

طراحی، شبیه سازی و تحلیل اقتصادی نیروگاه خورشیدی 1 مگاواتی 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

امیرحسین سربخش

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

کوروش آپرناک

مدرس دانشگاه، دکترای مهندسی برق قدرت

فرامرز فقیهی

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

چکیده:

انرژی یکی از عوامل حیاتی در پیشرفت و توسعه پایدار جوامع بشری است. با توجه به غیر تجدیدپذیری و افزایش قیمت سوخت های فسیلی و همچنین اثرات مخرب زیست محیطی آنها، استفاده از انرژی های تجدیدپذیر اهمیت بیشتری یافته است. از جمله منابع مهم انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی است. در این مقاله، یک نیروگاه فتوولتائیک با توان تولید یک مگاوات با استفاده از نرم افزار شبیه سازی فتوولتائیک (PVsol) به صورت سه بعدی طراحی و تحلیل شده است. همچنین، محاسبات اقتصادی احداث این نیروگاه در سناریوهای مختلف با هدف مقایسه و یافتن بهینه ترین حالت سرمایه گذاری انجام شده است. نتایج نشان می دهد که با توجه به کاهش هزینه های تولید و نصب، استفاده از سیستم های فتوولتائیک می تواند به عنوان یک گزینه پایدار و اقتصادی مطرح شود.

واژگان کلیدی:

امکان سنجی، PVsol، نیروگاه فتوولتائیک، بررسی اقتصادی، نرخ بازگشت سرمایه

مقدمه:

صنعت برق به خاطر نقش زیربنایی و وابستگی زیادی که به کلیه عوامل مؤثر در رشد اقتصادی و رفاه اجتماعی دارد صنعتی پویا است و وابستگی ادامه حیات بشری به این نوع انرژی ارزشمند و نقش آن در راه اندازی چرخ های صنعت و سیستم های مورد نیاز جامعه روشن و مبرهن است. امروزه این مهم با به کارگیری روش های تولید مناسب و بالا بردن بازدهی سیستم های برق خورشیدی که از یک سو سبب کاهش هزینه ها و سرمایه گذاری اولیه مورد نیاز شده است و از سوی دیگر سبب کاستن هزینه های تولید ناشی از عدم مصرف سوخت های فسیلی شده، دست یافتنی شده است. این سیستم ها توانستند هر چه بیشتر جایگاه خود را در بین دیگر نیروگاه های تأمین انرژی در دنیا بگشایند و در حال حاضر به صورت گسترده در کشورهای اروپای غربی، آمریکای لاتین و صحرای قاره آفریقا و آسیا و دیگر صحرای جهان مورد استفاده قرار بگیرند. در کشورهای غربی با داشتن ساعات آفتابی کمتر از دو درصد نسبت به کشورهای خاورمیانه مصرف کننده ها، با استفاده از سیستم های برق خورشیدی متصل به شبکه برق در روز برق تولیدی را به شبکه تحویل داده و در هنگام شب از شبکه برق تحویل می گیرند و هنگام پرداخت، بهای برق مصرفی از تفاضل برق تحویلی و مصرف شده از شبکه محاسبه می شود. این در حالی است که ایران با داشتن شرایط جغرافیایی مناسب، مستعد استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی است به ویژه آنکه از نقطه نظر میزان تابش انرژی خورشیدی در شمار بهترین مناطق محسوب می شود. در این میان شهر رفسنجان و به خصوص منطقه ویژه اقتصادی رفسنجان با توجه به فعالیتهای عظیم صنعتی آن ناحیه از یک سوء و از سوی دیگر به دلیل استعداد آن منطقه در استفاده از انرژی خورشیدی با عنایت به تعداد روزهای آفتابی و نیمه آفتابی و به طور میانگین 8 ساعت در طول روز جهت احداث و مدل سازی انتخاب گردید، این به این معنا است که تعداد ساعات آفتابی سال با توجه به مدل سازی انجام شده و خروجی نرم افزار، حدوداً 2920 ساعت جهت تولید برق در نظر گرفته شده است. در حال حاضر باتوجه به تحقیقاتی که در مقاله های دیگر انجام شده بود در این مقاله به بررسی عواملی همچون داده های هواشناسی، میزان تابش خورشیدی در منطقه، راندمان و ضریب عملکرد سیستم، میزان تلفات و مقدار انرژی تولیدی و تزریقی به شبکه سراسری پرداخته شده است (سامع، 1402). در ادامه پژوهش به کشف قیمت تجهیزات اصلی جهت کاهش قیمت تمام شده و بررسی چیدمان آرایه های فتوولتائیک جهت جلوگیری از سایه افکنی پنل ها و اشغال کمترین مساحت ممکن طراحی و بهینه سازی شده است که این امر موجب کاهش هزینه های ثابت و جاری سیستم و افزایش بهره وری نیروگاه از پتانسیل خورشیدی موجود می گردد. در ادامه، منحنی خروجی شامل میزان تولید انرژی سالیانه، تلفات و سایه افکنی استخراج و تحلیل شده و به عنوان یکی از ورودی های امکان سنجی اقتصادی استفاده می شود (احدی، 1401). هدف اصلی این تحقیق ضمن بررسی مزایا و معایب تولید انرژی پاک نیروگاه خورشیدی، به مقایسه میزان و شرایط مختلف وام گرفته شده و تاثیر آن روی نرخ بازگشت سرمایه و سودآوری سیستم در نظر گرفته شده است که در کنار تأثیرات زیست محیطی آن به لحاظ: کاهش مصرف آب که با توجه به گرم شدن زمین که کاهش آن بسیار مورد توجه و با اهمیت می باشد این سیستم را توجیه پذیر می نماید. هدف اصلی پروژه ای که در رابطه با تولید این نوع انرژی در شهر مشهد انجام شده است، بهبود استفاده از انرژی خورشید برای آبیاری مزارع، تأمین آب شرب در شهر مشهد به مساحت 35.1213 مترمربع است. در این مطالعه موردی، اجزا مختلف سیستم پمپ خورشیدی مورد تحلیل و ارزیابی قرار می گیرد. (انسان دوست، 1403). طراحی نیروگاه خورشیدی با ظرفیت یک مگاواتی در این پژوهش از لحاظ فنی و موقعیت جغرافیایی خورشیدی در منطقه ویژه رفسنجان صورت گرفته است. این منطقه از یک سوء به دلیل نزدیک بودن به واحدهای صنعتی در راستای

کاهش فشار موجود بر روی شبکه سراسری تولید و انتقال و از سوی دیگر به دلیل ظرفیت بالای تابش های خورشید و ساعات قابل توجه در دسترس بودن این انرژی انتخاب گردیده است. در پژوهش 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). نرم افزار مورد استفاده در پژوهش PVsol می باشد که پارامترهای فنی جامعی از جمله ضریب کاهنده¹ 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. در پژوهش مشابه، هدف فقط شبیه سازی و احداث نیروگاه خورشیدی منفصل از شبکه به منظوره مصارف زراعی انجام شده است (دهقانی، 1402). در ادامه مطالعات امکان بهره برداری از انرژی خورشیدی در شهر فارس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می دهد که لزوماً بالابردن قدرت پنل سبب افزایش تولید انرژی خورشیدی نمی گردد، همچنین در این پژوهش پنل 285 و 60 واتی بهترین و پنل 136 واتی بدترین از نظر تولید انرژی محاسبه شده است و از نظر سرمایه گذاری پنل 60 واتی به صرفه تر است (اسدی، 1402). در پایان نیز مطابق هدف اصلی مقاله حاضر، به بررسی سناریوهای مختلف سرمایه گذاری، بررسی توجیه پذیری اقتصادی و مقایسه آن ها، در راستای یافتن روش بهینه سرمایه گذاری مطابق با شرایط اقتصادی ایران پرداخته می شود.

