

طراحی، شبیه سازی و تحلیل اقتصادی نیروگاه خورشیدی 100 کیلوواتی با هدف افزایش سرمایه گذاری در منابع تجدید پذیر

محمد تورانی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق، تهران، ایران

پرهام جعفرپور

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق، تهران، ایران

محمدرضا شری چیان

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق، تهران، ایران

شایان عیدی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق، تهران، ایران

امیرحسین سربخش

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق، تهران، ایران

کوروش آپرناک

مدرس دانشگاه، دکترای مهندسی برق قدرت

فرامرز فقیهی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق، تهران، ایران

چکیده: انرژی بدون شک یکی از عوامل اساسی در پیشرفت و توسعه پایدار جوامع انسانی به شمار می رود. کاهش منابع تجدیدناپذیر، افزایش هزینه ها و پیامدهای زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت های فسیلی، اهمیت بهره گیری از انرژی های تجدیدپذیر را بیشتر نمایان کرده است. یکی از این منابع مهم انرژی، خورشید است. در این مقاله، طراحی سه بعدی و تحلیل یک نیروگاه فتوولتائیک با ظرفیت تولید 100 کیلووات، با استفاده از نرم افزار شبیه سازی فتوولتائیک (PV SOL) مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، محاسبات اقتصادی مربوط به احداث این نیروگاه در سناریوهای مختلف انجام شده است تا با مقایسه آنها، بهینه ترین حالت سرمایه گذاری شناسایی شود.

واژگان کلیدی:

تحلیل اقتصادی، سرمایه گذاری منابع تجدید پذیر، انرژی خورشیدی، امکان سنجی اقتصادی، نرم افزار PVSOL

مقدمه: صنعت برق به دلیل نقش حیاتی و ارتباط چندگانه با عوامل اقتصادی و اجتماعی، به عنوان یک صنعت پویا شناخته می شود. وابستگی بشر به این نوع انرژی برای رشد و رفاه اجتماعی بیانگر اهمیت آن است. استفاده از روش های بهینه تولید برق خورشیدی، که منجر به کاهش هزینه ها و سرمایه گذاری اولیه می شود و همچنین با توجه به افزایش قیمت سوخت های فسیلی، توجیه اقتصادی بیشتری دارد. این سیستم ها به طور گسترده در کشورهای مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته می شوند، از جمله کشورهای اروپای غربی، آمریکای لاتین، و مناطق خشک و صحرایی مانند قاره آفریقا و آسیا. در کشورهایی مانند کشورهای خاورمیانه که شرایط آفتابی بهتری دارند، مصرف کننده ها با استفاده از سیستم های برق خورشیدی متصل به شبکه برق، توان تولید و مصرف برق را بهبود می بخشند. این سیستم ها در طول روز برق تولیدی را به شبکه تحویل می دهند و در زمان های دیگر برق مصرفی از شبکه تأمین می شود. در این فرآیند، هزینه برق مصرفی بر اساس تفاوت بین برق تحویلی و مصرفی محاسبه می شود.

ایران به دلیل جغرافیای خود که شرایط مناسبی برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و به خصوص انرژی خورشیدی را فراهم می کند، ظرفیت بالقوه ای در این زمینه دارد. به طور خاص، شهر رفسنجان و منطقه ویژه اقتصادی آن به دلیل فعالیت های صنعتی بزرگ و همچنین شرایط آفتابی مناسب، به عنوان یکی از نقاط مناسب برای احداث و سیستم های برق خورشیدی انتخاب شده است. با توجه به تعداد روزهای آفتابی و نیمه آفتابی در این منطقه و میانگین حدود 8 ساعت تابش خورشید در طول روز، می توان حدود 2920 ساعت آفتابی در سال را برای تولید برق در نظر گرفت. صنعت برق به دلیل اهمیت زیربنایی و تأثیر گسترده ای که بر تمامی جوانب رشد اقتصادی و رفاه اجتماعی دارد، صنعتی بسیار پویا و اساسی به شمار می رود. صنعت برق برای ادامه حیات بشری و راه اندازی صنایع و سیستم های مورد نیاز جامعه نقش حیاتی ایفا می کند. این مقاله، با توجه به مطالعات پیشین، به بررسی عواملی از جمله شرایط هواشناسی، میزان تابش خورشیدی در منطقه، راندمان و کارایی سیستم ها، میزان تلفات انرژی و مقدار انرژی تولیدی و تزریقی به شبکه سراسری می پردازد (سامع، 1402). در ادامه، این پژوهش به بررسی چیدمان آرایه های فتوولتائیک جهت جلوگیری از سایه افکنی پنل ها و اشغال کمترین مساحت ممکن می پردازد. این چیدمان بهینه سازی شده موجب کاهش هزینه های سیستم و افزایش بهره وری نیروگاه از پتانسیل خورشیدی موجود می گردد. همچنین، منحنی خروجی شامل میزان تولید انرژی سالیانه، تلفات و سایه افکنی را استخراج و تحلیل می کند. این داده ها به عنوان یکی از ورودی های امکان سنجی اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته اند. (احدی، 1401). در پژوهشی که در شهر مشهد انجام شده است، هدف اصلی بهبود استفاده از انرژی خورشیدی برای آبیاری مزارع و تأمین آب شرب در منطقه ای به مساحت 35.1213 مترمربع است. این مطالعه موردی اجزای مختلف سیستم پمپ خورشیدی را تحلیل و ارزیابی می کند (انسان دوست، 1403). در پژوهشی دیگر در این زمینه، هدف امکان سنجی ساخت نیروگاه در تهران و ارائه راهکاری برای افزایش راندمان آن از طریق استفاده از سیستم خودکار اسپری آب بر روی پنل ها به جهت خنک سازی بوده است (شری چیان، 1402). در پژوهش مشابه، فقط هدف پژوهش شبیه سازی و احداث یک نیروگاه خورشیدی منفصل از شبکه به منظور مصارف زراعی انجام شده است (دهقانی، 1402). نرم افزار مورد استفاده در پژوهش PVSOL است که پارامترهای فنی جامعی از جمله ضریب کاهنده راندمان تجهیزات و طول عمر پنل ها در شبیه سازی لحاظ نموده و همچنین با معرفی منطقه جغرافیایی مورد نظر و کلیه پارامترهای آب و هوایی از جمله شرایط آب و هوایی، میزان تابش، زاویه تابش و سرعت باد نیز در این شبیه سازی لحاظ شده است. به طور کلی، مدل های با دقت بالا می توانند خروجی هایی با قابلیت اطمینان و هماهنگی با واقعیت ارائه دهند. این خروجی ها می توانند به تحلیل های اقتصادی مرتبط با کشف قیمت احداث نیروگاه ها کمک کنند، به ویژه در زمینه هایی نظیر مدت زمان لازم برای بهره وری و نیازمندی های سرمایه گذاری. در ادامه، این مطالعه به بررسی امکان بهره برداری از انرژی خورشیدی در شهر فارس می پردازد. نتایج



نشان می دهد که افزایش قدرت پنل لزوماً موجب افزایش تولید انرژی خورشیدی نمی شود. همچنین، در این پژوهش پنل های 285 و 60 وات به عنوان بهترین و پنل 136 وات به عنوان ضعیف ترین گزینه از نظر تولید انرژی محاسبه شده اند. از نظر سرمایه گذاری، پنل 60 وات به صرفه تر تشخیص داده شده است (اسدی، 1402). از خلاء های تحقیقاتی موجود در مقالات پیشین می توان به عدم بررسی و مقایسه وام در شرایط مختلف اشاره کرد. مقاله های خوانده شده هیچ کدام مقایسه وام را در سناریوهای سرمایه گذاری گوناگون در نظر نگرفته اند. در منطقه ویژه رفسنجان، طراحی و احداث یک نیروگاه خورشیدی با ظرفیت 100 کیلووات از جنبه های فنی و موقعیت جغرافیایی خورشیدی بررسی و اجرا شده است. در پایان نیز، به بررسی سناریوهای مختلف سرمایه گذاری، ارزیابی توجیه پذیری اقتصادی آنها، و مقایسه آنها با یکدیگر، با هدف یافتن روش بهینه سرمایه گذاری متناسب با شرایط اقتصادی ایران، پرداخته شده است. سناریوهای یاد شده با هدف ایجاد بستر مقایسه ای به شرح زیر انتخاب گردیده اند:

۱. سرمایه گذاری کاملاً خصوصی
۲. سرمایه گذاری با اخذ وام بانکی به نرخ 8 درصد از سرمایه مورد نیاز، به میزان 50 درصد
۳. سرمایه گذاری با اخذ وام بانکی به نرخ 8 درصد از سرمایه مورد نیاز، به میزان 70 درصد
۴. سرمایه گذاری با اخذ وام بانکی به نرخ 8 درصد از سرمایه مورد نیاز، به میزان 80 درصد
۵. سرمایه گذاری با اخذ وام بانکی به نرخ 16 درصد از سرمایه مورد نیاز، به میزان 70 درصد

