- استاد راهنمای اول	جناب آقای / سرکار خانم دکتر	امضاء
۲- استاد راهنمای دوم	جناب آقای / سرکار خانم دکتر	امضاء
۳- استاد مشاور	جناب آقای / سرکار خانم دکتر	امضاء
۴- ممتحن داخلی	جناب آقای / سرکار خانم دکتر	امضاء
۵- ممتحن داخلی	جناب آقای / سرکار خانم دکتر	امضاء
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	جناب آقای / سرکار خانم دکتر	امضاء

بسمه تعالی

تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	**اظهارنامه دانشجو**	**شماره:** **تاریخ:**

اینجانب ..... **دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته** .....

گرایش ..... **دانشکده** ..... دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

.....

.....

.....

.....

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای / سرکار خانم دکتر ..... ، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت واصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

۴۲۱۷-۱۳۸۷/۱۰/۲۹

بسمه تعالی

تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	**حق طبع و نشر و مالکیت نتایج**	**شماره:** **تاریخ:**

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.
ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی باشد.

***توجه:**

این فرم می بایست بعد از تکمیل، در نسخ نکثیر شده قرار داده شود.

تشکر و قدردانی :

پروردگار را شاکرم که نعمت تحصیل علم و پژوهش را به من ارزانی داشته است. اکنون که با یاری خداوند بزرگ و تلاش های خالصانه اساتید گرانقدر و شکیبایی خانواده ام ، تحصیلات مقطع کارشناسی ارشد را به پایان رسانده ام ، بر خود واجب می دانم که بزرگواری های همه این عزیزان را سپاس گویم.

در انجام پروژه حاضر، بزرگواران زیادی مساعدت نموده اند که در این میان بیش از همه زحمات استاد ارجمندم ، جناب آقای دکتر کشاورز ولیان و دانشجوی مقطع دکترای ایشان ، جناب آقای دکتر ابراهیمی که هدایت های استادانه شان در این پژوهش بسیار راه گشا بود را ارج می نهم . همچنین از تمامی دوستان که در این راه مرا یاری نموده اند ، خالصانه تشکر می نمایم و برای همگان آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

چکیده :

رشد بی رویه مصـرف انـرژی در کشـور، الگـوی نادرسـت مصـرف و رانـدمان پـایین نیروگـاه هـا و واحدهای حرارتی، موجب تبدیل ایران از یک صادرکننده انرژی به کشوری واردکننده خواهـد شـد. برای مقابله با این تهدید، اجرای طرح های بهینه سازی بخـش عرضـه انـرژی ضـروری مـی باشـد. راهکارهای بهینه سازی متعددی در این بخش مطرح است که از جمله آنهـا مـی تـوان بـه اجـرای طرح های تولید همزمان برق، گرما و سرما اشاره نمود. به طور کلی، بهره وری بسیار خوب از انرژی سوخت اولیه، جنبه های مثبت زیست محیطی، بازگشت سریع سرمایه، کاهش هزینه هـای تـامین انرژی اولیه، هزینه های پایین تر تعمیرات و نگهداری و تامین انرژی الکتریسیته با کیفیت بـالاتر و توسعه پدافند غیرعامل از امتیازات درخشان اینگونه سیستم ها می باشد.

تعیین اندازه محرک اصلی مهمترین شاخص طراحی سیستم های تولید همزمان می باشـد. انـدازه محرک اصلی، میزان صرفه جویی در مصرف سوخت، بازده کلی، میزان کاهش انتشار آلاینـده هـای زیست محیطی، متغیرهای اقتصادی و اسـتراتژی بهینـه بـه کـار رفتـه بـه منظـور تـأمین بارهـای الکتریکی یا حرارتی را تغییر می دهد.

در مطالعه حاضر تابع چند ضابطه ای تعیین اندازه، به منظور طراحی بهینه سیستم تولید همزمـان مسکونی با محرک اصلی موتور رفت و برگشتی گـاز سـوز و سیسـتم گرمـایش خورشـیدی (جمـع کننده سهمی شکل مرکب) مورد استفاده قرار گرفته است. در تابع چنـد ضـابطه ای تعیـین انـدازه (MCSF)، نسبت ذخیره انرژی سوخت و بازده انرژی به عنـوان پارامترهـای ترمودینـامیکی، ارزش خالص کنونی، نرخ داخلی بازگشت و دوره بازگشت سرمایه برای زیرمعیارهـای اقتصـادی و نسـبت کاهش CO_2، CO و NO_X به منظور ارزیابی های زیست محیطـی مـد نظـر قـرار گرفتـه اسـت. در نهایت با استفاده از این تابع، اندازه محرک اصلی چرخه CCHP مسکونی پیشنهادی تعیین و تـاثیر استفاده از جمع کننده سهمی شکل مرکب تحلیل گردیده است.

