



دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی عملکردی و اقتصادی واحد تولید الکتریسیته بادی به

کمک نرم افزار SAM

پروژه درس تبدیل انرژی پیشرفته

در رشته مهندسی مکانیک

علی باقری برمس

استاد مربوطه:

دکتر سمانه قندهاریون

فروردین ۱۴۰۲

به نام خالق هستی

فهرست مطالب

مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
روش تحقیق	۳
۱-۲- منبع بادی	۴
۱-۱-۲- توزیع ویول سرعت باد	۴
۲-۲- توربین بادی	۵
۳-۲- مزرعه بادی	۶
۴-۲- تلفات	۷
۱-۴-۲- تلفات ناشی از wake	۷
۲-۴-۲- تلفات Availability	۸
۲-۴-۳- تلفات الکتریکی	۸
۲-۴-۴- تلفات ناشی از عملکرد توربین	۸
۵-۲- افت عملکرد سالانه توربین	۸
۶-۲- هزینه نصب	۹
۷-۲- هزینه عملکردی	۹
۸-۲- پارامترهای اقتصادی	۹

نتایج و بحث ۱۱

۳-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۱۲

پیوست ۱۷

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: توزیع ویبول سرعت باد..... ۴
- شکل ۲-۲: نمایی از توربین بادی Nordex N۶۰ با قابلیت تولید توان ۱۳۰۰ کیلووات..... ۵
- شکل ۳-۲: منحنی مشخصه توربین بادی Nordex N۶۰..... ۶
- شکل ۴-۲: نحوه چینش توربین‌ها در مزرعه بادی..... ۷
- شکل ۱-۳: مقدار انرژی تولید شده در هر سال به تفکیک ماه..... ۱۳
- شکل ۲-۳: مقدار تلفات سیستم..... ۱۴
- شکل ۳-۳: مقدار انرژی تولیدی سالانه با در نظر گرفتن افت عملکردی واحد تولید توان..... ۱۵
- شکل ۴-۳: جریان سرمایه در بازه عملکردی ۴۰ ساله واحد تولید توان..... ۱۶

فهرست جداول

جدول ۳-۱: نتایج حاصل از شبیه‌سازی..... ۱۲

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

باتوجه به گستردگی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بررسی توانان اقتصادی و عملکردی این سیستم‌ها یک نیاز کاملاً جدی به شمار می‌رود. امروزه نرم‌افزارهای متعددی بدین منظور استفاده می‌شود. یکی از این نرم‌افزارها SAM¹ است. در این تحقیق، یک واحد تولید توان بادی به کمک این نرم‌افزار با در نظر گرفتن پارامترها متعدد صنعتی، آب‌وهوایی، اقتصادی و ... از لحاظ عملکردی و اقتصادی بررسی شده است. بدین منظور از نرم‌افزار SAM نسخه ۲۰۲۲.۱۱.۲۱ استفاده شده است. از داده‌های آب‌وهوایی کارولینای شمالی شرقی^۲ به منظور تحلیل یک واحد تولید توان بادی در دریا استفاده شده است.

¹ System Advisor Model

² Eastern North Carolina

فصل ۲:

روش تحقیق

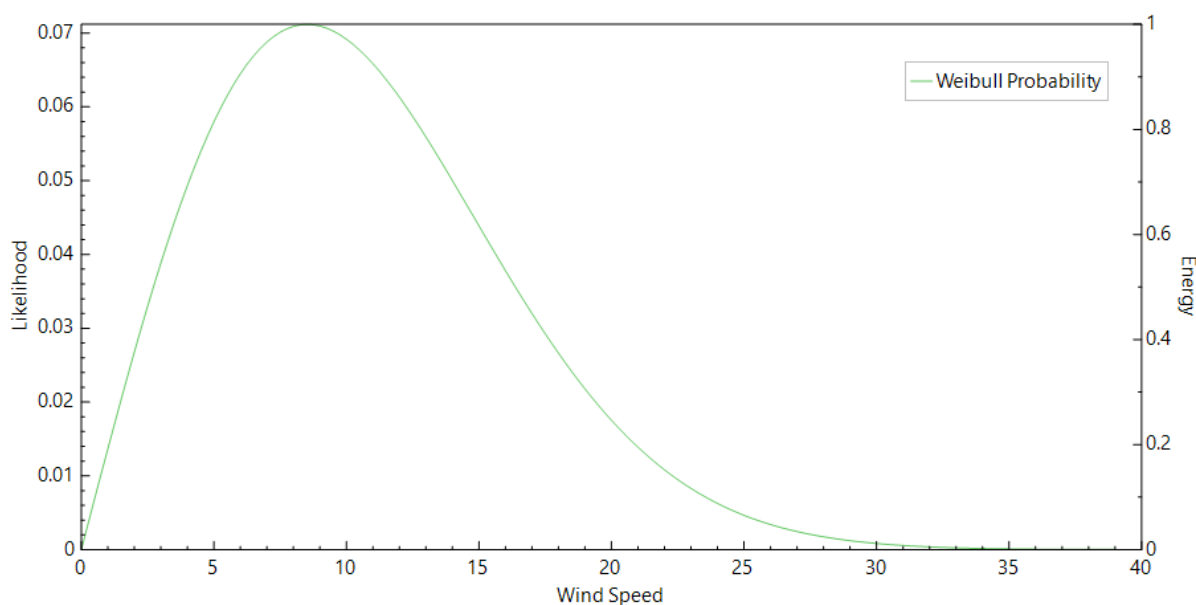
در ادامه، داده‌های به کار رفته در تحلیل این سیستم، به طور مفصل شرح داده شده است.

