

دانشگاه یزد
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

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

بررسی فنی و اقتصادی نیروگاه فتوولتائیک یزد

استاد راهنما:

دکتر ولی کلانتر

استاد مشاور: دکتر علی مصطفایی پور

پژوهش و نگارش: مجتبی فریدونی

پاییز ۹۲

باساس از سه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موباشان سید شد تا ما رو سفید شویم...

وحاشا آنه سوختند تا که ما بخش وجود ما و رو سنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی خورشید به دلیل امکان دسترسی بالا و انتشار آلاینده اندک، رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است. فتوولتائیک یکی از موارد کاربرد انرژی خورشید برای تولید برق می‌باشد. در سیستم‌های فتوولتائیک، نور خورشید مستقیماً توسط سلول‌های فتوولتائیکی به برق تبدیل می‌شود. نیروگاه‌های فتوولتائیک به دو صورت عمده متصل به شبکه و مستقل از شبکه موجودند. تفاوت اصلی این دو نوع نیروگاه در این است که نیروگاه متصل به شبکه نیازی به باتری برای ذخیره‌سازی برق تولیدی ندارد.

نیروگاه فتوولتائیک یزد از نوع متصل به شبکه بوده که از ۸۴ پنل ۲۴۰ واتی از جنس سیلیکن چند کریستالی تشکیل شده است و در مجموع ظرفیت تولید توان ۲۰ کیلووات را دارد. توانی که پنل‌ها تولید می‌کنند توسط یک اینورتر با بازده ۹۸ درصد، به برق AC مورد نیاز شبکه تبدیل می‌گردد. در این پژوهش، ابتدا داده‌های مربوط به عملکرد این نیروگاه در طول یک‌سال تحلیل شده، سپس با استفاده از نرم‌افزار PVSYST حالات مختلف عملکرد نیروگاه شبیه‌سازی گردیده و در انتها این نیروگاه از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج نشان داده که نیروگاه در طول یک‌سال ۳۵/۸۵ مگاوات‌ساعت برق به شبکه تزریق کرده است. همچنین نشان داده شده که افزایش دمای پنل، گرد و خاک، سایه و اتلاف زاویه‌ای موجب کاهش بازده سیستم می‌گردند. بررسی اقتصادی نیروگاه نشان داده که احداث این نیروگاه برای دانشگاه مقرون به صرفه نبوده ولی با در نظر گرفتن هزینه بیشتری که دولت برای تولید برق متحمل می‌شود، زمان بازگشت سرمایه از دیدگاه دولت ۱۱/۹ سال محاسبه گردیده است.

کلمات کلیدی: انرژی خورشیدی، فتوولتائیک، متصل به شبکه، بازده، زمان بازگشت سرمایه

فهرست

- فصل ۱. مقدمه ۱
- ۱-۱ انرژی خورشیدی ۲
- ۲-۱ نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی ۴
- ۱-۲-۱ نیروگاه‌های سهموی خطی ۵
- ۲-۲-۱ نیروگاه‌های با دریافت‌کننده مرکزی ۶
- ۳-۲-۱ نیروگاه‌های با گیرنده بشقابی ۶
- ۴-۲-۱ دودکش‌های خورشیدی ۷
- ۳-۱ سیستم‌های فتوولتائیک ۷
- ۱-۳-۱ تاریخچه فتوولتائیک ۷
- ۲-۳-۱ کاربردهای فتوولتائیک ۱۲
- ۴-۱ اساس کار سلول‌های فتوولتائیک ۱۵
- ۵-۱ انواع سلول‌های خورشیدی ۲۰
- ۱-۵-۱ سیلیکن تک کریستالی ۲۱
- ۲-۵-۱ سیلیکن چند کریستالی ۲۱
- ۳-۵-۱ سیلیکن آمرفس (قشرنازک) ۲۱
- ۴-۵-۱ سلول‌های نوع دیگر ۲۳
- ۶-۱ مزایا و معایب سیستم‌های فتوولتائیک ۲۵