روش تحقیق:

با توجه به شرح داده شده، نیروگاه خورشیدی با ظرفیت 100 کیلووات با استفاده از نرم افزار PVsol طراحی و شبیه سازی شده است. PVsol به عنوان یکی از بهترین نرم افزارها در زمینه طراحی و شبیه سازی نیروگاه های فتوولتائیک شناخته می شود و خروجی ها و داده هایی که ارائه می دهد بسیار دقیق و قابل اطمینان هستند. این نرم افزار به عنوان یک ابزار جامع شناخته می شود که امکانات گسترده ای را برای محاسبه و تجزیه و تحلیل اطلاعات فنی و عملکردی نیروگاه های خورشیدی فراهم می کند. نرم افزار PVsyst نیز به عنوان یک ابزار دیگر مورد استفاده در این زمینه اشاره شده است، با این حال PVsol به دلیل قابلیت ها و ویژگی های خاص خود، مورد توجه بیشتری قرار می گیرد. شبیه سازی در PVsol به صورت سه بعدی انجام می شود که این ویژگی باعث محاسبه دقیق تر و واقع گرایانه تر نتایج می شود. همچنین، این نرم افزار امکان انتخاب موقعیت جغرافیایی را نیز فراهم می کند که با در نظر گرفتن شرایط محلی و فنی، می توان بهترین مکان برای نصب نیروگاه را انتخاب کرد. ویژگی هایی که PVsol قادر به محاسبه آنها است مواردی از قبیل مساحت مورد نیاز، تعداد و نوع پنل ها، تعداد و نوع اینورترها، توان تولیدی در طول سال، نمودارهای تولید توان، توان تزریقی به شبکه، توان مصرفی از شبکه، سرعت باد، راندمان سیستم، و توان تولیدی مازول های خورشیدی و دیگر متغیرهای مرتبط را شامل می شود. همانطور که اشاره شد، این نرم افزار قادر به طراحی سه بعدی سیستم مورد نظر و همچنین تنظیم چیدمان آرایه ها به صورت عمودی یا افقی را می باشد. با استفاده از حالت سه بعدی نرم افزار می توان جایگاه مورد نظر، موانع موجود در آن جایگاه، و همچنین سیستم خورشیدی برای شرایط مختلف را طراحی کرد.

یافته ها :

مراحل شبیه سازی به ترتیب زیر بوده است:

۱. تنظیم جهت گیری نسبی^۱
۲. فاصله پایه های نگهدارنده پنل ها^۲
۳. دریافت نحوه برقراری اتصال پنل ها و اینورترها که با رنگ های مختلف از هم تشخیص داده می شوند.
۴. دریافت نتایج به صورت نمودارهایی از میزان توان تولیدی نیروگاه در ماه های مختلف سال.

همان طور که مشاهده می شود، بیشترین میزان توان تولیدی مربوط به ماه های ژوئن و ژوئیه است (شکل (6)). در شکل (7) نسبت PR^۳ اینورتر در طول ماه های سال مشخص می باشد. بالاترین مقدار این نسبت در ماه های دسامبر و ژانویه قرار دارد که در حدود 80 PR – 100 PR می باشد که دلیل این رخداد کاهش بازدهی اینورترها حین فصول گرم سال و نیز در مقابل آن افزایش بازدهی در فصول سرد سال است. همچنین در شکل (8) نمای فوقانی نحوه اتصال کابل قدرت به پنل ها قابل مشاهده می باشد و در شکل (9) نمودار تک خطی اتصال تجهیزات اصلی و اتصال به شبکه قابل مشاهده است. تجهیز دیگر تجهیزات مورد استفاده در طراحی نیروگاه به قرار زیر می باشد: پنل های خورشیدی برند Ja Solar و اینورتر نیز که با توجه به توان خروجی مورد نیاز نیروگاه انتخاب شده از برند Solar Technology AG می باشد که مشخصات دقیق و پارامترهای الکتریکی آنها در جدول (3) قابل مشاهده می باشد. پیش از این اشاره شد که هدف اصلی این مقاله، انجام محاسبات اقتصادی و مقایسه حالت های مختلف سناریوهایی است که برای حالت های مختلف تامین سرمایه اولیه در نظر گرفته شده اند. این مقایسه با استفاده از جداول دقیق و نمودارهای تحلیلی که برای هر یک از سناریوها تهیه شده اند، صورت گرفته است. در این مقاله، به دقت نحوه تأثیر متغیرهای مختلف اقتصادی بر بازپرداخت وام ها بررسی شده و از آنالیز داده ها برای ارائه راهکارهای بهینه در زمینه مدیریت بدهی ها استفاده شده است. هدف از این تحلیل، کمک به محققان برای درک بهتر روش های مالی و انتخاب استراتژی های موثرتر در مدیریت منابع مالی شان است. اطلاعات ارائه شده درباره پنج حالت مختلف تأمین مالی و ساخت نیروگاه را می توان به صورت زیر بازنویسی و گسترش داد: در سناریوی نخست، سرمایه گذاری خصوصی بررسی شده است که در آن تمام هزینه های احداث نیروگاه بدون استفاده از وام بانکی تأمین شده اند، اطلاعات دقیق و تفصیلی این حالت در جدول (4) و شکل (10) قابل مشاهده است. در حالت دوم، تمرکز ما روی استفاده از وام صنعتی است. این حالت شامل جزئیات مربوط به مبلغ وام و شرایط بازپرداخت آن می باشد که در جدول (5) و شکل (11) ارائه شده اند. حالت سوم، شرایطی را مد نظر قرار داده که در آن 70% از هزینه های ساخت نیروگاه از طریق وام صنعتی تأمین می شود. این حالت نیز در جدول (6) و شکل (12) توضیح داده شده است. در چهارمین سناریو، امکان بهره مندی از دوره تنفس 18 ماهه برای بازپرداخت وام در نظر گرفته شده است، که در این حالت 80% هزینه ها از طریق وام تأمین می شود. تفصیلات این سناریو در جدول (7) و شکل (13) عرضه شده است. سناریوی پنجم، آخرین حالت بررسی شده، بازپرداخت دو برابر سرمایه به همراه نرخ بازپرداخت 16%، زمان تنفس 18 ماهه و تأمین 70% از هزینه احداث از طریق وام را در بر می گیرد. جزئیات این حالت در جدول (8) و شکل (14) نشان داده شده

¹ Relative Orientation

² Support Clearance

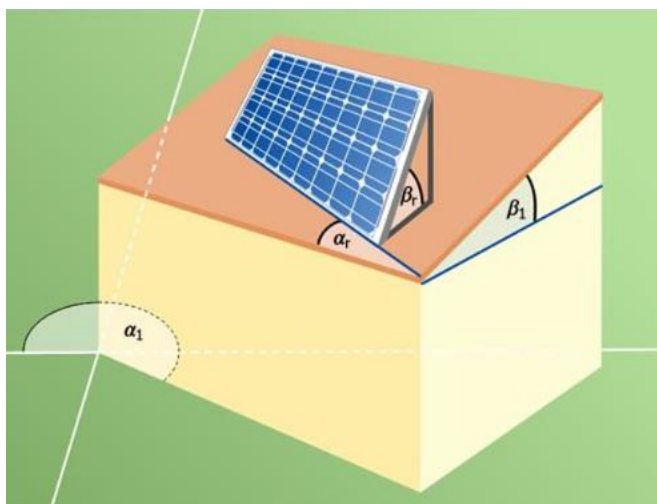
³ Performance Ratio

است. هر یک از این حالات به دقت بررسی شده تا نشان دهند چگونه شرایط مالی متفاوت می توانند در روند تامین سرمایه و جریان نقدینگی و سودآوری پروژه های صنعتی (به صورت خاص احداث نیروگاه خورشیدی) تاثیری داشته باشد.