۱-۲- منبع بادی^۱

جهت بررسی این واحد تولید توان، لازم است به اطلاعات آب‌وهوایی منطقه‌ای دسترسی داشته باشیم. بدین جهت از کتابخانه نرم‌افزار SAM استفاده کرده و از داده‌های آب‌وهوایی مربوط به ناحیه دریایی شرق کارولینای شمالی استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است منبع نرم‌افزار SAM برای این داده‌ها NREL^۲ است.

۱-۱-۲- توزیع ویبول سرعت باد^۳

با در نظر گرفتن ارتفاع مرجع ۵۰ متر، ضریب ویبول ۲ و متوسط سالیانه سرعت ۱۰ متر بر ثانیه توزیع ویبول سرعت باد به صورت شکل ۱-۲ حاصل می‌شود.



شکل ۱-۲: توزیع ویبول سرعت باد.

^۱ Wind Resource

^۲ National Renewable Energy Laboratory

^۳ Wind Speed Weibull Distribution

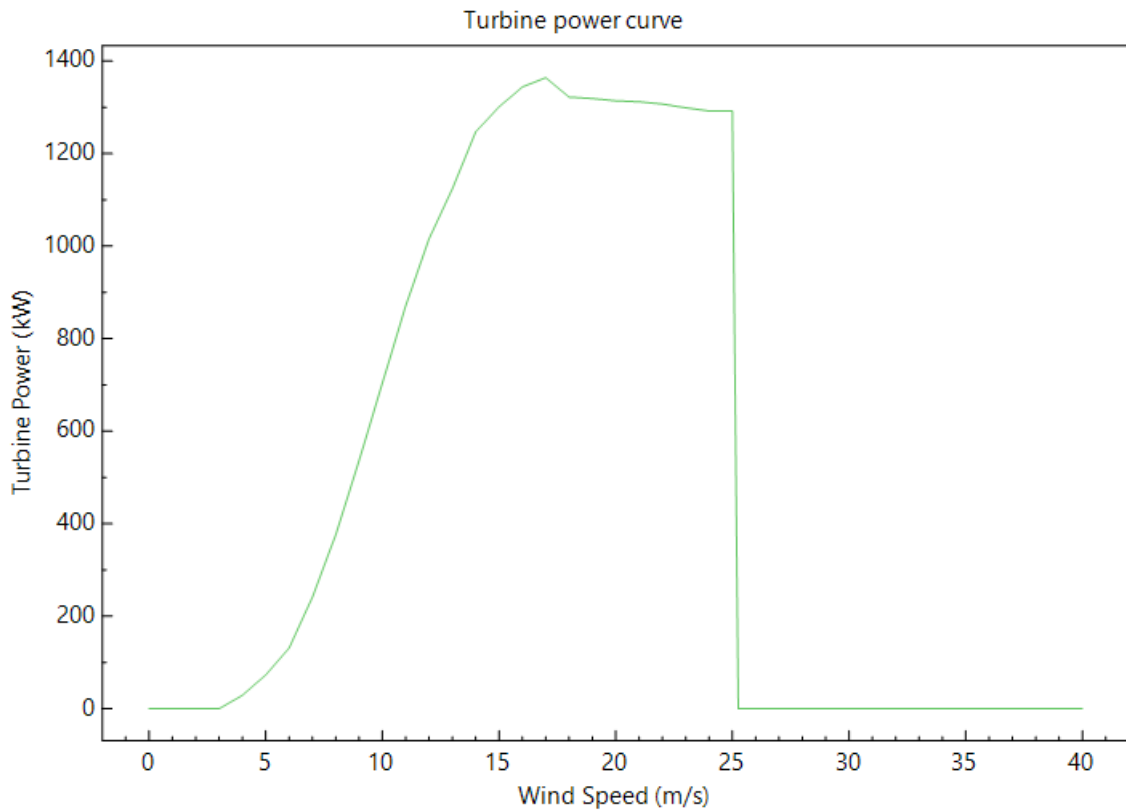
۲-۲- توربین بادی^۱

به منظور تولید الکتریسیته از وزش باد در ناحیه مورد نظر، از توربین های Nordex N60 (شکل ۲-۲) با قابلیت تولید توان ۱۳۰۰ کیلووات و قطر روتور ۶۰ متر استفاده می شود. لازم به ذکر است ارتفاع هاب و ضریب برش در این توربین به ترتیب ۹۰ متر و ۰.۱۲ در نظر گرفته شده است. منحنی مشخصه توربین بادی مدنظر به صورت شکل ۲-۳ است.