۲۵	..... ۱-۶-۱ مزایا
۲۶	..... ۲-۶-۱ معایب
۲۷	..... فصل ۲. پیشینه پژوهش
۲۸	..... ۱-۲ مطالعات انجام شده
۴۷	..... فصل ۳. معرفی مبانی نظری و اجزاء نیروگاه
۴۹	..... ۱-۳ زوایای خورشیدی
۴۹	..... ۱-۳-۱ زاویه Zenith
۵۰	..... ۱-۳-۲ زاویه ارتفاع خورشید
۵۰	..... ۱-۳-۳ زاویه ازیموت خورشیدی
۵۰	..... ۱-۳-۴ زاویه ازیموت و شیب سطح
۵۱	..... ۱-۳-۵ زاویه میل خورشیدی
۵۲	..... ۱-۳-۶ زاویه ساعتی
۵۲	..... ۱-۳-۷ زاویه تابش
۵۳	..... ۲-۳ شیوه‌های ردیابی پنل‌های خورشیدی
۵۳	..... ۱-۲-۳ ردیابی تک‌محوره شرقی-غربی
۵۴	..... ۲-۲-۳ ردیابی تک‌محوره شمالی-جنوبی
۵۵	..... ۳-۲-۳ ردیابی تک‌محوره با محور قائم
۵۵	..... ۴-۲-۳ ردیابی دومحوره

۵۶	..... نرم افزار PVSYST ۳-۳
۵۸	..... نیروگاه فتوولتائیک یزد ۴-۳
۵۹	..... ابزار ۱-۴-۳
۶۱	..... پنل ۲-۴-۳
۶۶	..... اینورتر ۳-۴-۳
۶۹	..... آرایش آرایه‌ها ۴-۴-۳
۷۲	..... فصل ۴. نتایج
۷۳	..... ۱-۴ عملکرد ماهانه سیستم
۸۰	..... ۲-۴ عملکرد روزانه
۸۴	..... ۱-۲-۴ بازده
۸۶	..... ۲-۲-۴ گرد و خاک
۸۸	..... ۳-۴ شبیه‌سازی با نرم‌افزار
۸۹	..... ۱-۳-۴ سایه
۹۳	..... ۲-۳-۴ اتلاف زاویه‌ای
۹۳	..... ۳-۳-۴ تابش
۱۰۰	..... ۴-۳-۴ تولید انرژی در حالات مختلف
۱۰۳	..... ۴-۴ اینورتر
۱۰۸	..... فصل ۵. بررسی اقتصادی