نتایج بدست آمده نشان می دهد که عـلاوه بـر کـاهش انتشـار آلاینـــده هـای CO_2، CO و NO_X، استفاده از سیستم گرمایش خورشیدی موجب کاهش مصرف سوخت و افزایش بـازده اگـزرژی نیـز میگردد. اما در حوزه اقتصادی ، به علت هزینه اولیـه بسـیار بـالای سیسـتم گرمـایش خورشـیدی، سوددهی، مخاطره پذیری و دوره بازگشت سرمایه اولیه پروژه با محـدودیت هـای بیشـتری مواجـه می شود.

واژگان کلیدی : تولید همزمان، مسکونی، موتور رفت و برگشتی ، جمع کننده سهمی شکل مرکب، تعیین اندازه

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه ای بر تولید همزمان ۱

۱-۱- دلایل و فواید اجرای طرح ۲

۱-۲- آشنایی با سیستم های تولید همزمان سرما، گرما و برق (CCHP) ۳

۱-۲-۲- اجزای سیستم های تولید همزمان سرما، گرما و برق ۸

۱-۳- توسعه و وضعیت فناوری های CCHP ۸

۱-۴- محرک های اصلی ۹

۱-۴-۱- موتورهای رفت و برگشتی احتراق داخلی ۹

۱-۴-۲- مشخصات کارکرد ۱۱

۱-۴-۳- توربین های بخار ۱۴

۱-۴-۴- توربین های گازی ۱۴

۱-۴-۵- میکروتوربین ها ۱۵

۱-۴-۶- موتورهای استرلینگ ۱۵

۱-۴-۷- پیل های سوختی ۱۶

۱-۵- فناوری های فعال شده به واسطه حرارت (TAT) ۱۶

۱-۵-۱- دیگر گزینه ها ۱۷

۱-۶- استفاده از سیستم های تولید همزمان در بخش مسکونی ۱۷

فصل ۲: مروری بر پژوهش های پیشین ۱۹

۲-۱- استفاده از انرژی خورشیدی در سیستم های تولید همزمان ۲۰

۲-۲- تحلیل و ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی سیستم های تولید همزمان ۲۶

۲-۳- تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم های تولید همزمان ۳۳

۲-۴- سیستم های تولید همزمان خانگی با محرکه اصلی موتور رفت و برگشتی ۳۸

فصل ۳: روابط حاکم ٤١

۳-۱- محاسبه معیار و زیر معیار ۴۳

۳-۱-۲- تحلیل ترمودینامیکی ۴۴

۳-۱-۳- تحلیل اقتصادی ۴۹

۳-۱-۴- تحلیل های زیست محیطی ۵۲

۳-۲- تحلیل سلسله مراتبی ۵۳

۳-۲-۱- کمی سازی مسائل کیفی ۵۳

۳-۲-۲- مدل سازی ۵۴
۳-۲-۳- مقایسات زوجی ۵۵
۳-۲-۴- محاسبات وزن‌های نسبی ۵۵
۳-۳- محاسبه تابع تعیین اندازه چند ضابطه ای ۵۶
۳-۴- محاسبه گرمای دریافتی از خورشید ۵۷
۳-۴-۱- هندسه تشعشع خورشید ۵۷
۳-۴-۲- طلوع ، غروب و طول روز ۵۹
۳-۴-۳- زمان ظاهری محلی ۶۰
۳-۴-۴- تشعشعات پخشی و سراسری ساعتی در روزهای صاف ۶۲
۳-۵- جمع کننده سهمی شکل مرکب ۶۴
۳-۵-۱- نیازمندی تعقیب ۶۵
۳-۵-۲- تحلیل عملکرد ۶۵