شکل ۲-۲: نمایی از توربین بادی Nordex N60 با قابلیت تولید توان ۱۳۰۰ کیلووات.

^۱ Wind Turbine

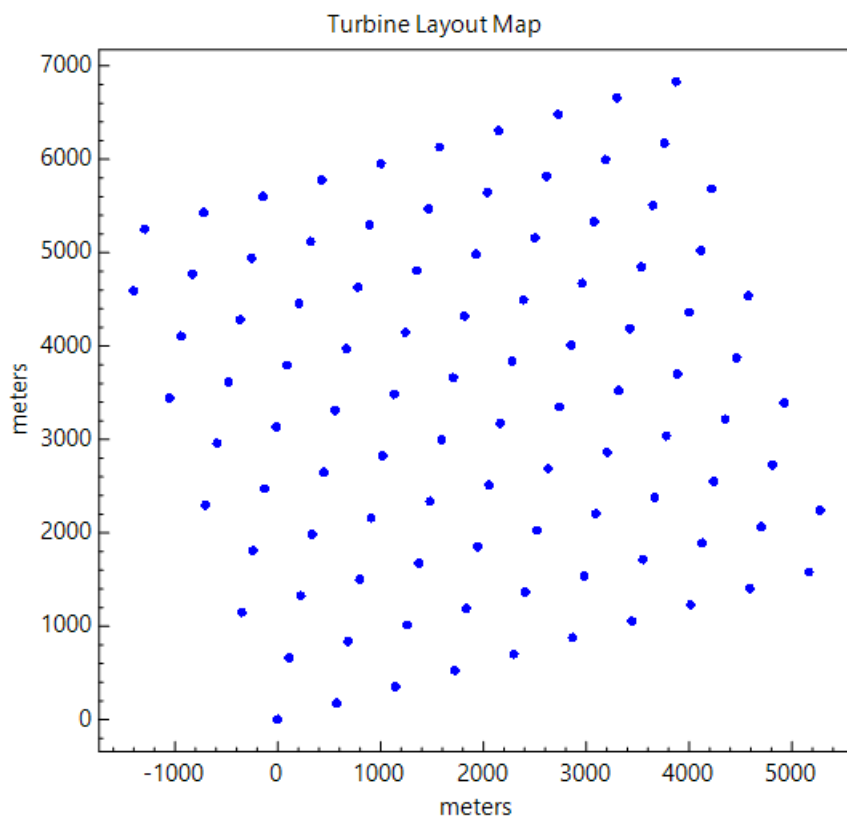


شکل ۲-۳: منحنی مشخصه توربین بادی Nordex N60.

۲-۳- مزرعۀ بادی^۱

یکی از پارامترهای مهم در تعیین عملکرد واحد تولید توان بادی، تعداد توربین‌های به کار رفته، نحوه چینش آن‌ها و Wake Effect است. در این تحقیق، از یک مزرعۀ بادی 10×10 استفاده شده است. به ترتیبی که فاصله بین توربین‌ها، ردیف‌های شامل توربین و افست بین توربین‌ها به ترتیب ۱۰، ۱۰ و ۵ برابر قطر روتور در نظر گرفته شده است. زاویه این ردیف‌ها با افق ۱۷ درجه است. به طور کلی نحوه چیدمان توربین‌های بادی در مزرعۀ بادی در قابل مشاهده است.

^۱ Wind Farm



شکل ۲-۴: نحوه چینش توربین‌ها در مزرعه بادی.

علاوه بر نحوه چینش توربین‌ها، جریان سیال نیز بر میزان تلفات ناشی از قرار گرفتن یک توربین در ناحیه Wake توربین دیگر تاثیر دارد. برای بررسی این اثر از Simple Wake Model با ضریب توربولانس ۰.۱ و در نتیجه تلفات ثابت ۱۱.۰۲ درصدی استفاده شده است.

۲-۴- تلفات

در سیستم موجود، انواع تلفات به صورت‌های زیر قابل بررسی هستند.