سناریوهای سرمایه گذاری 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 8% به میزان 50% از سرمایه مورد نیاز
- ۳- سرمایه گذاری با اخذ وام بانکی 8% به میزان 70% از سرمایه مورد نیاز
- ۴- سرمایه گذاری با اخذ وام بانکی 8% به میزان 80% از سرمایه مورد نیاز
- ۵- سرمایه گذاری با اخذ وام بانکی 16% به میزان 70% از سرمایه مورد نیاز

روش تحقیق:

باتوجه به توضیحات داده شده طراحی و شبیه سازی نیروگاه خورشیدی به ظرفیت یک مگاوات با استفاده از نرم افزار PVsol صورت گرفته شده است که راجع به آن توضیح داده شد که جامع ترین نرم افزار در خصوص طراحی و شبیه سازی نیروگاه فتوولتائیک است و خروجی و نتایج آن بسیار معتبر و دقیق است. شبیه سازی در این نرم افزار جامع به صورت سه بعدی انجام می شود و از این دیدگاه نسبت به بقیه نرم افزارها برتری دارد همچنین تعیین موقعیت جغرافیایی در بستر این نرم افزار امکان پذیر است که باتوجه به موقعیت مکانی نیروگاه و شرایط آب و هوایی منطقه مورد نظر می توان محل دقیق را انتخاب کرد. این نرم افزار می تواند مساحت مورد نیاز، تعداد پنل، تعداد اینورتر، توان تولیدی در سال، نمودارهای مربوط به تولید توان، توان تزریقی به شبکه، توان گرفته شده از شبکه، سرعت باد، راندمان سیستم، توان تولیدی آرایه ها و ... را محاسبه کند همچنین قادر به طراحی سیستم مورد نظر به صورت سه بعدی نیز می باشد و می توان نحوه چیدن آرایه ها (به صورت عمودی و یا افقی) را در آن مشخص کرد. با استفاده از حالت سه بعدی

¹ Reduction factor

این نرم افزار می توان محل مورد نظر، موانع موجود در آن محیط، تاثیر و سایه اندازی موانع اطراف را بررسی و همچنین سیستم خورشیدی را برای حالت های مختلفی طراحی کرد. هنگام طراحی سیستم خورشیدی با استفاده از PVsol امکان استفاده از پیشنهاد های مختلفی مانند اضافه کردن داده های تعریف شده توسط کاربر، تعیین آب و هوا و... وجود دارد. از دیگر نرم افزار های مشابه آن می توان به PVsyst اشاره نمود. در ادامه با توجه به نتایج دریافتی از مدل سازی و تحلیل اقتصادی اولیه نرم افزار، محاسبات بازگشت سرمایه پس از کسر هزینه های داخلی نیروگاه و با توجه به نرخ خرید تضمینی و تعدیل حداقلی سالانه محاسبه شده است.

یافته ها:

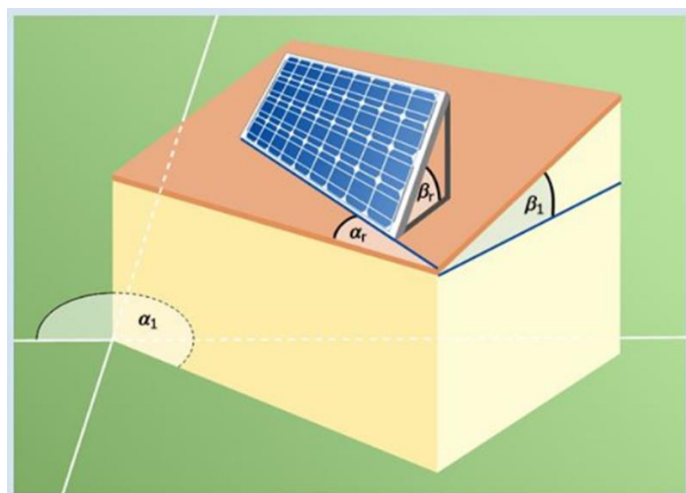
مراحل شبیه سازی به ترتیب توضیح داده شده و ابتدا بخش جهت گیری نسبی^۲ که در شکل (1) آمده، ارائه شده است. مرحله بعدی شبیه سازی بخش فاصله سازه های نگهدارنده پنل ها که طبق شکل (2) بیان شده است؛ مرحله بعدی نوع قرارگیری پنل ها از زاویه بالایی است که در رنگ های مختلف مشخص شده و هر رنگ نشان دهنده اتصال آن دسته از پنل ها به یک اینورتر خاص می باشد (شکل (3))، تصویر بعدی نمایی از سمت غرب به پنل ها است که از این نقطه نظر ردیف ها را در شکل (4) به نمایش گذاشته است. دیگر قابلیت PVsol که پیش از این شرح داده شد، سه بعدی بودن و در نظر گرفتن فضاهای مورد نیاز جهت گردش هوا، جلوگیری از سایه اندازی و فضای دسترسی می باشد که با شبیه سازی آن ها قابلیت استخراج فضای مورد نیاز واقعی مطابق شکل (5) ارائه می گردد. قسمت بعدی خروجی های نموداری است که میزان توان تولیدی نیروگاه طراحی شده را در ماه های مختلف سال به نمایش می گذارد؛ همان طور که مشخص است بیشترین توان تولیدی به ماه های جولای و ژوئن اختصاص دارد و نمودار (1) نشان دهنده توان تولیدی است. خروجی بعدی که در نمودار (2) نشان داده شده است، نسبت PR^۳ اینورتر در ماه های سال است و بیشترین حد این نسبت در ماه دسامبر و ژانویه بوده است که بین 80 PR تا 100 PR است که دلیل این رخداد کاهش بازدهی اینورترها حین فصول گرم سال و نیز در مقابل آن افزایش بازدهی در فصول سرد سال است. تجهیزات استفاده شده در طراحی این واحد نیروگاهی طبق جدول (1) عبارت است از: پنل های خورشیدی از برند Ja Solar بوده و مشخصات آن در جدول (2) ارائه شده است. دیگر تجهیز اینورتر بوده که انتخاب آن با توجه به میزان توان خروجی نیروگاه انجام شده است که از برند Solis بوده و مشخصات آن در جدول شماره (3) ذکر شده است. هدف اصلی این پژوهش محاسبات اقتصادی و مقایسه حالت های مختلف بوده و حالت های مختلف در جدول و نمودارهای مربوطه لحاظ شده است. در حالت اول بدون در نظر گرفتن وام بانکی بوده که جدول (4) و نمودار (3) کاملاً با هزینه خصوصی ساخته شده است. حالت دوم با در نظر گرفتن وام صنعتی بوده و در جدول (5) و نمودار (4) ارائه شده است. حالت سوم با در نظر گرفتن وام صنعتی و درصد هزینه احداث 70% در نظر گرفته شده و نتایج حاصله در جدول (6) و نمودار (5) آمده است. حالت چهارم حالتی است که بازه تنفس 18 ماهه و هزینه احداث نیروگاه 80% است و طبق جدول (7) و نمودار (6) قابل رؤیت می باشد. حالت آخر حالت پنجم بوده که با سود 2 برابر با بازپرداخت 16% و زمان تنفس 18 ماهه و هزینه احداث 70% در نظر گرفته شده که جدول (8) و نمودار (7) نشان دهنده این حالت است.