۱۰۹	.....	۱-۵ پارامترهای اقتصادی
۱۰۹	.....	۱-۱-۵ نرخ تنزیل
۱۱۰	.....	۲-۱-۵ ارزش فعلی خالص
۱۱۱	.....	۳-۱-۵ نرخ بازده داخلی
۱۱۱	.....	۴-۱-۵ بازگشت سرمایه
۱۱۱	.....	۲-۵ بررسی اقتصادی نیروگاه یزد
۱۱۳	.....	۱-۲-۵ از منظر مصرف کننده
۱۱۴	.....	۲-۲-۵ از منظر دولت
۱۱۶	.....	۳-۲-۵ سال بازگشت سرمایه در حالات مختلف
۱۱۷	.....	۳-۵ زمان بازگشت انرژی
۱۲۰	.....	فصل ۶. نتیجه گیری و پیشنهاد
۱۲۴	.....	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. نمودار میزان مصرف سالیانه برق در جهان در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ برحسب تراوات ساعت ۲
- شکل ۱-۲. ماهواره تلسار ۹
- شکل ۱-۳. فتوولتائیک در ساختمان ۱۰
- شکل ۱-۴. میزان استفاده از فناوری فتوولتائیک در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۱ ۱۱
- شکل ۱-۵. ظرفیت فتوولتائیک نصب شده در نقاط مختلف جهان در سال ۲۰۱۱ ۱۲
- شکل ۱-۶. نیروگاه فتوولتائیک ۱۲۰ کیلوواتی در سمنان ۱۳
- شکل ۱-۷. نیروگاه فتوولتائیک ۱۲ کیلوواتی در بید یزد ۱۴
- شکل ۱-۸. الف) شبکه سیلیکونی ب) شکل‌گیری الکترون و حفره ۱۸
- شکل ۱-۹. ولتاژ مستقیم ۱۹
- شکل ۱-۱۰. بازده چند نیمه‌هادی برحسب انرژی گپ ۲۰
- شکل ۱-۱۱. انواع مختلف سلول‌های سیلیکونی ۲۲
- شکل ۱-۱۲. روند تغییرات بازده سلول‌های فتوولتائیک در ۴ دهه اخیر ۲۴
- شکل ۲-۱. حساسیت به هزینه سیستم‌های فتوولتائیک و دیزلی برای بهترین و بدترین حالت سیستم فتوولتائیک بر حسب انرژی مصرفی ۲۸
- شکل ۲-۲. پیک مصرف ماهانه برای سیستم فتوولتائیک با اندازه‌های مختلف ۲۹
- شکل ۲-۳. تاثیر زاویه شیب بر تشعشع بیشینه برای صفحه به سمت جنوب ۳۰
- شکل ۲-۴. مقایسه مقدار تشعشع رسیده به صفحه در حالت زاویه بهینه ماهانه، زاویه بهینه فصلی و زاویه برابر عرض جغرافیایی با صفحه افقی ۳۱
- شکل ۲-۵. توان بر حسب ولتاژ برای میزان تابش‌های مختلف و دمای ۲۵ ۳۲

- شکل ۲-۶. توان بر حسب ولتاژ قبل و بعد از تمیزکردن برای میزان تشعشع 700 W/M^2 ۳۳
- شکل ۲-۷. مقایسه بازده سیستم در حالت تمیزکردن دستی و تمیزشدن بوسیله بارندگی..... ۳۳
- شکل ۲-۸. تابش خورشیدی و انرژی تولیدی روزانه در ماه ژوئن ۳۴
- شکل ۲-۹. زاویه بهینه برای عرض‌های جغرافیایی مختلف..... ۳۵
- شکل ۲-۱۰. سیستم فتوولتائیک دارای متمرکزکننده..... ۳۶
- شکل ۲-۱۱. نمودار بازده الکتریکی بر حسب دبی هوا ۳۷
- شکل ۲-۱۲. مقایسه انرژی تولیدی عملی و انرژی پیش‌بینی شده به وسیله PVSYST..... ۳۹
- شکل ۲-۱۳. مقایسه انرژی تولیدی در حالت‌های ثابت، تک‌محوره، دومحوره و سلول متمرکزکننده.. ۴۰
- شکل ۲-۱۴. حالات مختلف ایجاد سایه روی یک پنل: الف) قطری ب) افقی ج) عمودی ۴۲
- شکل ۲-۱۵. تاثیر سایه بر توان تولیدی الف) تک سلول ب) سایه عمودی ج) سایه افقی د) سایه قطری
..... ۴۳
- شکل ۳-۱. زوایای خورشیدی ۴۹
- شکل ۳-۲. زاویه ازیموت سطح ۵۰
- شکل ۳-۳. نرم‌افزار PVSYST..... ۵۶
- شکل ۳-۴. شبیه‌سازی نیروگاه برای محاسبه سایه ۵۷
- شکل ۳-۵. قسمتی از نیروگاه فتوولتائیک یزد ۵۸
- شکل ۳-۶. تشعشع سنج استفاده شده در نیروگاه ۶۰
- شکل ۳-۷. پنل REC240PE به کار رفته در نیروگاه ۶۱
- شکل ۳-۸. نمودار جریان بر حسب ولتاژ پنل استفاده شده در نیروگاه ۶۳
- شکل ۳-۹. اینورتر PLATINUM 22000 TL ۶۸
- شکل ۳-۱۰. نحوه اتصال پنل‌ها به اینورتر ۷۰