۲-۴-۱- تلفات ناشی از wake

این نوع از تلفات به دلیل قرار گرفتن یک توربین در ناحیه wake توربین دیگر حاصل می‌شود. مقدار این تلفات در این تحقیق ۱.۱ درصد در نظر گرفته شده است.

۲-۴-۲- تلفات Availability

انرژی در دسترس عبارت است از حاصل تقسیم مقدار انرژی تولید شده توسط توربین بر مقدار انرژی که توربین در حالت دائم کار می‌تواند تولید کند. در این تحقیق، مقدار تلفات انرژی در دسترس ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

۲-۴-۳- تلفات الکتریکی

در یک مزرعه الکتریکی در هنگام انتقال توان تولید شده مقداری تلفات رخ می‌دهد. در این تحقیق، مقدار تلفات الکتریکی ۲ درصد در نظر گرفته شده است.

۲-۴-۴- تلفات ناشی از عملکرد توربین

این نوع از تلفات، نشان‌دهنده مقدار توانی است که توربین به هر دلیلی در سرعت باد مشخص تولید نمی‌کند. در این تحقیق، مقدار تلفات ۲ درصد در نظر گرفته شده است.

۲-۵- افت عملکرد سالانه توربین^۸

در این تحقیق، در نظر گرفته شده است که به ازای گذشت بازه زمانی یک سال، مزرعه بادی ۰.۵ درصد از عملکرد خود را به دلیل استهلاک تجهیزات از دست می‌دهد.

⁸ Degradation

۶-۲- هزینه نصب^۹

هزینه‌های نصب این واحد تولید توان به کمک نرم‌افزار SAM، ۱۴۴۲ دلار به ازای هر کیلووات توان تولیدی به عنوان هزینه‌های توربین و ۱۱۸۱۷ دلار به ازای هر کیلووات توان تولیدی به عنوان تعادل هزینه‌ای سیستم در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت، مقدار کل هزینه نصب این واحد ۱۳۲۶۰ دلار به ازای هر کیلووات توان تولیدی تخمین زده می‌شود.

۷-۲- هزینه عملکردی^{۱۰}

هزینه عملکردی این واحد تولید توان به دو صورت ۵۰ دلار به ازای هر سال و ۱۰۰ دلار به ازای توان تولیدی در هر سال برآورد شده است.

۸-۲- پارامترهای اقتصادی^{۱۱}

با در نظر گرفتن دوره ۴۰ ساله عملکردی این سیستم، مقدار مالیات فدرالی و ایالتی به ترتیب ۳۰ و ۱۵ درصد به ازای هر سال شامل ۱۰۰ درصد هزینه‌های اولیه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است نرخ تورم^{۱۲} سالانه ۲.۶ درصد، نرخ واقعی تنزل^{۱۳} سالانه ۴ و در نهایت نرخ تنزل نامی^{۱۴} سالانه ۶.۶ درصد در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است قیمت فروش توافقی نیز ۰.۱۱ دلار به کیلووات ساعت با در نظر گرفتن نرخ صعود ۸ درصدی است.

^۹ Installation Cost

^{۱۰} Operating Cost

^{۱۱} Financial Parameters

^{۱۲} Inflation Rate

^{۱۳} Real Discount Rate

^{۱۴} Nominal Discount Rate

فصل ۳:

نتایج و بحث

شبیه سازی مدل حاصل به کمک نرم افزار SAM نسخه ۲۰۲۲.۱۱.۲۱ انجام شده و به صورت زیر گزارش می شود. لازم به ذکر است، گزارش حاصله از خود نرم افزار در قسمت پیوست ارائه شده است.