فصل ٤: نتایج و تفسیر آن ها ٦٨

۴-۱- رده بندی استراتژی ۶۹
۴-۱-۱- نتایج ۷۰
۴-۱-۲- نتایج بارهای ساختمان ۷۱
۴-۱-۳- نتایج وزن های معیارها و زیر معیارها نسبت به یکدیگر ۷۲
۴-۱-۴-نتایج خورشیدی ۷۴
۴-۱-۵- تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی ۷۶
۴-۱-۶- تعیین اندازه تک معیاره ۸۱
۴-۱-۷- تعیین اندازه چند ضابطه ای ۸۸
۴-۲- انتخاب استراتژی ۸۹
۴-۳- آنالیز حساسیت ۹۱

فصل ٥: جمع‌بندی و پیشنهادها ٩٤

۵-۱- جمع بندی ۹۵
۵-۲- نوع آوری ۹۶
۵-۳- پیشنهادات ۹۶

فصل ٦: مراجع ٩٨

فصل ٧: پیوست‌ها ١

۷-۱- پیوست(الف) ۲
۷-۲- پیوست (ب) ۷

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) پیکربندی یک سیستم تولید همزمان معمولی ۵
شکل (۱-۲) نمایش جریان انرژی در سیستم های سنتی و تولید همزمان ۷
شکل (۱-۳) پیکربندی سیستم های تولید همزمان CCHP با محرک اصلی موتور رفت و برگشتی. ۱۰
شکل (۲-۱) پیکر بندی سیستم تولید همزمان پیشنهاد شده توسط W.Yagoub ۲۳
شکل (۲-۲) نمایش پیکر بندی سیستم CCHP با منبع انرژی خورشیدی پیشنهاد شده توسط جیانگ فنگ وانگ و همکاران [۶] ۲۴
شکل (۲-۳) سیستم پیشنهاد شده توسط الویرا و همکاران بر اساس ترکیب چرخه اجکتور پمپ حرارتی ۲۵
شکل (۲-۴) چرخه تولید همزمان CCHP پیشنهاد شده توسط ابراهیمی و همکاران ۳۵
شکل (۲-۵) پیکربندی سیستم تولید همزمان با محرکه اصلی موتور رفت و برگشتی احتراق تراکمی ۳۷
شکل (۲-۶) تخریب اگزرژی اجزا چرخه بررسی شده توسط آباسوگلو و کانوگلو در مقایسه با اگزرژی کل ورودی توسط سوخت ۳۸
شکل (۲-۷) نتایج تصمیم گیری چند معیاره و تک معیاره به منظور انتخاب محرک اصلی سیستم تولید همزمان ۴۰
شکل (۳-۱) چرخه CCHP تولید همزمان (چپ) و سیستم تولید جداگانه CSP (راست) ۴۴
شکل (۳-۲) سلسله مراتب تعیین اندازه محرک اصلی سیستم تولید همزمان ۵۴
شکل (۳-۳) هندسه تشعشع خورشید ۵۸
شکل (۳-۴) زاویه انحراف (δ) بر حسب روز سال ۵۹
شکل (۳-۵) تصحیح اول برای محاسبه زمان ظاهری محلی ۶۱
شکل (۳-۶) جمع کننده سهمی شکل مرکب ۶۶
شکل (۴-۱) ماکزیمم مقدار بارهای مورد تقاضای ساختمان ۷۲
شکل (۴-۲) مقایسه نتایج بدست آمده برای متوسط شار تشعشعی سراسری با نرم افزار HAP 4.5 برای ماه ژوئن ۷۵
شکل (۴-۳) مقایسه نتایج بدست آمده برای متوسط شار تشعشعی سراسری با نرم افزار HAP 4.5 برای ماه دسامبر ۷۶