- شکل ۴-۱. میزان تشعشع ماهانه وارد بر سطح پنل‌ها در طول یک سال ۷۳
- شکل ۴-۲. انرژی AC و DC تولید شده توسط سیستم در طول یک سال ۷۴
- شکل ۴-۳. بازده و دمای پنل برای روزهای ماه آگوست ۷۵
- شکل ۴-۴. دمای میانگین محیط و دمای میانگین پنل در ماه‌های مختلف سال ۷۶
- شکل ۴-۵. بازده سیستم در ماه‌های مختلف سال ۷۷
- شکل ۴-۸. انرژی عملی و انرژی تئوری برای ساعات مختلف در یک روز تابستانی (۷ آگوست) ۸۰
- شکل ۴-۹. تشعشع و توان تولیدی در یک روز آفتابی تابستانی (۷ آگوست) ۸۱
- شکل ۴-۱۰. تشعشع و توان تولیدی در یک روز آفتابی زمستانی (۲۹ ژانویه) ۸۲
- شکل ۴-۱۱. تشعشع و توان تولیدی در یک روز ابری زمستانی (۷ ژانویه) ۸۳
- شکل ۴-۱۲. بازده و دمای پنل در یک روز آفتابی تابستانی (۷ آگوست) ۸۴
- شکل ۴-۱۳. بازده و دمای پنل در یک روز آفتابی زمستانی (۲۹ ژانویه) ۸۴
- شکل ۴-۱۴. بازده و دمای پنل در یک روز ابری (۷ ژانویه) ۸۵
- شکل ۴-۱۵. بازده در روزهای قبل (۲ فوریه) و بعد (۴ فوریه) از طوفان شن ۸۶
- شکل ۴-۱۶. دمای پنل در روزهای قبل (۲ فوریه) و بعد (۴ فوریه) از طوفان شن ۸۷
- شکل ۴-۱۷. انرژی AC واقعی و انرژی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار در ماه‌های مختلف سال ۸۸
- شکل ۴-۱۸. حالت قرارگرفتن پنل‌ها در نیروگاه ۸۸
- شکل ۴-۱۹. مسیر خورشیدی برای شهر یزد محاسبه شده توسط نرم افزار PVSYST ۹۰
- شکل ۴-۲۰. زاویه حد سایه بر حسب فاصله پنل‌ها ۹۱
- شکل ۴-۲۱. انرژی تولیدی سالانه نسبت به حالت بدون سایه برای فواصل مختلف پنل‌ها ۹۲
- شکل ۴-۲۲. اتلاف زاویه‌ای بر حسب زاویه برخورد ۹۳
- شکل ۴-۲۳. اتلاف زاویه‌ای برای یک روز زمستانی (۲۹ ژانویه) و یک روز تابستانی (۷ آگوست) ۹۴