شبیه سازی:

در این بخش مراحل شبیه سازی ارائه شده است:

جهت گیری نسبی:



شکل (۱) جهت گیری نسبی پنل ها نسبت به زاویه تابش خورشید

در این بخش از شبیه سازی نیروگاه، جهت گیری و موقعیت پنل ها با توجه به زاویه ها و اندازه های محاسبه شده انتخاب می شود. بخش ورودی^۴ مربوط به انتخاب سطح شیب دار است که در این قسمت، شیب پنل صفر درجه و جهت گیری نصب پنل ها با توجه به جهت تابش خورشید 180 درجه انتخاب شده است، به طوری که شیب پنل ها در مکان قرارگیری نیز نسبت به سطح در ساعت 15:00 تنظیم شده است. همچنین جهت چرخش پنل ها نیز 180 درجه می باشد. همان طور که در شکل (1) زیر مشاهده می شود، پنل نسبت به مبدا خود چرخیده و شیب آن نسبت به اندازه β_1 تغییر کرده است که این تغییر زاویه طبق ساعت 15:00 و فاصله قرارگیری بر روی سقف با توجه به شکل به اندازه α_2 است. همچنین، چرخش قرارگیری پنل بر روی سقف نیز به اندازه β_1 می باشد. تنظیمات دقیق جهت گیری و شیب پنل ها، به بهینه سازی عملکرد سیستم و بهره وری بیشتر از انرژی خورشیدی کمک می کند. با توجه به اینکه شیب و جهت گیری پنل ها نقش مهمی در جذب حداکثری تابش خورشید دارند، محاسبات این چینی و شبیه سازی ها از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

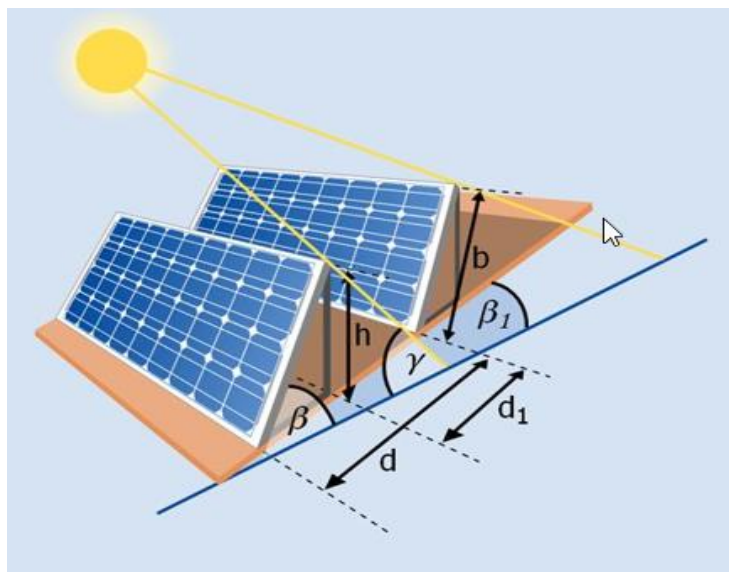
جدول (1) جهت گیری نسبی پنل ها نسبت به زاویه تابش خورشید

Input (Degree)		Results (Degree)	
Inclination of mounting surface β_1	0	Mount angle β_2	15

⁴ Input data

Orientation of mounting surface α_1	180	Alignment to the reference edge α_2	0
Resulting module inclination	15	Reference edge	Edge1
Resulting module orientation	180		

فاصله پایه های نگهدارنده پنل ها :



شکل (2) فاصله پایه های نگهدارنده پنل ها

با توجه به شدت بالای تابش های مستقیم و پراکنده در ناحیه منتخب و عدم وجود معارض و یا سازه های بلند مرتبه که سبب سایه اندازی و کاهش راندمان شوند، نحوه چیدمان سلول ها به صورت دو طبقه در نظر گرفته شد تا مباحثی از جمله هزینه بالای زمین مورد نیاز نیز برای واحدهای کوچک صنعتی پوشش داده شود، البته نحوه و زاویه تابش نیز در این ناحیه به انجام این عمل کمک شایانی نمود و این موضوع می بایست مد نظر قرار گیرد که این نحوه چیدمان در مناطق مختلف ممکن است بنا به شرایط جغرافیایی و موارد فوق امکان پذیر نباشد.

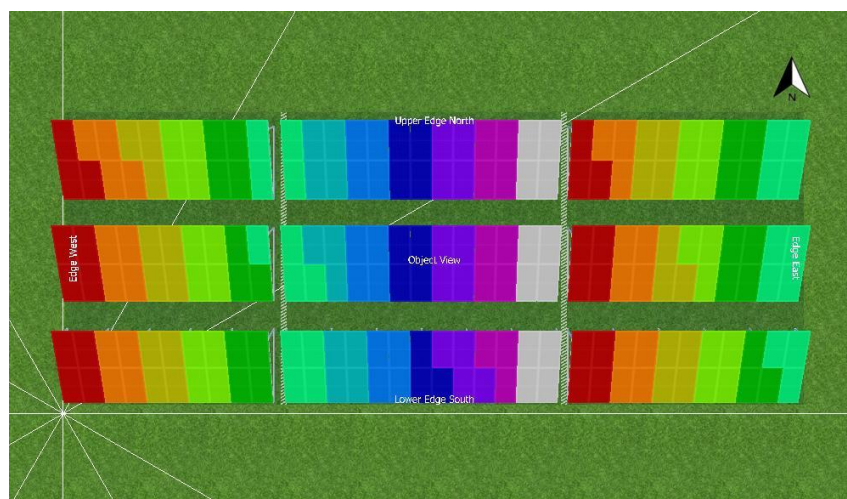
شکل (2) نشان دهنده نحوه قرارگیری پنل ها نسبت به یکدیگر و ارتفاع سطح زیرین در جهت تابش نور خورشید است. در بخش ورودی، فاصله b (یعنی عرض پنل) دارای مقدار 2.094 متر و همچنین ارتفاع تکیه گاه پنل از سطح زیرین 0.542 متر در نظر گرفته شده است. زاویه شیب پنل ها نسبت به موقعیت نصب، 15 درجه و جهت چرخش هر یک از پنل ها 180 درجه می باشد. زاویه ارتفاع خورشید که با اندیس γ در شکل نشان داده شده نیز 36.25 درجه است. بخش بعدی نتایج اعمال ورودی ها را نشان می دهد. در شکل (2)، عمق ردیف $d - d_1$ به معنای فاصله بین ابتدای پنل جلویی تا انتهای پایه پنل است که مقدار آن 2.023 متر می باشد. اندازه بعدی مربوط به فاصله بین پنل ها است (d_1) که 0.739 متر در نظر گرفته شده. آخرین بخش که بر اساس ورودی ها اندازه گیری شده، فاصله میان دو لبه ابتدایی پنل ها (d) است که 2.762 متر داده شده می باشد. این تنظیمات و موقعیت دهی دقیق پنل ها به

بهینه سازی عملکرد سیستم و بهره وری بیشتر از انرژی خورشیدی کمک می کند. در این شبیه سازی، توجه به ارتفاع و فاصله پنل ها از یکدیگر و همچنین میزان شیب و جهت چرخش آن ها، اهمیت زیادی در جذب حداکثری تابش خورشید و کارایی سیستم دارد.

جدول (2) فاصله پایه های نگهدارنده پنل ها

Reference	value	unit
Module mount width b	2.094	m
Mount height h	0.542	m
Resulting module inclination β	15	degree
Resulting module orientation	180	degree
Inclination of mounting surface β_1	0	degree
Orientation of mounting surface	180	degree
Solar elevation angle	36.25	degree

شکل (3) نحوه برقراری اتصال پنل ها و اینورترها را با رنگ های مختلف نشان می دهد که با شکل (9) و نمودار تک خطی اتصال تجهیزات اصلی مطابقت دارد. شکل (4) نمایه فوقانی⁵ جهت نمایش نحوه چیدمان پنل ها و پایه های⁶ نگهدارنده به همراه مسیرهای دسترسی تعمیرات و همچنین شکل (5) نقشه ابعادی⁷ آرایه های فتوولتائیک را نشان می دهد.