شکل (۴-۴) نتایج نرخ حرارت دریافتی از خورشید برای یک واحد جمع کننده سهمی شکل مرکب به صورت متوسط ساعات ماهانه ۲۴×۱۲ ..... ۷۶
شکل (۴-۵) نمودار تغییرات EXIR برای ۴ استراتژی تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی ۷۷
شکل (۴-۶) نمودار تغییرات FESR برای ۴ استراتژی تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی ۷۷
شکل (۴-۷) نمودار تغییرات PB^N برای ۴ استراتژی تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی ۷۸
شکل (۴-۸) نمودار تغییرات NPV برای ۴ استراتژی تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی..... ۷۸
شکل (۴-۹) نمودار تغییرات IRR برای ۴ استراتژی تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی ۷۹
شکل (۴-۱۰) نمودار تغییرات نسبت کاهش آلاینده CO برای ۴ استراتژی تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی..... ۷۹
شکل (۴-۱۱) نمودار تغییرات نسبت کاهش آلاینده CO_2 برای ۴ استراتژی تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی..... ۸۰
شکل (۴-۱۲) نمودار تغییرات نسبت کاهش آلاینده NO_X برای۴ استراتژی تعیین اندازه سیستم گرمایش خورشیدی..... ۸۰
شکل (۴-۱۳) تاثیر اندازه موتور بر روی مقدار زیر معیار ترمودینامیکی نسبت ذخیره انرژی سوخت ۸۲
شکل (۴-۱۴) تاثیر اندازه موتور بر روی مقدار زیر معیار ترمودینامیکی نسبت افزایش اگزرژی..... ۸۲
شکل (۴-۱۵) تاثیر اندازه موتور بر روی مقدار زیر معیار اقتصادی ارزش حاضر خالص (NPV) ۸۳
شکل (۴-۱۶) تاثیر اندازه موتور بر روی مقدار زیر معیار اقتصادی نرخ بازگشت سرمایه (IRR)..... ۸۳
شکل (۴-۱۷(تاثیر اندازه موتور بر روی مقدار زیر معیار اقتصادی دوره بازگشت سرمایه (PB^N) ۸۴
شکل (۴-۱۸) تاثیر اندازه موتور بر روی مقدار زیر معیار زیست محیطی نسبت کاهش CO_2..... ۸۴
شکل (۴-۱۹) تاثیر اندازه موتور بر روی مقدار زیر معیار زیست محیطی نسبت کاهش CO ۸۵
شکل (۴-۲۰) تاثیر اندازه موتور بر روی مقدار زیر معیار زیست محیطی نسبت کاهش NOX..... ۸۵
شکل (۴-۲۱) مقایسه بین اندازه های موتور پیشنهاد شده توسط استراتژی های MCSF , FTL, FEL.. ۹۰
شکل (۴-۲۲) آنالیز حساسیت اقتصادی سیستم پیشنهادی نسبت به نرخ بهره برای پارامتر NPV..... ۹۲
شکل (۴-۲۳) آنالیز حساسیت اقتصادی سیستم پیشنهادی نسبت به نرخ ارز (دلار) برای پارامتر NPV..... ۹۲
شکل (۴-۲۴) آنالیز حساسیت اقتصادی سیستم پیشنهادی نسبت به نرخ ارز (دلار) برای پارامتر PB^N ۹۳
شکل (۴-۲۵) آنالیز حساسیت اقتصادی سیستم پیشنهادی نسبت به نرخ ارز (دلار) برای پارامتر IRR۹۳

شکل (۷-۱) نمودار جریان انرژی ایران- سال ۱۳۸۹ [۴۰] ۲
شکل (۷-۲) کل مصرف نهایی ایران به تفکیک حامل های انرژی [۴۱] ۳
شکل (۷-۳) مصرف برق در کشور طی سال های ۸۸-۷۹ [۴۱] ۳
شکل (۷-۴) ظرفیت اسمی نیروگاه های برق وزارت نیرو [۴۱] ۶
شکل (۷-۵) نمودار جریان انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از بخش انرژی کشور در سال [۴۰] ۶

فهرست جداول

جدول (۱-۱) بازیاب حرارتی موتورهای احتراق داخلی رفت و برگشتی..... ۱۲
جدول (۲-۱) معیارهای اقتصادی استفاده شده در انتخاب واحدهای تولید همزمان..... ۲۷
جدول (۲-۲) دسته بندی الگوهای ارزیابی اقتصادی..... ۲۹
جدول (۳-۱) مقایسه های دو به دو معیارها و زیر معیارهای تابع چند ضابطه ای تعیین اندازه محرک اصلی[۳۷]..... ۵۶
جدول (۳-۲) برازش منحنی ضریب تصحیح زمان ظاهری محلی ۶۱
جدول (۳-۳) ثابت های A,B,C..... ۶۳
جدول (۳-۴) برازش منحنی برای ثابت A..... ۶۴
جدول (۳-۵) برازش منحنی برای ثابت B..... ۶۴
جدول (۳-۶) برازش منحنی برای ثابت C..... ۶۴
جدول (۴-۲) داده های هندسی یک واحد جمع کننده سهمی شکل مرکب..... ۷۴
جدول (۴-۳) نمونه داده های عملکردی جمع کننده های سهمی شکل مرکب بر اساس تغییرات زاویه پذیرش [۴۲]..... ۷۵
جدول (۴-۶) گستره رده بندی استراتژی های پیشنهاد شده توسط تابع چند ضابطه ای تعیین اندازه.. ۹۰
جدول (۷-۱) سهم هر یک از بخش ها در کل مصرف نهایی ایران [۴۱]..... ۴
جدول (۷-۲) راندمان نیروگاههای حرارتی تحت پوشش وزارت نیرو در سال ۱۳۸۹ [۴۰]..... ۵
جدول (۷-۳) تعرفه مناطق عادی و ماههای غیرگرم مناطق گرمسیر ۸