۳-۱- نتایج حاصل از شبیه سازی

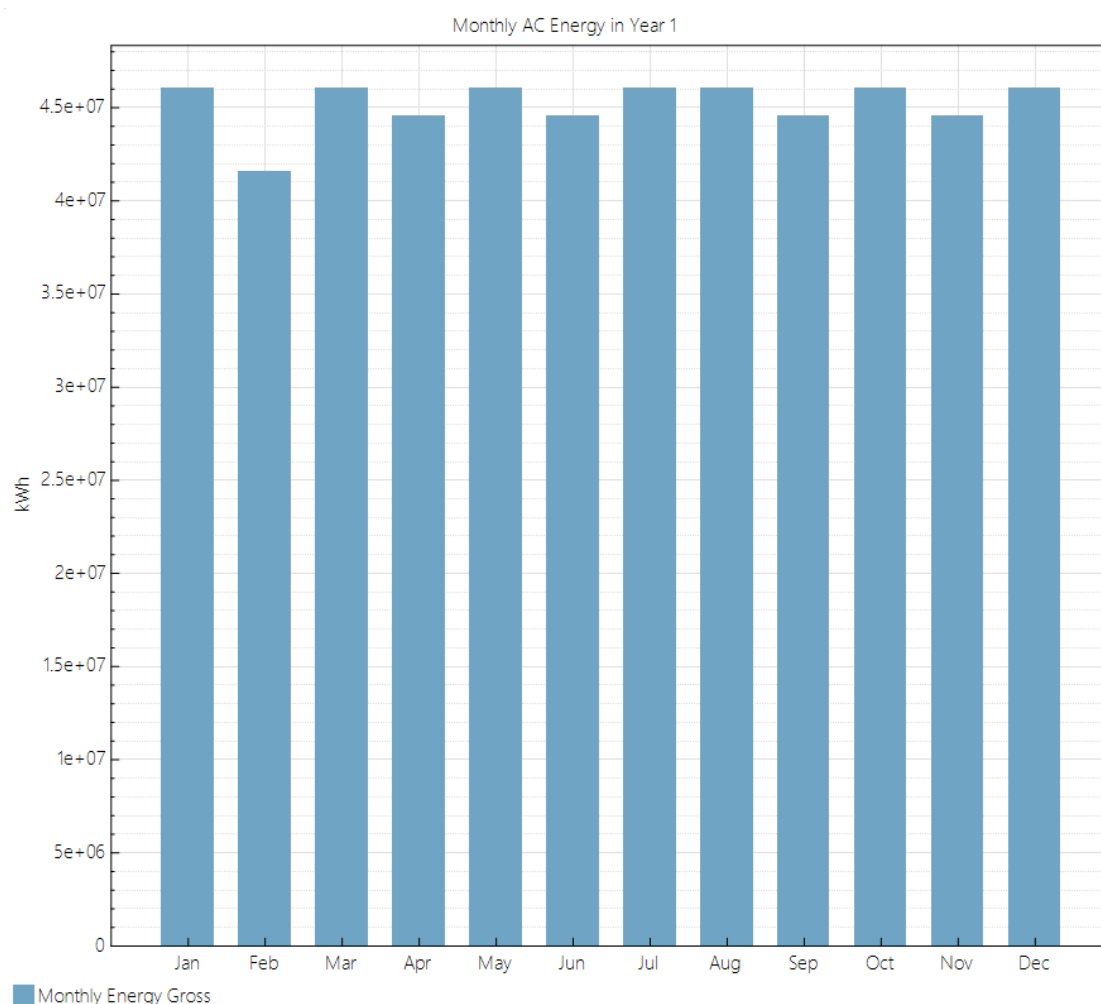
پارامترهای مهم اقتصادی و عملکردی سیستم در جدول ۳-۱ گزارش شده است. طبق اطلاعات حاصله، ضریب ظرفیت این واحد تولید توان ۴۷.۶ درصد و مقدار LCOE، ۱۹.۸۷ دلار بر کیلووات ساعت محاسبه شده است. این مقادیر نشان می دهند، واحد حاصله از نظر عملکردی در طیف متوسط و از نظر اقتصادی در طیف بسیار ضعیف قرار می گیرد و انرژی تولیدی آن گران است. مقدار مثبت NPV، نشان می دهد به طور کلی، مقدار بازگشت سرمایه از کل هزینه ها بیشتر بوده است.

جدول ۳-۱: نتایج حاصل از شبیه سازی.

Metric	Value
Annual AC energy in Year 1	542,050,048 kWh
Capacity	130,000 kW
Capacity factor in Year 1	47.6%
PPA price in Year 1	11.00 ¢/kWh
PPA price escalation	8.00 %/year
LPPA Levelized PPA price nominal	36.76 ¢/kWh
LPPA Levelized PPA price real	26.30 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy nominal	27.76 ¢/kWh
LCOE Levelized cost of energy real	19.87 ¢/kWh
NPV Net present value	\$643,077,632
IRR Internal rate of return	2.34 %
Year IRR is achieved	20
IRR at end of project	10.76 %
Net capital cost	\$1,773,630,080
Equity	\$868,021,504
Size of debt	\$905,608,576
Debt percent	51.06%