شکل (3) نحوه برقراری اتصال پنل ها و اینورترها را با رنگ های مختلف

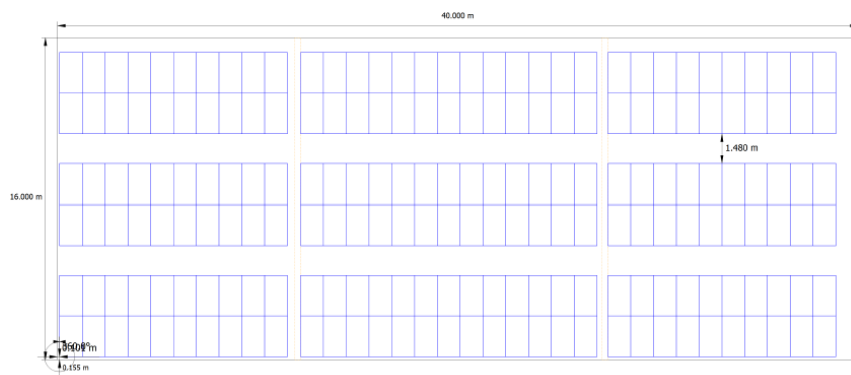
⁵ Top view

⁶ supports

⁷ outline drawing

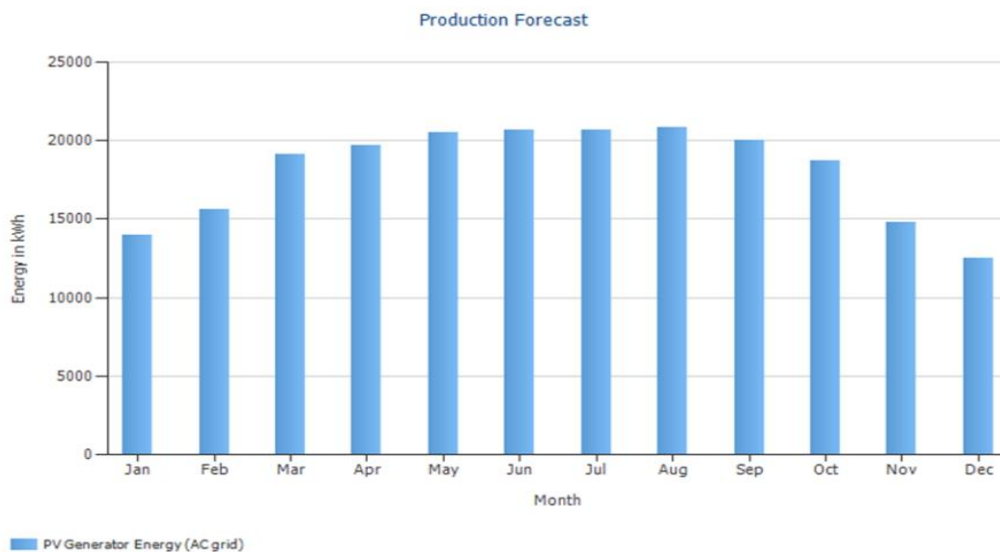


شکل (4) نمایه فوقانی جهت نمایش نحوه چیدمان پنل ها

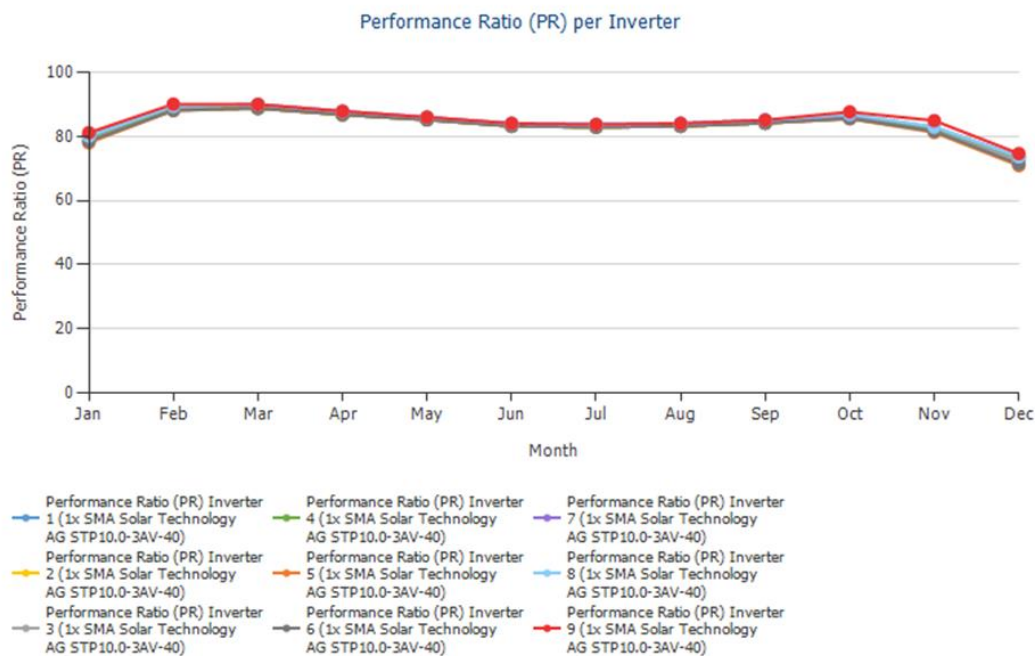


شکل (5) نقشه ابعادی آرایه های فتوولتائیک

در شکل (6) توان تولیدی نیروگاه در ماه های مختلف و همچنین در شکل (7) نمودار عملکرد اینورتر در همه ی ماه های سال با توجه به دمای هوا در مقاطع مختلف سال ارائه شده که پیشتر در بخش یافته های پژوهش در خصوص آنها توضیح داده شده است.



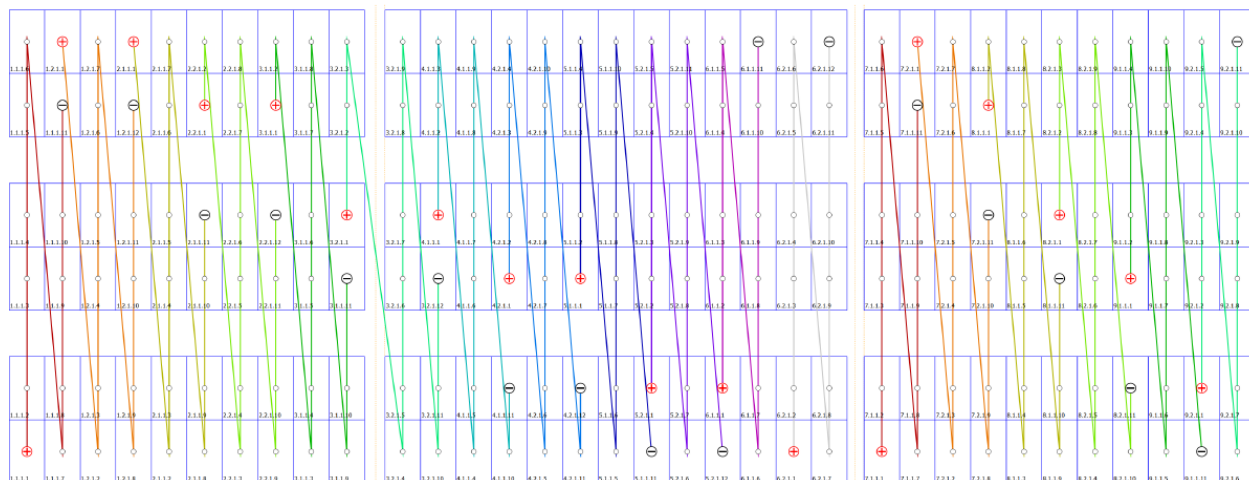
شکل (6) توان تولیدی نیروگاه در ماه های مختلف



شکل (7) نمودار عملکرد اینورتر در همه ی ماه های سال

دیاگرام کابل⁸

دیاگرام کابل در شکل (8) به طور واضح نشان می دهد که پنل ها چگونه به یکدیگر متصل می شوند. با استفاده از این دیاگرام، می توان به راحتی طول کابل های مورد نیاز و هزینه های مرتبط با آن ها را محاسبه کرد. نکته مهم دیگری که حائز اهمیت می باشد این است که با توجه به دو طبقه بودن پنل ها، هزینه کابل ها و در پی آن هزینه احداث نیروگاه به طور قابل توجهی کاهش می یابد. این امر به نوبه خود منجر به صرفه جویی در منابع مالی و افزایش بهره وری پروژه خواهد شد. با بهره گیری از یک برنامه ریزی دقیق و استفاده از دیاگرام های کابل مناسب، می توان بهینه ترین و اقتصادی ترین روش ها را برای اتصال پنل ها و مدیریت هزینه ها انتخاب کرد.



شکل (8) نحوه اتصال الکتریکی پنل ها در نیروگاه خورشیدی مورد مطالعه

تجهیزات استفاده شده: تجهیزات اصلی استفاده شده در این شبیه سازی پس از کشف قیمت و با توجه به صرفه اقتصادی انتخاب گردیده اند، و در عین حال سعی شده است ضمن رعایت عملکرد و راندمان رضایت بخش، در دسترس بودن آن در بازار داخلی مد نظر قرار گیرد تا بسیاری از هزینه های بالاسری مرتبط با خرید، انتقال پول و انتقال تجهیزات مرتفع گردد و به شرح جدول (3) می باشد و در ادامه توضیحات مختصری در خصوص آنها ارائه شده است.