جهت گیری نسبی پنل ها:

² Relative Orientation

³ Performance Ratio

در این بخش از شبیه سازی مقاله جهت گیری پنل ها و موقعیت آن با توجه به زاویه 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. با توضیحات داده شده در شکل (۱) قابل ذکر است همان طور که در توضیحات گفته شد، پنل نسبت به مبدأ خود چرخیده و شیب آن نسبت به اندازه β_1 تغییر کرده است که طبق ساعت 15:00 و فاصله قرارگیری بر روی سقف با توجه به شکل اندازه α_2 است و همچنین چرخش قرارگیری پنل بر روی سقف نیز به اندازه β_1 است.

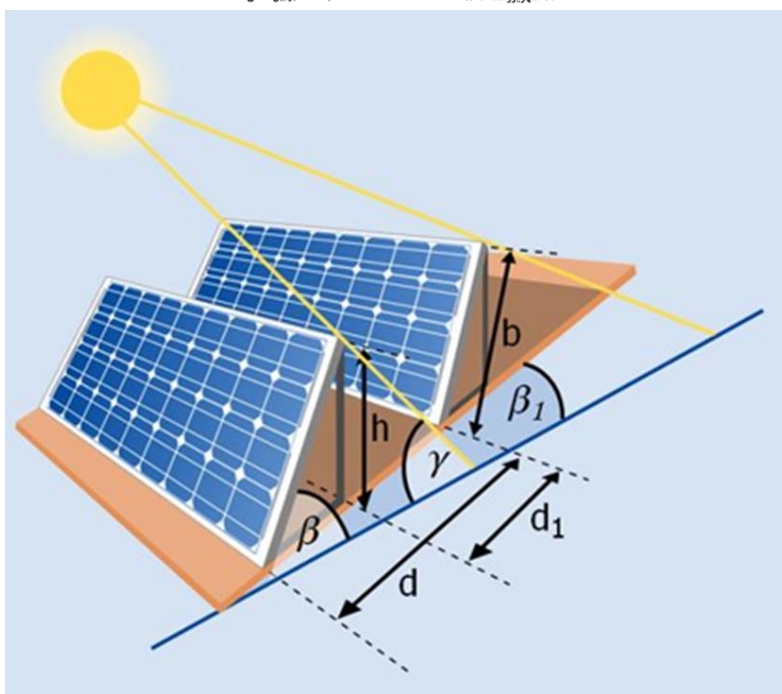


شکل (1) جهت گیری نسبی پنل ها

فاصله سازه های نگهدارنده پنل ها:

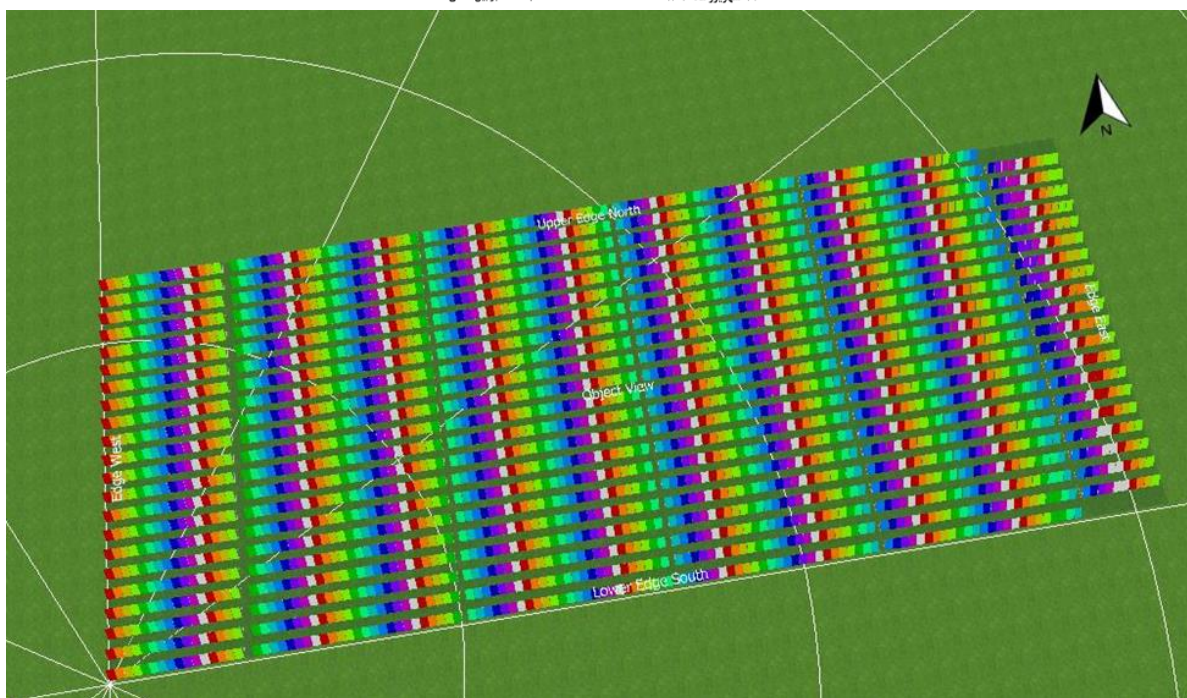
در این بخش از شبیه سازی، شکل (۲) قرارگیری پنل ها را نسبت به یکدیگر و همچنین ارتفاع قرارگیری سطح زیرین در جهت تابش نور خورشید در نظر گرفته شده که در بخش ورودی، فاصله b (یعنی عرض پنل) دارای مقدار 2.094 متر و به همین ترتیب اندازه h (ارتفاع تکیه گاه پنل از سطح زیرین) دارای مقدار 1.048 متر و β زاویه شیب پنل نسبت به موقعیت نصب 30 درجه و جهت چرخش پنل ها هر کدام 180 درجه، همچنین زاویه ارتفاع خورشید که در شکل با اندیس γ نشان داده شده 36.25 درجه می باشد. بخش بعدی نتایج اعمال ورودی ها را نشان می دهد. در شکل (۲) به ترتیب عمق ردیف $d - d_1$ به معنای فاصله بین ابتدای پنل جلویی تا انتهای پایه پنل است که مقدار آن 1.813 متر می باشد. پارامتر بعدی یعنی d_1 فضای خالی بین ردیف تجهیزات را با مقدار 1.429 متر و آخرین پارامتر یعنی d فاصله بین پنل ها را با مقدار 3.242 متر توصیف می کند.