- شکل ۴-۲۴. اتلاف زاویه‌ای در ماه‌های مختلف سال ۹۵
- شکل ۴-۲۵. اتلاف زاویه‌ای در ماه‌های مختلف سال برای حالت‌های مختلف قرار گرفتن پنل‌ها ۹۶
- شکل ۴-۲۶. مقدار TF سالانه بر حسب زاویه ازیموت و شیب پنل ۹۷
- شکل ۴-۲۷. زاویه شیب بهینه پنل در ماه‌های مختلف سال ۹۸
- شکل ۴-۲۸. نسبت TF برای حالات مختلف قرارگیری پنل‌ها در ماه‌های مختلف سال ۹۹
- شکل ۴-۲۹. انرژی تولیدی سیستم در ماه‌های مختلف برای دو حالت زاویه بهینه سالانه و زاویه بهینه ماهانه بدون در نظر گرفتن سایه ۱۰۰
- شکل ۴-۳۰. انرژی تولیدی سیستم در ماه‌های مختلف برای دو حالت زاویه بهینه سالانه و زاویه بهینه ماهانه با در نظر گرفتن سایه ۱۰۱
- شکل ۴-۳۱. ولتاژ میانگین ورودی اینورتر در ماه‌های ژانویه و آگوست ۱۰۳
- شکل ۴-۳۲. بازده اینورتر بر حسب توان ورودی ۱۰۴
- شکل ۴-۳۳. نسبت انرژی تولیدی به حداکثر انرژی ممکن بر حسب ظرفیت‌های مختلف اینورتر ۱۰۴
- شکل ۵ ۱. نمودار کاهش عملکرد پنل‌ها ۱۱۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲. بازده ساعتی سیستم برای ژوئن و دسامبر ۳۴
- جدول ۲-۲. مقایسه دو سیستم مختلف زاویه ثابت و ردیاب دومحوره در ماه‌های مختلف سال ۴۱
- جدول ۳-۲. تاثیر سایه بر کاهش انرژی در ماه‌های مختلف ۴۴
- جدول ۴-۲. تولید انرژی و نسبت عملکرد سیستم‌های فتوولتائیکی برای مناطق مختلف ۴۶
- جدول ۱-۳. ویژگی‌های الکتریکی پنل به کار رفته در نیروگاه ۶۳
- جدول ۲-۳. مشخصات اینورتر مورد استفاده در نیروگاه ۶۸
- جدول ۱-۴. ar برای پنل‌های مختلف ۹۴
- جدول ۲-۴. نسبت TF سالانه برای حالات مختلف قرارگیری پنل‌ها ۹۹
- جدول ۳-۴. انرژی تولیدی در حالات مختلف ردیابی ۱۰۳
- جدول ۴-۴. ظرفیت بهینه اینورتر در حالات مختلف قرارگیری پنل‌ها ۱۰۶
- جدول ۱-۵. هزینه قسمت‌های مختلف نیروگاه ۱۱۲
- جدول ۲-۵. میزان انتشار گازهای آلاینده مختلف ۱۱۵
- جدول ۳-۵. هزینه اجتماعی گازهای آلاینده مختلف ۱۱۴
- جدول ۴-۵. محاسبات اقتصادی در ۲۵ سال طول عمر سیستم ۱۱۴
- جدول ۵-۵. سال برگشت سرمایه و نرخ بازده داخلی در حالات مختلف ۱۱۶
- جدول ۶-۵. انرژی مورد نیاز برای ساخت قسمت‌های مختلف پنل ۱۱۷

فهرست علائم

[A]	جریان دیود	I_D
[A]	جریان اشباع	I_o
[-]	ثابت بولتزمن	k
[k]	دما	T
[coulomb]	بار الکترون	e
[v]	ولتاژ	v
[A]	جریان تولید شده توسط نور	I_L
[-]	نسبت عملکرد	PR
[Kwh]	انرژی تولید شده	$E_{produced}$
[w/m ²]	تابش در شرایط استاندارد	G^{STC}
[w/m ²]	تابش	G
[w]	توان در شرایط استاندارد	P^{STC}
[°]	زاویه Zenith	θ_z
[°]	زاویه ارتفاع	α
[°]	زاویه ازیموت خورشید	γ_{sun}

[°]	زاویه ازیموت سطح	γ_{wall}
[°]	زاویه شیب سطح	β
[°]	زاویه ساعتی	ω
[°]	زاویه میل	δ
[°]	عرض جغرافیایی	φ
[°]	زاویه تابش	θ_i
[-]	ضریب تشعشع مستقیم	R_b
[-]	ضریب تشعشع پخشی	R_d
[-]	ضریب تشعشع انعکاسی	R_r
[-]	ضریب انعکاس زمین	ρ
[A]	جریان مدار کوتاه	I_{sc}
[V]	ولتاژ مدار باز	V_{oc}
[-]	ضریب انباشتن	FF
[-]	ضریب تعبیه	β_c
[v/°C]	ضریب دمای ولتاژ	VTC
[A/°C]	ضریب دمای جریان	CTC