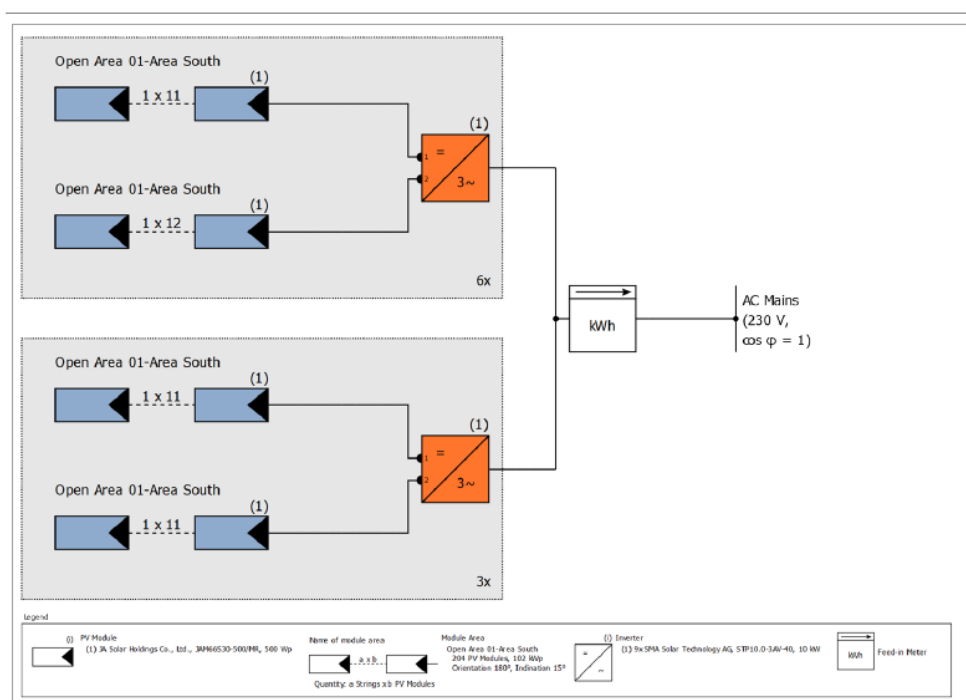
جدول (3) تعداد تجهیزات استفاده شده در نیروگاه

#	Type	Manufacturer	Name	Quantity	unit
1	PV Module	JA Solar Holdings CO,Ltd	JAM66S30-500/MR	204	piece
2	Inverter	SMA Solar Technology AG	STP10.3-3AV-40	9	piece
3	Cable	-	String Cable 4 mm ² Copper	300	m
4	Cable	-	AC cables 3-phase2.5 mm Copper	120	m
5	components	-	Transformer 0.4/20 kV	1	piece
6	components	-	Feed in Meter	1	piece
7	components	-	Fuse CUTOOUT 1	1	piece

⁸ Cable Diagram

پنل های خورشیدی: ماژول های فتوولتائیک با تشکیل آرایه فتوولتائیک، یک سیستم خورشیدی را ایجاد می کنند که برق خورشیدی را برای کاربردهای تجاری و مسکونی تولید و عرضه می نماید. در این مقاله، پنل های خورشیدی مدل JAM66S30-500/MR از شرکت Ja Solar Holdings Co مورد بررسی قرار گرفته اند.

این پنل ها با بهره وری بالا و قابلیت تبدیل انرژی خورشیدی به برق، به طور گسترده ای در موارد مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. سیستم های خورشیدی متشکل از این پنل ها، به دلیل کارایی و دوام بالای خود، گزینه ای ایده آل برای کاهش هزینه های انرژی و استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر محسوب می شوند. با توجه به ویژگی های فنی و عملکرد برجسته این مدل، می توان انتظار داشت که بهره وری و پایداری سیستم های خورشیدی نصب شده با این پنل ها به طور قابل توجهی افزایش یابد.



شکل (9) دیاگرام تک خطی نیروگاه

اینورتر: یک اینورتر در سیستمی به کار می رود که در آن نیاز به خروجی برق متناوب است. برای عملکرد بهینه، اینورتر باید دارای ولتاژ ورودی متناسب با باتری باشد. علاوه بر این، اندازه اینورتر باید حدود 20 تا 25 درصد بزرگتر از کل بار متصل به آن باشد تا از ظرفیت و عملکرد صحیح سیستم اطمینان حاصل شود.

در این مقاله، همانطور که در شکل (9) قابل مشاهده است اینورتر انتخابی مدل Solis از شرکت Solar Technology AG است. اینورترهای Solar Technology با طراحی کارآمد و قابلیت های پیشرفته، انتخاب مناسبی برای استفاده در سیستم های خورشیدی خانگی و تجاری محسوب می شوند. این دستگاه ها با ارائه برق متناوب به صورت پایدار و مطمئن، به بهبود کارایی و دوام سیستم های انرژی تجدیدپذیر کمک می کنند.

فضای مورد نیاز احداث نیروگاه :

در این بخش به گسترش نیروگاه 100 کیلوواتی پرداخته می شود که زمینی به مساحت 640 متر مربع برای نصب پنل های خورشیدی مورد نیاز است. اما با توجه به فضاهایی که هر پنل برای جابه جایی هوا و تعمیر و نگهداری لازم دارد و فضاهایی از جمله ساختمان های اداری، نگهداری و کنترل، این نیروگاه در مجموع به حدود 1300 متر مربع فضا احتیاج دارد.

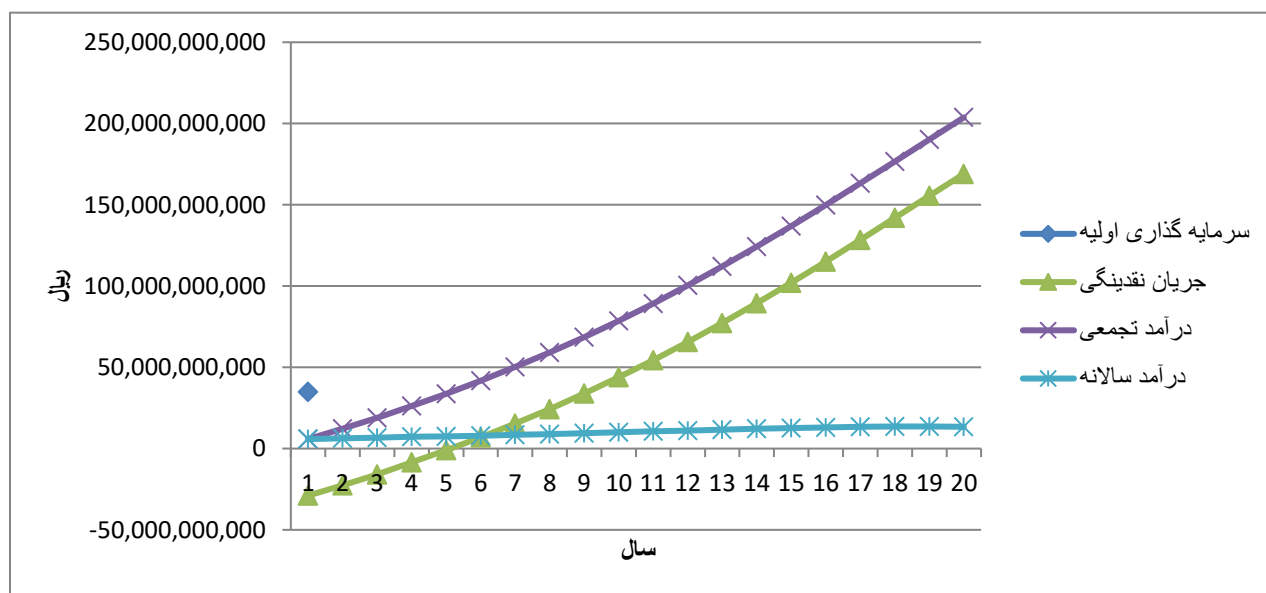
نتایج محاسبات اقتصادی :

در راستای امکان سنجی اقتصادی و کشف حالت های بهینه سرمایه گذاری، با در نظر گرفتن شروط و قیود مرتبط با سرمایه گذاری و احداث نیروگاه، این موضوع در پنج سناریو مختلف که شرح موارد پنج گانه آن در مقدمه ارائه شده است مورد بررسی قرار گرفت.

نمودار ها و جداول مربوط به این پنج سناریو به شرح زیر است :

جدول (4) محاسبات سناریو اول

جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 100KW بدون اخذ وام	
34,800,000,000 ریال	هزینه احداث نیروگاه
1.1	حداقل ضریب تعدیل
203,760,406,982 ریال	درآمد تجمعی
2920	تولید سالانه
168,960,406,982 ریال	سود تجمعی در پایان سال بیستم
6.13	آغاز سودآوری
22,000 ریال	مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت



شکل (10) محاسبات سناریو اول



13th International Conference on

Electrical , Electronic
Engineering and Smart Grids

Event Place: Tbilisi, Georgia

www.Eesconf.ir

سیزدهمین کنفرانس بین المللی

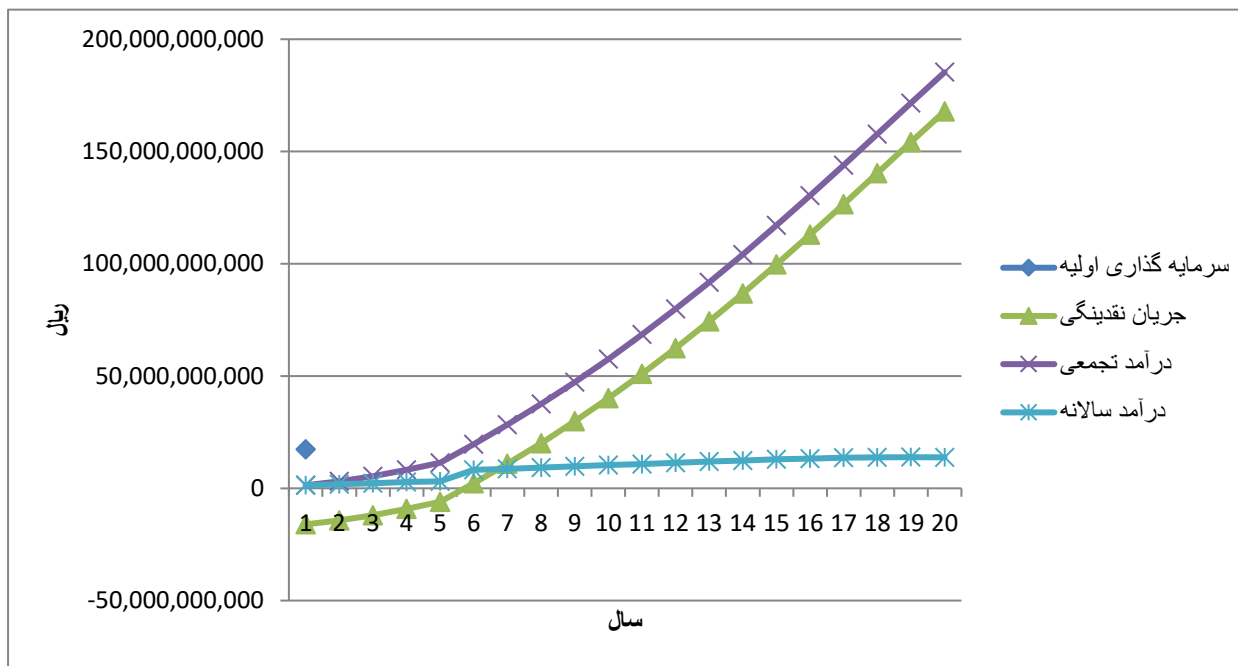


مهندسی برق، الکترونیک و شبکه های هوشمند | گرجستان

13th International Conference on Electrical , Electronic Engineering and Smart Grids
مجلات معتبر بین المللی شهرپور ماه ۱۴۰۳

جدول (5) محاسبات سناریو دوم

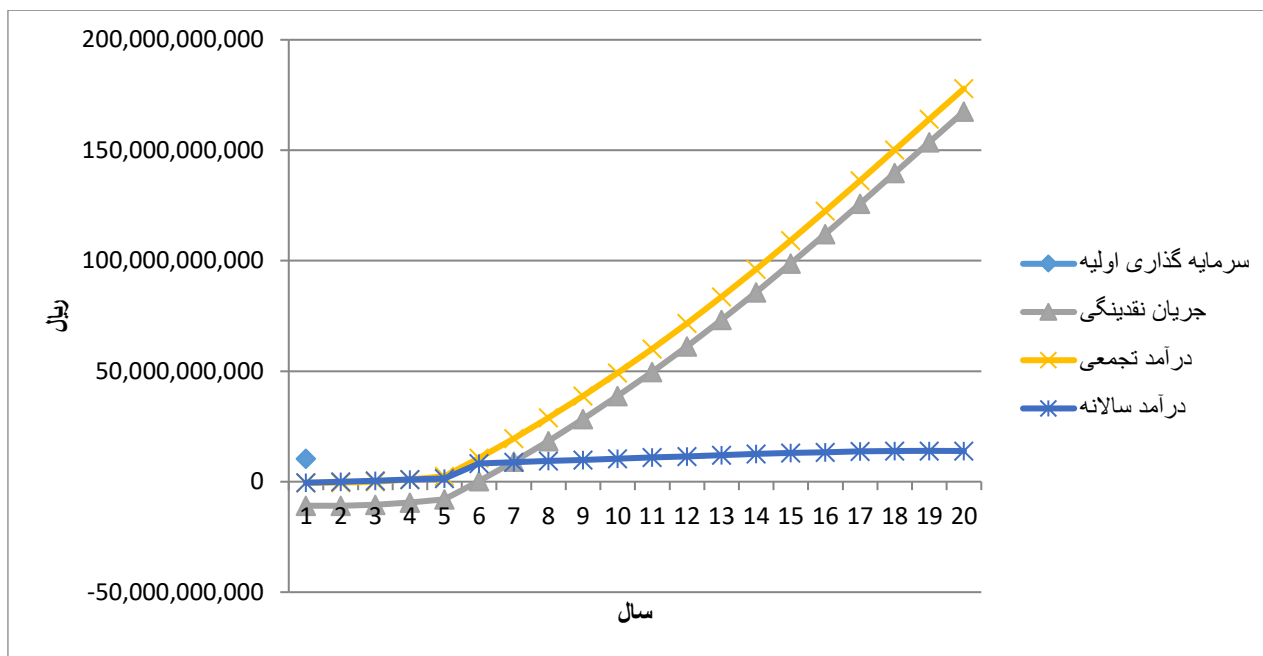
جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 100KW با 50% وام و سود 8 %	
1 MW	ظرفیت نیروگاه
34,800,000,000 ریال	هزینه احداث نیروگاه
17,400,000,000 ریال	سرمایه گذاری اولیه
1.1	حداقل ضریب تعدیل
185,316,406,982 ریال	درآمد تجمعی
8%	درصد سود وام
5	مدت زمان بازپرداخت وام
17,400,000,000 ریال	مبلغ وام قابل دریافت
2920	تولید سالانه
18	مدت زمان تنفس (به ماه)
167,916,406,982 ریال	سود تجمعی در پایان سال بیستم
6.73	سنوات شروع سودآوری
22,000 ریال	مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت



شکل (11) محاسبات سناریو دوم

جدول (6) محاسبات سناریو سوم

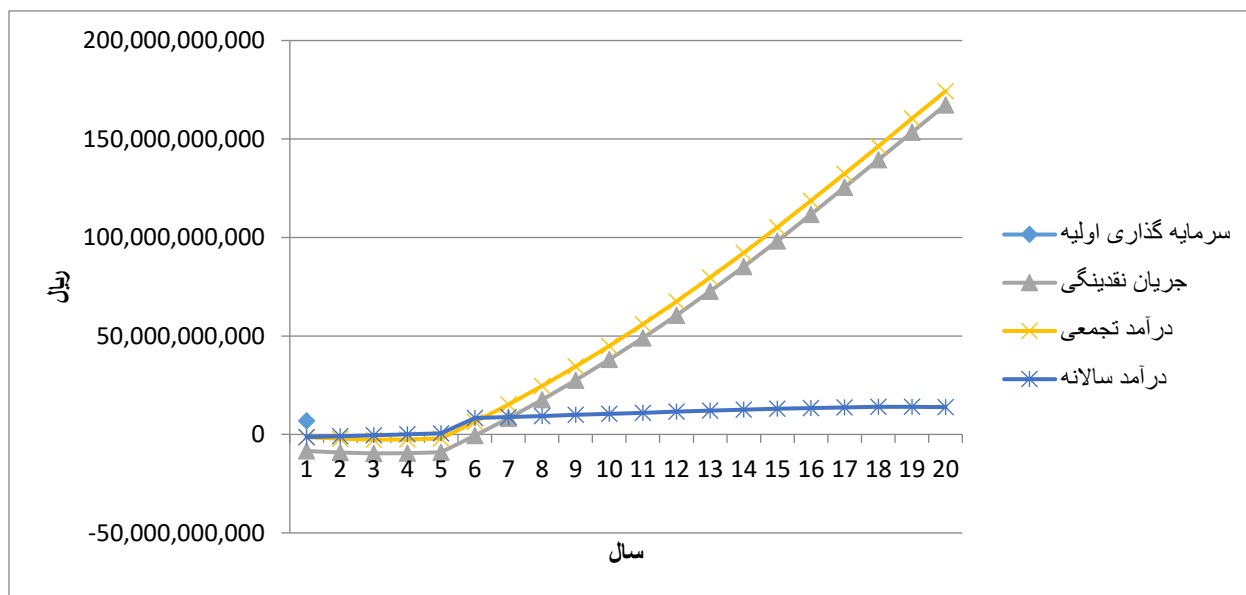
جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 100KW با 70% وام و سود 8%	
1 MW	ظرفیت نیروگاه
34,800,000,000 ریال	هزینه احداث نیروگاه
10,440,000,000 ریال	سرمایه گذاری اولیه
1.1	حداقل ضریب تعدیل
177,938,806,982 ریال	درآمد تجمعی
8%	درصد سود وام
5	مدت زمان بازپرداخت وام
24,360,000,000 ریال	مبلغ وام قابل دریافت
2920	تولید سالانه
18	مدت زمان تنفس (به ماه)
167,498,806,982 ریال	سود تجمعی در پایان سال بیستم
6.96	سنوات شروع سودآوری
22,000 ریال	مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت



شکل (12) محاسبات سناریو سوم

جدول (7) محاسبات سناریو چهارم

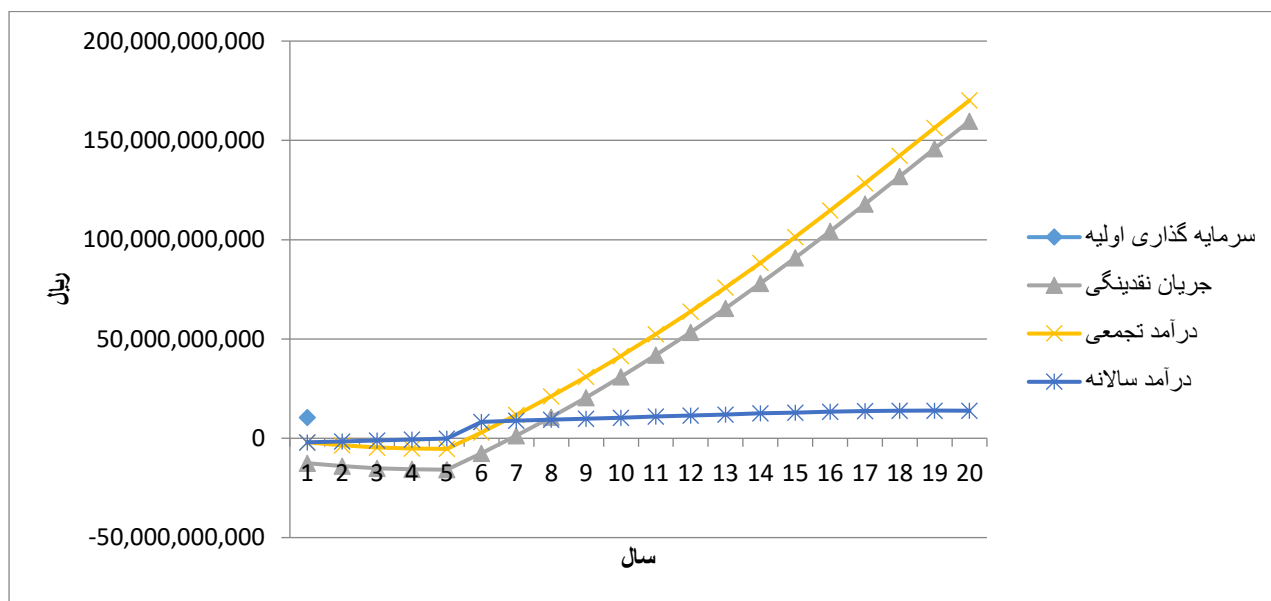
جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 100KW با 80% وام و سود 8%	
1 MW	ظرفیت نیروگاه
34,800,000,000 ریال	هزینه احداث نیروگاه
6,960,000,000 ریال	سرمایه گذاری اولیه
1.1	حداقل ضریب تعدیل
174,250,006,982 ریال	درآمد تجمعی
8%	درصد سود وام
5	مدت زمان بازپرداخت وام
27,840,000,000 ریال	مبلغ وام قابل دریافت
2920	تولید سالانه
18	مدت زمان تنفس (به ماه)
167,290,006,982 ریال	سود تجمعی در پایان سال بیستم
7.07	سنوات شروع سودآوری
22,000 ریال	مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت



شکل (13) محاسبات سناریو چهارم

جدول (8) محاسبات سناریو پنجم

جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 100KW با 70% وام و سود 16%	
1 MW	ظرفیت نیروگاه
34,800,000,000 ریال	هزینه احداث نیروگاه
10,440,000,000 ریال	سرمایه گذاری اولیه
1.1	حداقل ضریب تعدیل
170,143,606,982 ریال	درآمد تجمعی
16%	درصد سود وام
5	مدت زمان بازپرداخت وام
24,360,000,000 ریال	مبلغ وام قابل دریافت
2920	تولید سالانه
18	مدت زمان تنفس (به ماه)
159,703,606,982 ریال	سود تجمعی در پایان سال بیستم
7.85	سنوات شروع سودآوری
22,000 ریال	مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت



شکل (14) محاسبات سناریو پنجم

فرمول ها و روابط ریاضی:

مدلسازی تابش خورشیدی و فرمول های ریاضی کلیدی در نرم افزار PVsol:

در این نرم افزار برای مدلسازی و شبیه سازی عملکرد سیستم های فتوولتائیک از مجموعه فرمول ها و روابط ریاضی پیچیده ای استفاده می کند. در این پژوهش فرمول های کلیدی در دسته های مختلف اشاره شده است که شامل مدل سازی تابش نور خورشید می باشد در این مدل سازی دو روش محاسبه وجود دارد اولین روش مدل اسپنسر - استوارت است که در این مدل جریان صفر در $\cos \theta$ و $\sin \omega$ زاویه خورشید ضرب می شود و با ضریب ثابت 0.004 که در $\sin \omega$ امگا ضرب شده است جمع می شود در خروجی تابش خورشید در این پژوهش را نشان می دهد. در ادامه محاسبات به روش مک آرتور - هی پرداخته شده است، برای محاسبه تابش خورشید در این روش جریان صفر ضرب در $\cos \theta$ زاویه تابش و سپس در ω تقسیم بر عدد π ضرب می شود و از $\sin \omega$ کم می شود و در $\cos \varphi$ ضرب شده و با عدد ثابت 0.5 ضرب در ω تقسیم بر عدد π ضرب در $\sin \varphi$ جمع می شود. در ادامه پژوهش

معادله شاکلی⁹:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V - R_s I}{V_{th} \cdot n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (1)$$

معادله شاکلی یک مدل ریاضی برای توصیف رفتار دیوها است. این معادله جریان عبوری از یک دیود (نیمه هادی) را به عنوان تابعی از ولتاژ و با در نظر گرفتن دمای اعمال شده توصیف می کند. این معادله جهت محاسبه جریان در طراحی و محاسبات مدارات قدرت، تبدیل کننده های DC به DC، سیستم های انرژی خورشیدی کاربرد زیادی دارد.

محاسبه تابش پراکنده:

هر یک از مدل های زیر جهت محاسبه تابش پراکنده در شرایط مختلفی کاربرد دارند:

مدل Kling-Gaisthaler یک فرمول جهت شبیه سازی تابش پراکنده در سطح زمین (یا پنل های خورشیدی) می باشد و این مدل در تحلیل تابش در سیستم های فتوولتائیک در نظر گرفته شده تا در بهینه سازی زاویه قرارگیری پنل ها و حداکثر شدن توان تولیدی نیروگاه کمک نماید و معمولاً در شرایطی که نیاز به دقت بیشتری در توصیف تابش غیرمستقیم وجود دارد، استفاده می شود.

$$DIF^{10} = I_0 (0.231 + 0.319 \cdot e^{-1.623 \cos \theta}) \quad (2)$$

مدل Bird-Hulstrom فرمول دیگری است که جهت شبیه سازی تابش پراکنده در سطح زمین (یا پنل های خورشیدی) می باشد و این مدل در تحلیل تابش در سیستم های فتوولتائیک در نظر گرفته شده تا در بهینه سازی زاویه قرارگیری پنل ها کمک نموده و در حداکثر شدن توان تولیدی نیروگاه استفاده می گردد. این مدل بیشتر بر اساس داده های تجربی و مشاهدات واقعی از تابش نور در شرایط مختلف طراحی شده است و معمولاً برای شبیه سازی تابش نور در شرایط طبیعی و محیط های باز استفاده می شود.