⁴ Input

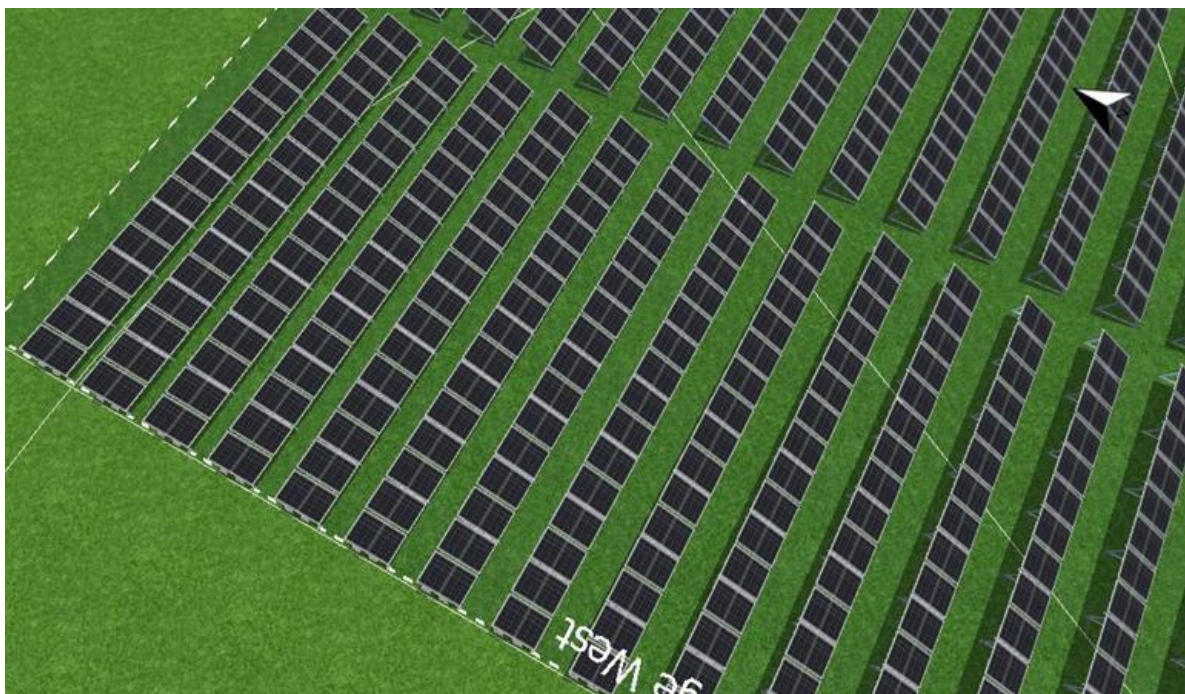


شکل (2) فاصله سازه های نگهدارنده پنل ها

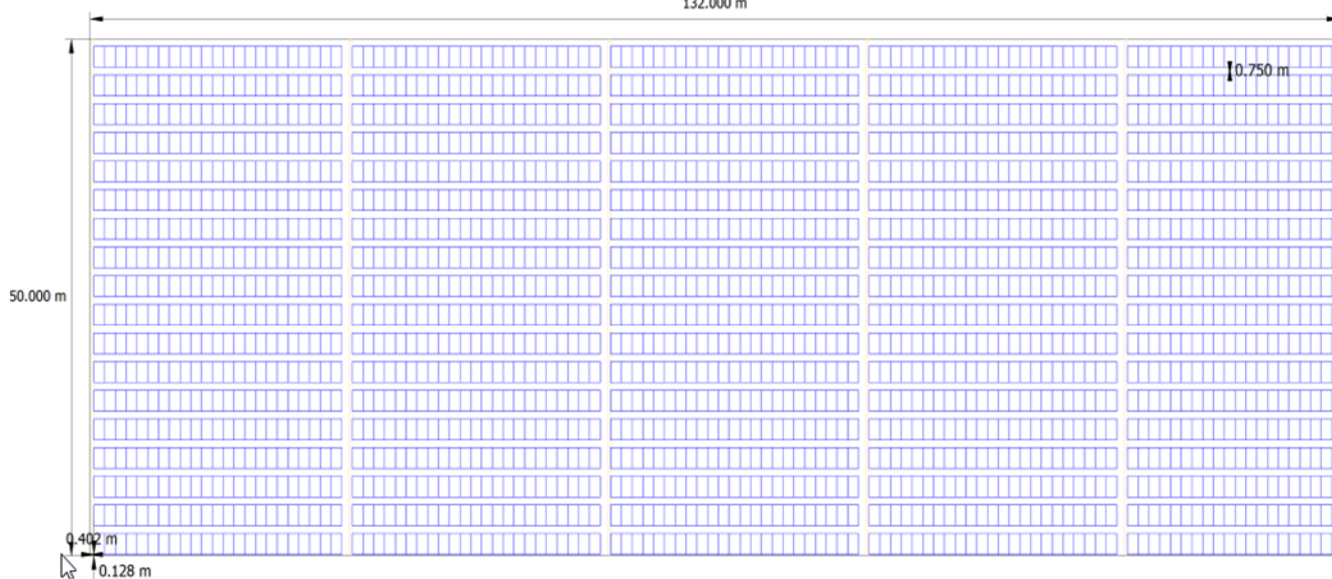
همان طور که در شکل شماره (3) مشخص است نحوه برقراری اتصال پنل ها به اینورترها با رنگ های مختلف قابل مشاهده است. در ادامه نیز شکل شماره (4) نمایی از نوع قرارگیری و ردیف پنل ها را نشان می دهد، همچنین در شکل (5) ابعاد بیرونی زمین مورد نیاز جهت نصب آرایه ها با لحاظ مسیرهای دسترسی و غیره نمایش داده شده است.