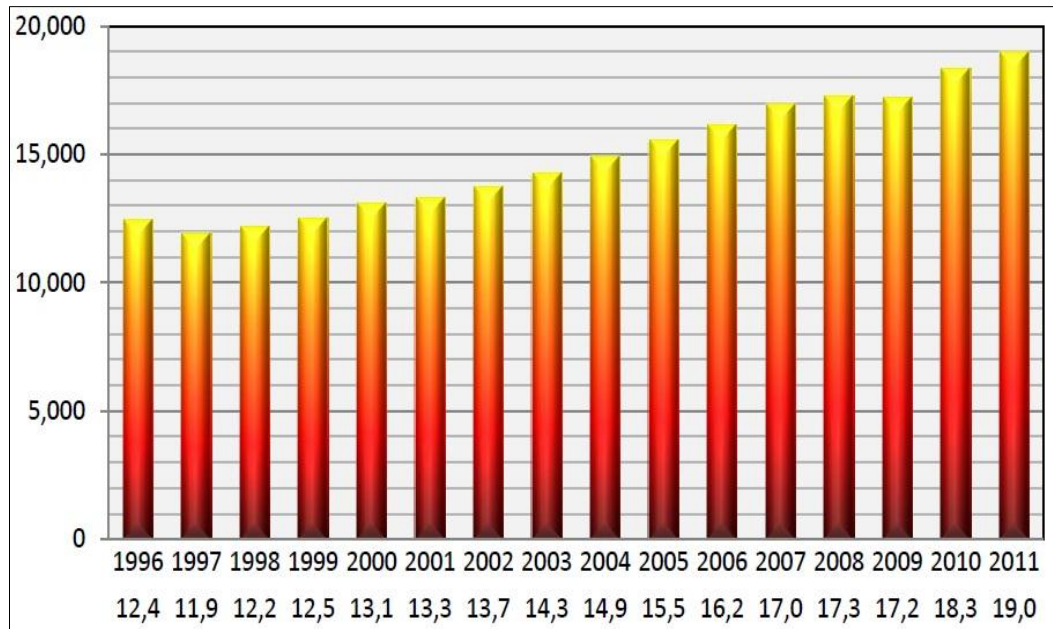
[°C]	دمای سلول	T_c
[m]	عرض پنل	L
[m]	فاصله بین پنل‌ها	D
[ریال]	ارزش آتی	F
[ریال]	ارزش فعلی	P
[%]	نرخ تنزیل اسمی	d
[%]	نرخ تورم	d_{inf}
[%]	نرخ تنزیل واقعی	r
[ریال]	ارزش فعلی خالص	NPV
[ریال]	مجموع درآمدها در سال t	B_t
[ریال]	مجموع هزینه‌ها در سال t	C_t
[%]	نرخ بازده داخلی	IRR

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ انرژی خورشیدی

در سالیان گذشته برق مورد نیاز بشر با استفاده از سوخت‌های فسیلی تامین می‌گردید که نزدیک به ۴۰۰ میلیون سال طول کشیده که در زیر زمین شکل گرفته و ذخیره شوند. همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، انرژی الکتریکی مصرفی جهان روندی افزایشی داشته به گونه‌ای که در دهه اخیر در حدود ۵۰ درصد رشد داشته است. هم‌اکنون بسیاری از دانشمندان و سیاستمداران به این نتیجه رسیده‌اند که نجات کره زمین در قرن بیست و یکم نیازمند تغییری عمده در مسیر تولید انرژی می‌باشد. کمبود منابع سوخت فسیلی تنها مشکل موجود نمی‌باشد، بلکه انتشار گاز دی‌اکسید-کربن و گرمایش زمین ناشی از مصرف این سوخت‌ها می‌تواند در آینده‌ای نه‌چندان دور موجب وقوع فاجعه‌ای زیست‌محیطی گردد. بنابراین جایگزینی منابع انرژی حاضر با منابع انرژی تجدیدپذیر و فاقد آلاینده‌گی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.



شکل ۱-۱. نمودار میزان مصرف سالیانه برق در جهان در سالهای ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ بر حسب تراوات ساعت [۱]

انرژی تجدیدپذیر به انرژی گفته می‌شود که برای مدت طولانی در دسترس باشد و منابع اصلی