⁹ Shockley Equation

¹⁰ Kling-Gaisthaler مدل

$$DIF^{11} = I_0 (0.16 + 0.71 \cdot e^{-0.7 \cos \theta}) \quad (3)$$

محاسبه تابش مستقیم:

هر یک از مدل‌های زیر جهت محاسبه تابش مستقیم در شرایط مختلفی کاربرد دارند:

مدل Spencer-Stewart یک فرمول جهت شبیه سازی تابش مستقیم در سطح زمین (یا پنل‌های خورشیدی) می باشد و این مدل در تحلیل تابش در سیستم‌های فتوولتائیک در نظر گرفته شده تا در بهینه سازی زاویه قرارگیری پنل‌ها و حداکثر شدن توان تولیدی نیروگاه مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل در مناطق با تابش مستقیم و غیر مستقیم زیاد کاربرد دارد و ضمن محاسبه تابش مستقیم، شامل یک جزء ثابت (0.004) است که به تابش غیرمستقیم کمک می کند.

$$GHI^{12} = I_0 (\cos \theta \cdot \sin \omega + 0.004 \cdot \sin \omega) \quad (4)$$

مدل McArthur-Hay یک فرمول جهت شبیه سازی تابش مستقیم در سطح زمین (یا پنل‌های خورشیدی) می باشد و این مدل در تحلیل تابش در سیستم‌های فتوولتائیک در نظر گرفته شده تا در بهینه سازی زاویه قرارگیری پنل‌ها و حداکثر شدن توان تولیدی نیروگاه مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل پیچیده تر بوده و شامل پارامترهای بیشتری است که تأثیرات زاویه ای بیشتری را در نظر می گیرد و برای شرایط خاص و نیاز به دقت بیشتر مناسب تر است.

$$GHI^{13} = I_0 \left(\cos \theta \left(\frac{\omega}{\pi} - (\sin \omega \cdot \cos \varphi) \right) + 0.5 \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \sin \omega \right) \quad (5)$$

تابش کل:

$$G = GHI + DIF \quad (6)$$

تحلیل اقتصادی و محاسبه نرخ بازگشت سرمایه:

نرخ بازگشت سرمایه ۱۴ یکی از مهم ترین معیارها در ارزیابی عملکرد سرمایه گذاری ها است. این نرخ به سرمایه گذاران کمک می کند تا بفهمند آیا یک سرمایه گذاری به صرفه بوده است یا خیر. در زیر توضیحاتی درباره مفهوم، فرمول و اهمیت آن آورده شده است.

این معیار درصدی است که نشان دهنده سود یا زیان ناشی از یک سرمایه گذاری نسبت به هزینه های آن سرمایه گذاری است و به سرمایه گذاران کمک می کند تا تصمیمات بهتری در مورد تخصیص منابع مالی خود بگیرند و در این پروژه نیز جهت بررسی اقتصادی سناریوهای مختلف و مقایسه آنها در نظر گرفته شده است که در آن C برابر با سود یا درآمد حاصل از سرمایه گذاری و S برابر با هزینه یا سرمایه گذاری اولیه می باشد:

$$ROI = \left(\frac{S - C}{C} \right) * 100 \quad (7)$$

¹¹ Bird-Hulstrom مدل

¹² Spencer-Stewart مدل

¹³ McArthur-Hay مدل

¹⁴ Return on Investment (RIO)

مقایسه و تحلیل حالت های اقتصادی :

در سناریو اول، با توجه به زمان خواب سرمایه و مدت زمان بازگشت سرمایه از یک سو و نرخ سود بانکی بلندمدت معادل 21 درصد، احداث نیروگاه از لحاظ اقتصادی قابل توجیه نیست. اما در سناریوهای دوم تا چهارم، نتایج نشان می دهد که با تغییرات جزئی در مدت زمان سودآوری پروژه، دریافت حداکثر وام منطقی است. با کاهش قابل توجه هزینه های سرمایه گذاری اولیه و عدم افزایش چشمگیر در مدت زمان لازم برای سودآوری، می توان نتیجه گرفت که دریافت حداکثر وام برای احداث نیروگاه با توجه به سود جمعی پروژه و زمان بازگشت سرمایه، اقتصادی و منطقی است. در سناریو پنجم، بررسی ها حاکی از آن است که اخذ وام با سود بسیار بالا، با افزایش تنها 1.1 سال در مدت زمان سودآوری نسبت به حالت سوم، اقتصادی و قابل تأیید است. با این وجود، با توجه به کاهش حاشیه سود در سال های 8 تا 11، احتمال وجود فرصت های سرمایه گذاری پرسودتر نیز وجود دارد.

مقایسه با سرمایه گذاری بانکی بلند مدت با عنایت به نرخ بازگشت سرمایه :

در شرایط اخذ وام حداکثری و با توجه به سود بانکی بلند مدت به میزان 21% احداث نیروگاه توجیه پذیر می باشد.

نتیجه گیری:

طرح پیشنهادی شامل ارزیابی جامع از میزان و نحوه استقرار تجهیزات و همچنین ساختار کلی یک نیروگاه متصل به شبکه با ظرفیت نامی 100 کیلووات است. این طرح با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی منطقه و استفاده بهینه از حداکثر ظرفیت اینورترها، ارائه شده است. طراحی این نیروگاه به گونه ای انجام شده که قادر به عملکرد طبیعی تا دمای منفی 25 درجه سانتیگراد خواهد بود. نیروگاه های خورشیدی در مقایسه با نیروگاه های مبتنی بر سوخت های فسیلی، تاثیر بسیار چشمگیری در کاهش آلاینده های محیط زیست دارند. همچنین، مشکلات گسترده ای در زمینه بازدهی نیروگاه ها و شبکه های انتقال در ایران وجود دارد که منجر به اتلاف انرژی قابل توجهی می شود. تقریباً 30 درصد از انرژی مصرفی به دلیل بازدهی پایین نیروگاه ها و شبکه های انتقال هدر می رود، که باید این میزان را به عنوان تلفات سیستم توزیع و انتقال نیرو در نظر گرفت. هزینه ساخت یک نیروگاه با ظرفیت 100 کیلوواتی طی 20 سال، حدود 464 میلیارد ریال برآورد شده است. تولید کل در این مدت، با احتساب راندمان و مصرف داخلی، حدود 16.4 مگاوات محاسبه شده است. فضای مورد نیاز برای احداث این نیروگاه 1300 متر مربع بوده و زمان نصب و راه اندازی آن حدود 12 ماه خواهد بود. با توجه به میزان تولید و بر اساس آخرین قیمت اعلامی توسط سازمان انرژی های نو ایران (سنا)، قیمت خرید هر کیلووات برق 22000 ریال و با ضریب تعدیل سالانه حداقل 10% در نظر گرفته شده است.

در انتها با توجه به شرایط تورم سالانه در ایران و مطالب مندرج در بخش مقایسه و تحلیل حالت های اقتصادی مشخص گردیده است که اخذ وام جهت سرمایه گذاری اولیه با مبالغ و شرایط بازپرداخت و حتی درصد سودهای مختلف، نسبت به سرمایه گذاری شخصی و حقیقی توجیه پذیرتر می باشد.

منابع:

- سامع، حامد و شفائی، رضا، 1402، بررسی شاخص های سامانه فتوولتائیک ON GRID 5kw در شهرهای اردبیل و زاهدان، دومین کنفرانس بین المللی دانشجویان و مهندسان برق و انرژی های پاک، تهران، <https://civilica.com/doc/1848665>
- احدی، پدram و فخرآبادی، فرید و پورشقاقی، علیرضا و کوثری، فرشاد، 1401، طراحی بهینه و امکانسنجی اقتصادی نیروگاه خورشیدی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با ظرفیت 200 کیلووات در شهر سنندج، <https://civilica.com/doc/1744921>
- فخرموسوی، سید یاسر و انسان دوست، محمد و احمدی، عباس، 1403، بررسی بهره وری عملکرد سیستم انرژی خورشیدی در شهر مشهد با استفاده از نرم افزار Pvsyst، دومین کنفرانس ملی کسب و کار نوین در مهندسی برق و کامپیوتر، خرم آباد، <https://civilica.com/doc/2032451>
- دهقانی، امیر سالار و شری چیان، محمدرضا و عابدی، بهمن و خانبابایی، محمد مهید، 1402، نتایج شبیه سازی عملکرد نیروگاه فتوولتائیک اردستان و سنجش اعتبار آن با داده های تجربی، اولین کنفرانس ملی فناوری ها و دستاوردهای نوین در علوم مهندسی کامپیوتر، مهندسی برق و مهندسی پزشکی، تهران، <https://civilica.com/doc/1728728>
- شری چیان، محمدرضا و عابدی، بهمن و سالاردهقانی، امیر، 1402، شبیه سازی عملکرد یک نیروگاه فتوولتائیک در تهران و سنجش اعتبار آن با داده ها ضمن ارائه و راهکارهای برای افزایش راندمان، اولین کنفرانس ملی فناوری ها و دستاوردهای نوین در علوم مهندسی کامپیوتر، مهندسی برق و مهندسی پزشکی، تهران، <https://civilica.com/doc/1728724>
- فاضلی فارسانی، ایرج و اسدی، بهمن، 1402، بررسی امکان بهره برداری از انرژی خورشیدی در شهر فارس، هشتمین کنفرانس انرژی پاک، بابل، <https://civilica.com/doc/1696899>

Abstract:

Energy is undoubtedly one of the fundamental factors in the progress and sustainable development of human societies. The depletion of non-renewable resources, increasing costs, and environmental consequences of fossil fuel consumption have highlighted the importance of utilizing renewable energy sources. One of these significant energy sources is the sun. In this paper, the 3D design and analysis of a 100 kW photovoltaic power plant using the photovoltaic simulation software PVSOL is investigated. Additionally, economic calculations for the construction of this power plant have been performed in various scenarios to identify the optimal investment conditions through comparison.

Keywords: Economic Analysis, Renewable Resource Investment, Solar Energy, Economic Feasibility, PVSOL Software