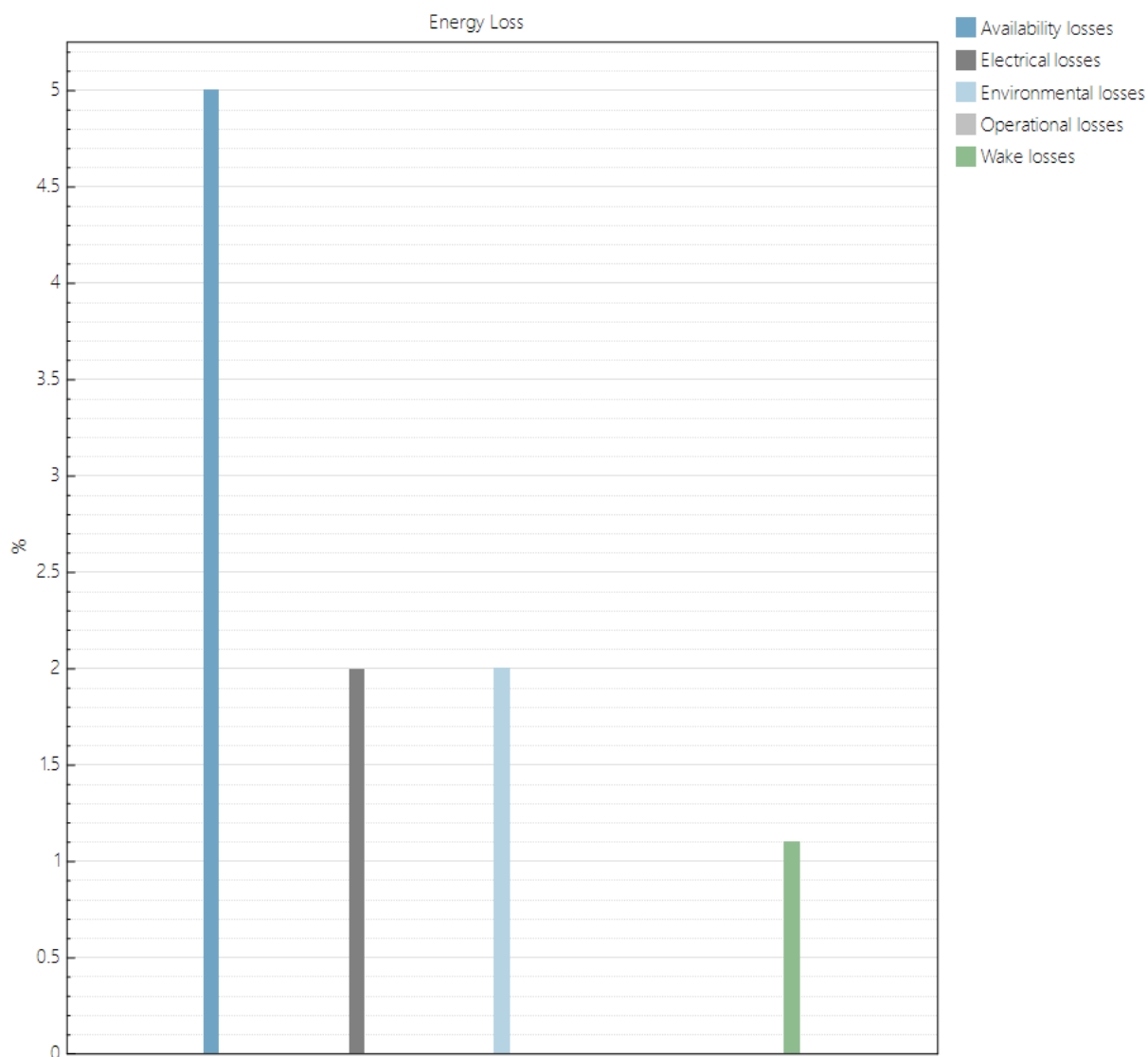
شکل ۳-۱ نشان دهنده مقدار انرژی تولیدی به تفکیک ماه است، که همانطور که مشاهده می شود با توجه به

داده‌های آب‌وهوایی کمترین مقدار انرژی تولیدی در ماه فوریه و بیشترین آن در ماه ژانویه است.