فهرست علائم اختصاری

تحلیل سلسله مراتبی ..... AHP

محیط اطراف ..... amb

مجموع بار حرارتی ..... ATD

گرم کن ..... B

پرتوی ..... b

بار سرمایشی (kW) C

معیار ترمودینامیکی، اقتصادی، زیست محیطی ..... C_i

تولید همزمان برق، گرما و سرما ..... CCHP

جریان نقدینگی (Rial) ..... Cf

ضریب عملکرد چیلر جذبی ..... COP_{abc}

تولید جداگانه سنتی ..... CSP

بار مصرف آب گرم (kW) ..... D

قطر لوله ..... D

پخشی ..... d

آب گرم مصرفی ..... DHW

حباب خشک ..... Db

مصرف ساختمان ..... dem

ضریب انشار ..... e

بار الکتریکی (kW) ..... E

صدور ..... Em

موتور ..... Eng

درآمد (Rial) ..... Er

هزینه (Rial) ..... Ex

سوخت (kW) ..... F

الگوریتم فازی ..... FA

واحد فن کویل ..... FCU

تامین برق مصرفی و بار حرارتی ..... FEL, FTL

عملکرد بار کامل و جزئی ..... FLO, PLO

تامین بار فصلی ..... FSS

شبکه ..... G

سراسری ..... g

روش تصادف خاکستری ..... GIA

بار حرارتی (kW) ..... H

ضریب انتقال حرارت جابه جایی ..... h

گاز داغ ..... Hg

شاخص هزینه ، (Rial/kWh), (Rial/m^2) I

هزینه کلی (Rial) I

شار خورشیدی I

موتور احتراق داخلی IC

هزینه اولیه اجزا (Rial) ii

هزینه تعمیر و نگهداری($/kW) ..... I_{OM}

نرخ داخلی بازگشت (%) ..... IRR

بالانویس CSP و CCHP ..... j=0, 1

بیشینه ..... max

بی بعد ..... N

نامی ..... nom

ارزش حاضر خالص (Rial) ..... NPV

توان تولید الکتریسیته (kW) ..... P

دوره بازگشت (year) ..... PB

نسبت توان به گرما ..... PHR

گرما (kW) ..... Q

نرخ بهره (%) ، بازیاب ..... r

بازیاب شده ..... rec

تامینی ..... s

طلوع، غروب ..... s

زیرمعیار ..... S

تابستان و زمستان ..... sum,win

دما (°C) ..... T

تعرفه خرید گاز ($Rial/m^3$) ..... t_{gas}

تعرفه خرید و فروش برق (Rial/kWh) ..... t_{bp}, t_{sp}

ضریب افت ..... U

نرخ کار (kW) ..... W

عرض سطح جاذب ..... w

حباب تر ..... wb

آب گرم کن ..... wh

پمپ آب ..... wp

پمپ مبرد ..... wb

سالانه ..... y

بازده کلی (%) ..... $\eta_{overall}$

بازده اگزرژی (%) ..... π

ضریب جذب ..... α

زاویه شیب ..... β

ضریب عبور ..... Γ

ضریب انعکاس ..... ρ

زاویه اوج خورشیدی و زاویه پذیرش ..... θ

زاویه انحراف ..... γ

زاویه سمت خورشیدی ..... ζ

زاویه سمت صفحه – خورشید ..... λ

زاویه ساعتی ..... ω

عرض جغرافیایی ..... φ

نرخ اگزرژی (KW) ..... $\dot{\phi}$

عبارات منطقی و ، یا ..... $\wedge, \vee$

حالت مرده ترمودینامیکی 0

فصل ۱:

مقدمه ای بر تولید همزمان