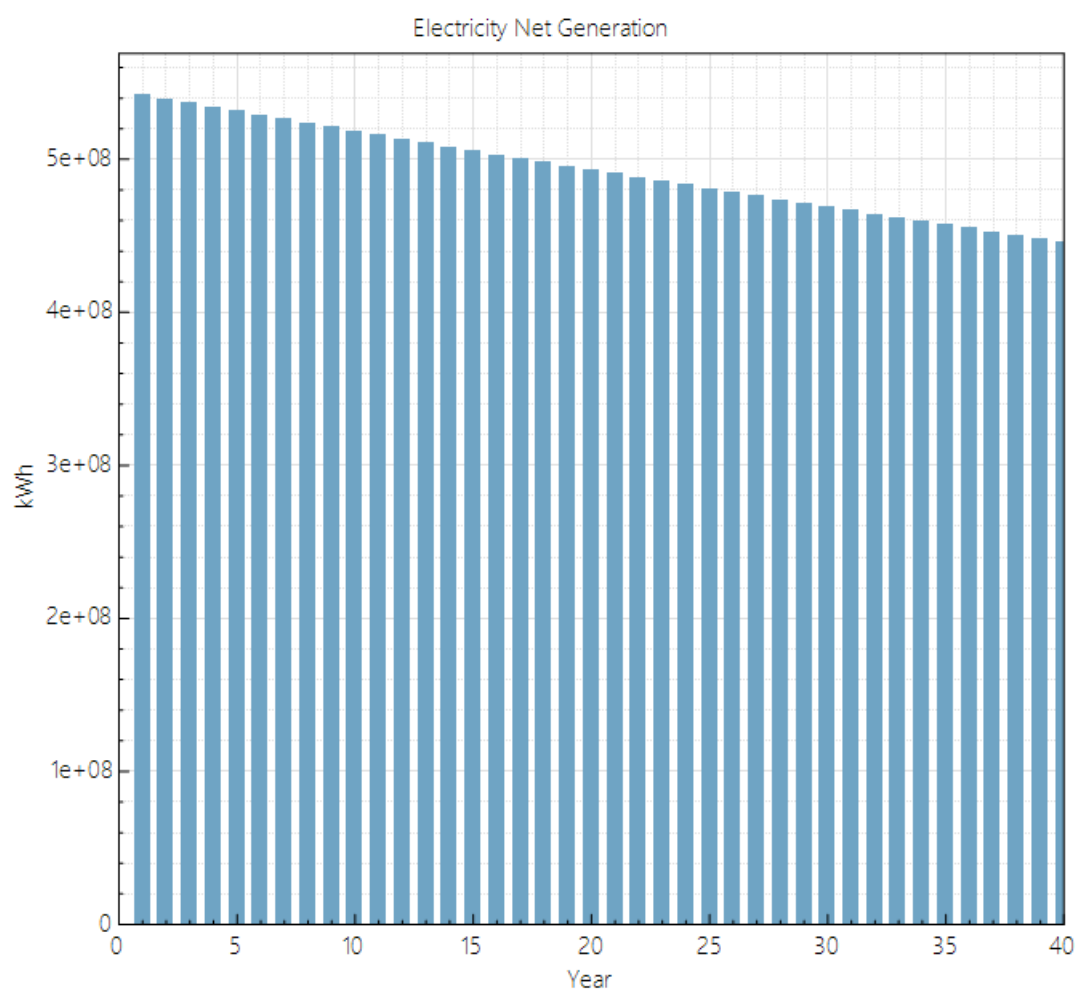
شکل ۱-۳: مقدار انرژی تولید شده در هر سال به تفکیک ماه.

شکل ۱-۳ نشان‌دهنده مقدار تلفات به تفکیک ذکر شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین تلفات مربوط به تلفات ناشی از Availability است.



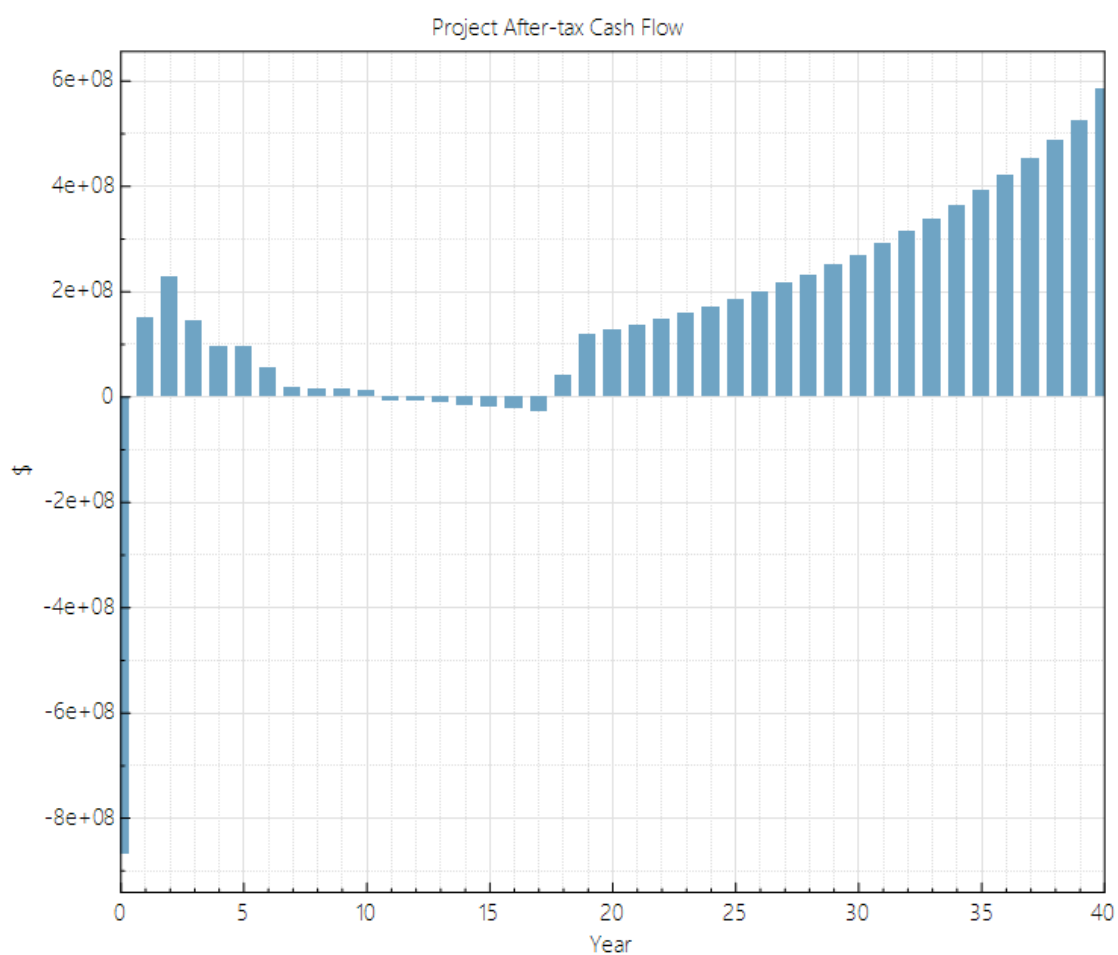
شکل ۳-۲: مقدار تلفات سیستم.

شکل ۳-۳ نشان‌دهنده مقدار انرژی تولیدی سالانه با در نظر گرفتن ۰.۵ درصد افت عملکرد واحد تولید توان به ازای هر سال است. سیر نزولی تولید توان به دلیل افت عملکرد سالانه است.



شکل ۳-۳: مقدار انرژی تولیدی سالانه با در نظر گرفتن افت عملکردی واحد تولید توان.

شکل ۳-۴: نیز نشان دهنده جریان سرمایه در بازه زمانی ۴۰ سال عملکردی این واحد تولید توان است.



شکل ۳-۴: جریان سرمایه در بازه عملکردی ۴۰ ساله واحد تولید توان.

پیوست

System Advisor Model Basic Report

Wind Power System
Single Owner

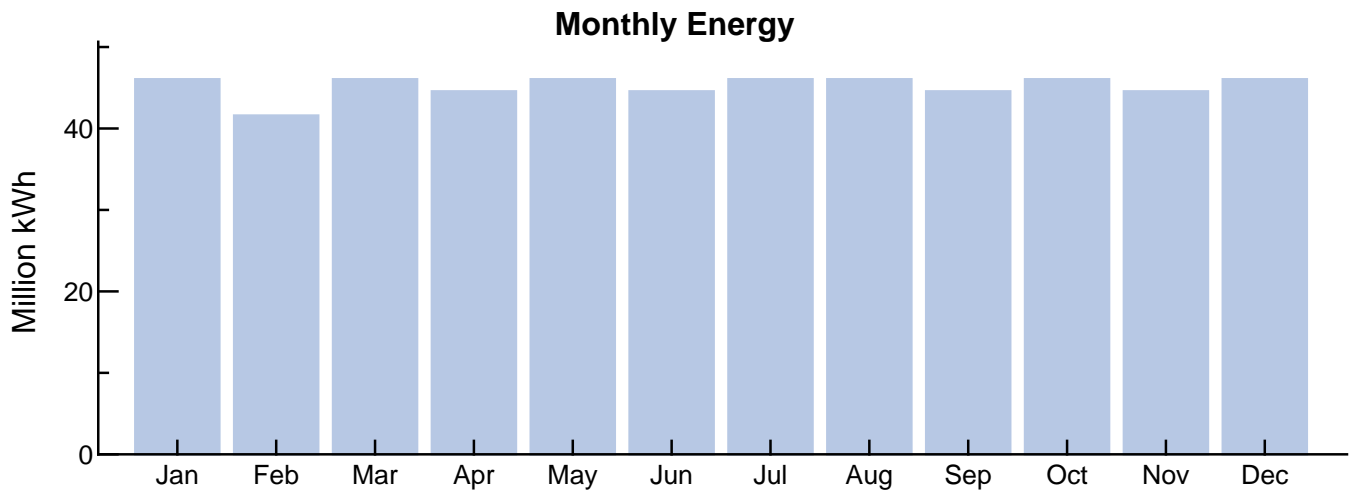
130,000 kW Nameplate Capacity
\$1,723,797,975 Installed Cost

Weibull K = <null>

Wind Power Class = <null>

Performance Model

Annual Output in Year 1	542,050,048 kWh
Capacity Factor	0.48



Financial model

Levelized Cost of Energy	27.8 cents/kWh
Net Present Value	\$643,077,632