شکل (3) تمایز اتصال پنل‌ها و اینورترها توسط رنگ‌ها

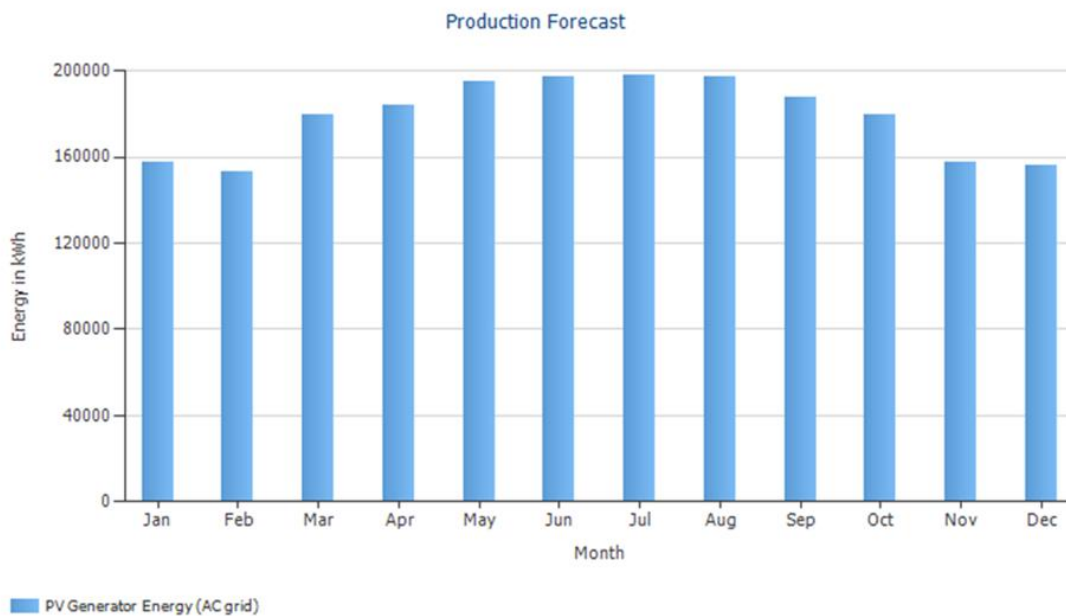


شکل (4) نمای فوقانی آرایه‌ها به صورت ردیفی منظم



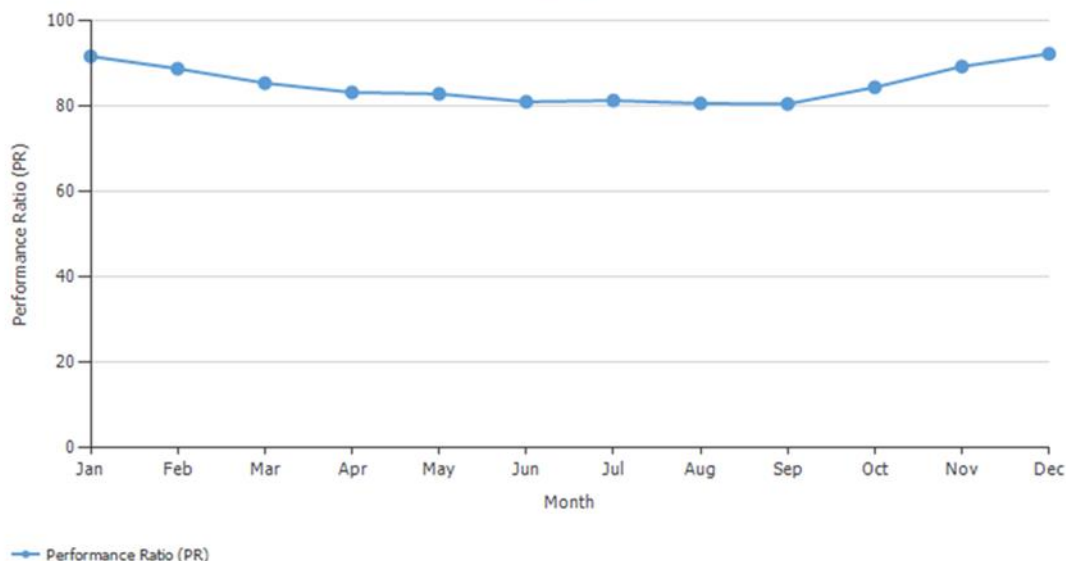
شکل (5) نمای فوقانی حاوی اطلاعات ابعادی چیدمان سلول های فوتوولتائیک

نمودارهای زیر نشان دهنده وضعیت راندمان و تولید نیروگاه در فصول مختلف سال می باشد.



نمودار (1) میزان توان تولیدی پنل ها در ماه های مختلف سال بر حسب کیلووات ساعت

Performance Ratio (PR) per Inverter



نمودار (2) نمودار عملکرد اینورتر در تمامی ماه های سال

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.

جدول (1) لیست قطعات اصلی و تجهیزات استفاده شده در طراحی نیروگاه یک مگاوات

#	Type	Manufacturer	Name	Quantity	unit
1	PV Module	JA Solar Holdings CO, Ltd	JAM66530-500/MR	1998	piece
2	Inverter	Ginlong (Solis)	Solis-250K-EHV-5G	3	piece
3	Cable	-	String Cable 2.5 mm* Copper	210	m
4	Cable	-	AC cables 3-phase 70 mm: Copper	75	m
5	components	-	Transformer 0.4/20 KV	1	piece
6	components	-	Feed in Meter	1	piece
7	components	-	Fuse CATOUT 1	1	piece

در ادامه به معرفی تجهیزات اصلی و ذکر مشخصه های اصلی آن ها پرداخته شده است:

پنل های خورشیدی:

نور را به عنوان منبع انرژی برای تولید برق جذب می کند. و تابش خورشید را به انرژی خورشیدی تبدیل می کند. ماژول های فتوولتائیک آرایه فتوولتائیک یک سیستم خورشیدی را تشکیل می دهد که برق خورشیدی را در کاربردهای تجاری و مسکونی تولید و عرضه می کند، پنل های مورد نظر این مقاله Ja Solar مدل JAM66S30 480-505/MR/1500V و اطلاعات آن به شرح زیر است:

جدول (۲) مشخصات پنل های نیروگاه

مشخصات	
سلول	Mono
وزن	26.3 kg
ابعاد	$2093 \pm 2\text{mm} \times 1134 \pm 2\text{mm} \times 30 \pm 1\text{mm}$
اندازه مقطع کابل	4mm^2 (IEC) , 12 AWG (UL)
تعداد سلول ها	132(6 × 22)
جعبه اتصال	IP68, 3 diodes
رابط	Stäubli MC4-EVO2A/MC4-EVo2 QC Solar QC 4.10-351
طول کابل (با احتساب رابط)	Portrait: 200mm (+)/300mm (-); Landscape: 1200mm (+)/1200mm (-)
کشور سازنده	China/Vietnam

اینورتر:

یک اینورتر در سیستمی استفاده می شود که در آن خروجی برق متناوب مورد نیاز است و اینورتر باید ولتاژ ورودی یکسانی با باتری داشته باشد و ضمناً اندازه اینورتر آن باید 20 تا 25 درصد بزرگتر از کل توان بار متصل به آن باشد. اینورتر انتخابی Solis و مدل مورد نظر طراحی Solis-(215-255)K-EHV-5G است، که دیتاشیت آن در شکل زیر مشخص می باشد:

جدول (۳) مشخصات اینورترهای نیروگاه

مدل	Solis-215K-EHV-5G-PLUS
حداکثر توان ورودی	322.5kW
حداکثر ولتاژ ورودی	1500V
ولتاژ نامی	1080V
ولتاژ شروع	500V
دامنه ولتاژ	480-1500 V
حداکثر جریان ورودی	30*9 A

فضای مورد نیاز احداث:

در این بخش به گسترش نیروگاه یک مگاواتی پرداخته می شود که زمینی به مساحت 6623 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 13000 متر مربع فضا احتیاج دارد که البته با توجه به ماهیت مقایسه ای شرایط سرمایه گذاری در این پژوهش، هزینه ثابت زمین که در کلیه حالت های مورد بررسی مشترک می باشد، از محاسبات حذف گردیده است.

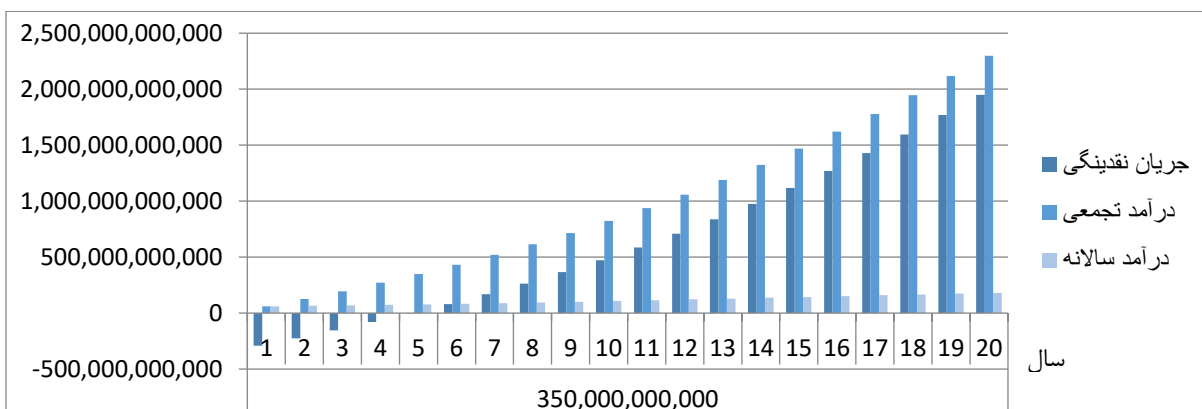
نتایج محاسبات اقتصادی:

در راستای امکان سنجی اقتصادی و کشف حالت های بهینه سرمایه گذاری، با عنایت به شروط، قیود سرمایه گذاری و احداث نیروگاه در 5 سناریو بررسی گردید که نتایج حاصله، جداول و نمودارهای مربوط قابل مشاهده است:

۱. احداث نیروگاه 1MW با سرمایه گذاری کاملاً خصوصی (بدون اخذ وام بانکی)، که نتایج حاصله از تحلیل اقتصادی آن در جدول (4) و نمودار شماره (3) اشاره شده است:

جدول (4) محاسبات حالت اول

جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 1MW بدون اخذ وام	
ظرفیت نیروگاه	1MW
هزینه احداث نیروگاه	350.000.000.000 ریال
سرمایه گذاری اولیه	350.000.000.000 ریال
حداقل ضریب تعدیل	1.1
درآمد تجمعی	2.298.447.269.292 ریال
تولید سالانه	2920
سود تجمعی د پایان سال بیستم	1.948.447.269.292 ریال
سنوات شروع سودآوری	6.03
مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت	22.000 ریال

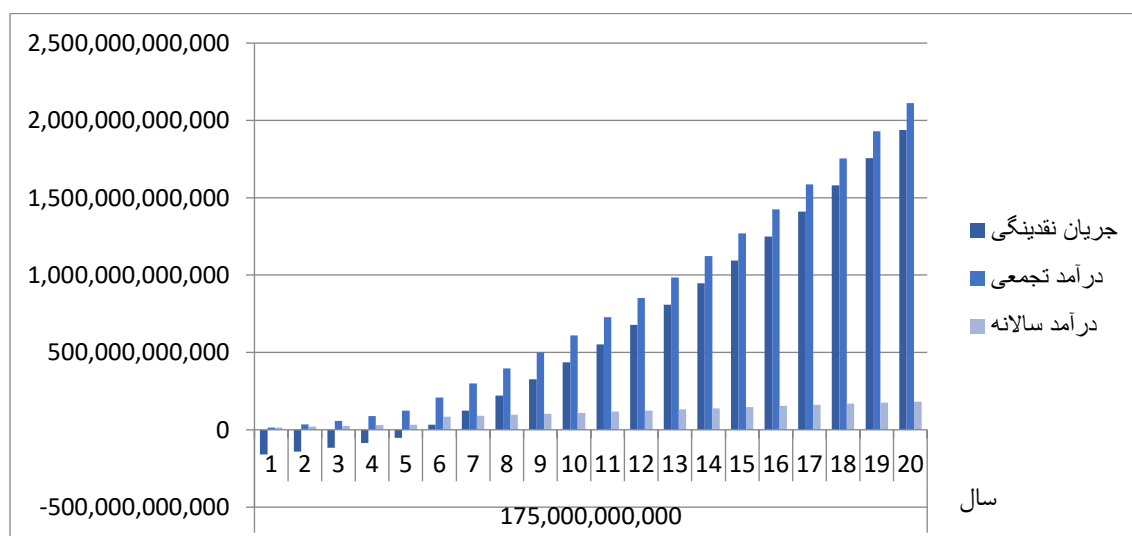


نمودار (3) جریان نقدینگی، درآمد تجمعی، درآمد سالانه در حالت اول

۲. احداث نیروگاه 1MW با اخذ وام صنعتی با بازپرداخت 8%، 5 ساله و با زمان تنفس 18 ماهه به میزان 50% از هزینه احداث نیروگاه که نتایج حاصله از تحلیل اقتصادی آن در جدول (5) و نمودار شماره (4) اشاره شده است:

جدول (5) محاسبات حالت دوم

جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 1MW با 50% وام و سود 8%	
1MW	ظرفیت نیروگاه
350.000.000.000 ریال	هزینه احداث نیروگاه
۱۷۵.000.000.000 ریال	سرمایه گذاری اولیه
1.1	حداقل ضریب تعدیل
2.112.947.269.292 ریال	درآمد تجمعی
8%	درصد سود وام
5	مدت زمان بازپرداخت وام
175.000.000.000 ریال	مبلغ وام قابل پرداخت
2920	تولید سالانه
18	مدت زمان تنفس (به ماه)
1.937.947.269.292 ریال	سود تجمعی د پایان سال بیستم
6.61	سنوات شروع سودآوری
22.000 ریال	مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت

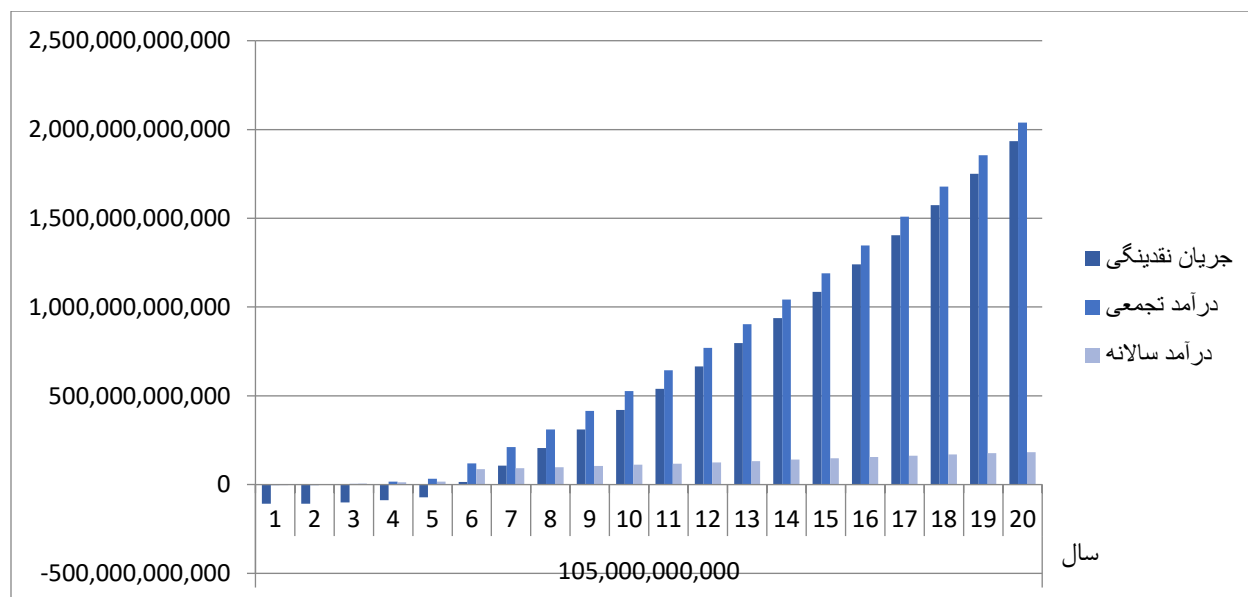


نمودار (4) جریان نقدینگی، درآمد تجمعی، درآمد سالانه در حالت دوم

۳. احداث نیروگاه 1Mw با اخذ وام صنعتی با باز پرداخت 8%, 5 ساله و بازمان تنفس 18 ماهه به میزان 70% از هزینه احداث نیروگاه که در جدول (6) و نمودار (5) قابل رؤیت است:

جدول (6) محاسبات حالت سوم

جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 1MW با 70% وام و سود 8%	
ظرفیت نیروگاه	1MW
هزینه احداث نیروگاه	350.000.000.000 ریال
سرمایه گذاری اولیه	105.000.000.000 ریال
حداقل ضریب تعدیل	1.1
درآمد تجمعی	2.038.747.269.292 ریال
درصد سود وام	8%
مدت زمان بازپرداخت وام	5
مبلغ وام قابل پرداخت	245.000.000.000 ریال
تولید سالانه	2920
مدت زمان تنفس (به ماه)	18
سود تجمعی د پایان سال بیستم	1.933.747.269.292 ریال
سنوات شروع سودآوری	6.83
مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت	22.000 ریال

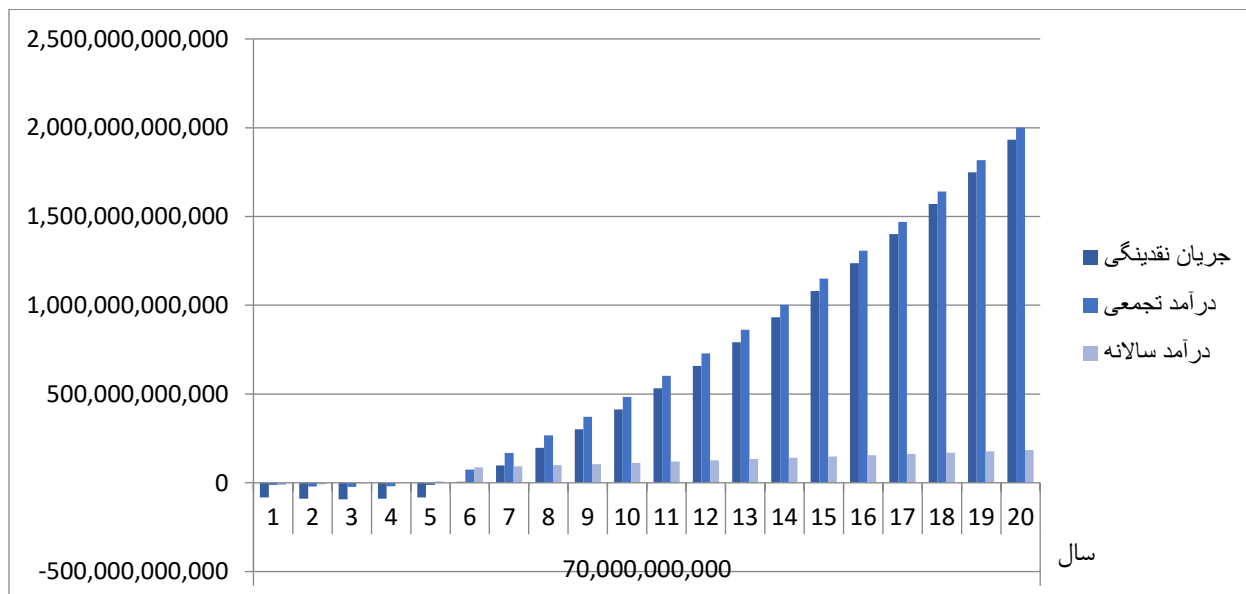


نمودار (5) جریان نقدینگی، درآمد تجمعی و درآمد سالانه حالت سوم

۴. احداث نیروگاه 1MW با اخذ وام صنعتی با بازپرداخت 8%، 5 ساله و با زمان تنفس 18 ماهه به میزان 80% از هزینه احداث نیروگاه که در جدول (7) و نمودار (6) قابل مشاهده می باشد:

جدول (7) محاسبات حالت چهارم

جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 1MW با 80% وام و سود 8%	
1MW	ظرفیت نیروگاه
350.000.000.000 ریال	هزینه احداث نیروگاه
70.000.000.000 ریال	سرمایه گذاری اولیه
1.1	حداقل ضریب تعدیل
2.001.647.269.292 ریال	درآمد تجمعی
8%	درصد سود وام
5	مدت زمان بازپرداخت وام
280.000.000.000 ریال	مبلغ وام قابل پرداخت
2920	تولید سالانه
18	مدت زمان تنفس (به ماه)
1.931.647.269.292 ریال	سود تجمعی د پایان سال بیستم
6.94	سنوات شروع سودآوری
22.000 ریال	مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت

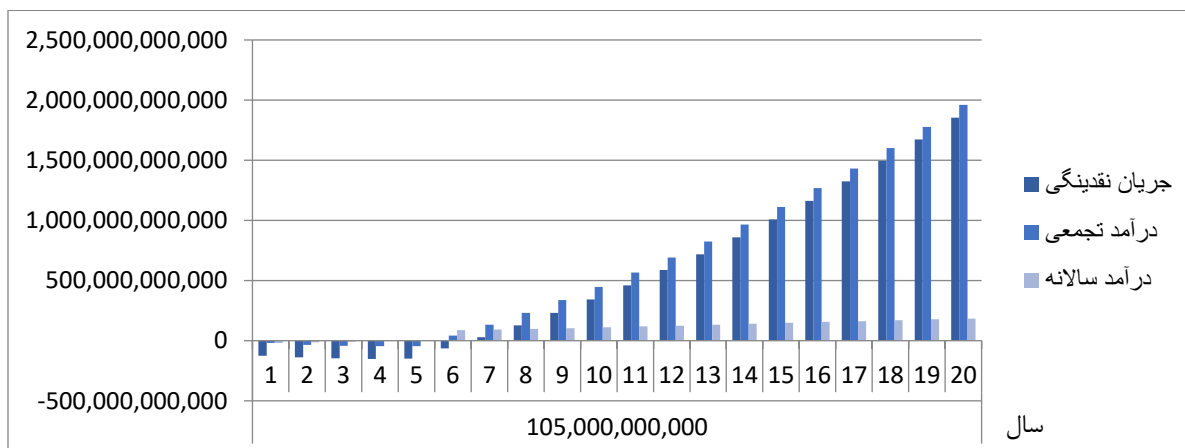


نمودار (6) جریان نقدینگی، درآمد تجمعی و درآمد سالانه حالت چهارم

۵. احداث نیروگاه 1MW با اخذ وام صنعتی با بازپرداخت 16٪، 5 ساله با سود 2 برابر نسبت به حالت 3 و با زمان تنفس 18 ماهه به میزان 70٪ از هزینه احداث مطابق جدول (8) و نمودار (7) بررسی شده:

جدول (8) محاسبات حالت پنجم

جدول خلاصه محاسبات مالی نیروگاه 1MW با ۷۰٪ وام و سود ۱۶٪	
1MW	ظرفیت نیروگاه
350.000.000.000 ریال	هزینه احداث نیروگاه
105.000.000.000 ریال	سرمایه گذاری اولیه
1.1	حداقل ضریب تعدیل
1.960.347.269.292 ریال	درآمد تجمعی
16%	درصد سود وام
5	مدت زمان بازپرداخت وام
245.000.000.000 ریال	مبلغ وام قابل پرداخت
2920	تولید سالانه
18	مدت زمان تنفس (به ماه)
1.855.347.269.292 ریال	سود تجمعی د پایان سال بیستم
7.69	سنوات شروع سودآوری
22.000 ریال	مبلغ خرید تضمینی به ازای هر کیلووات ساعت



نمودار (7) جریان نقدینگی، درآمد تجمعی و درآمد سالانه حالت پنجم

فرمول ها و روابط ریاضی:

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

در این نرم افزار برای مدل سازی 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

$\sin \omega$ و $\cos \theta$ زاویه خورشید ضرب می شود و با ضریب ثابت 0.004 که در $\sin \omega$ 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 I_0 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 ۰.۵ ضرب در ω تقسیم بر عدد π ضرب در $\sin \varphi$ جمع می شود.

معادله شاکلی^۵:

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

معادله شاکلی در حقیقت 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، مبدل 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 در شرایطی که نیاز به دقت بیشتری در توصیف تابش غیرمستقیم وجود دارد، استفاده می شود.

$$DIF^6 = I_0 (0.231 + 0.319 \cdot e^{-1.623 \cos \theta}) \quad (2)$$

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.

$$DIF^7 = I_0 (0.16 + 0.71 \cdot e^{-0.7 \cos \theta}) \quad (3)$$

محاسبه تابش مستقیم:

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

مدل Spencer-Stewart یک فرمول جهت شبیه سازی تابش مستقیم 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

⁵ Shockley Equation

⁶ Kling-Gaisthaler مدل

⁷ Bird-Hulstrom مدل

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 (۰.۰۰۴) است که به تابش غیرمستقیم کمک می کند.

$$GHI^8 = I_0 (\cos \theta \cdot \sin \omega + 0.004 \cdot \sin \omega) \quad (4)$$

مدل McArthur-Hay یک فرمول جهت شبیه سازی تابش مستقیم در سطح زمین (یا 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 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.

$$GHI^9 = I_0 \left(\cos \theta \left(\frac{\omega}{\pi} - (\sin \omega \cdot \cos \varphi) \right) + 0.5 \cdot \frac{\omega}{\pi} \cdot \sin \omega \right) \quad (5)$$

تابش کل:

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

تحلیل اقتصادی و محاسبه نرخ بازگشت سرمایه:

نرخ بازگشت سرمایه ۱۰ یکی از مهم ترین معیارها در ارزیابی عملکرد سرمایه گذاری ها است. این نرخ به سرمایه گذاران کمک می کند تا یک سرمایه گذاری به صرفه را تشخیص دهند. 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 آن ها 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:

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

مقایسه و تحلیل حالت های اقتصادی:

در حالت یک با توجه به زمان خواب سرمایه و مدت زمان بازگشت سرمایه از یک سوء و از سوی دیگر با عنایت به سود بانکی بلند مدت به میزان 21٪، احداث نیروگاه توجیه پذیر نمی باشد. این مورد با مقایسه سود تجمعی حاصله، با مجموع سود سرمایه گذاری بلند مدت بانکی و اختلاف معنادار این دو مشخص می گردد.

⁸ مدل Spencer-Stewart

⁹ مدل McArthur-Hay

¹⁰ Return on Investment (RIO)

حالت های دوم تا چهارم با توجه به نتایج به دست آمده و تغییرات کوچک در مدت زمان سودآوری پروژه می توان نتیجه گرفت که اخذ وام حداکثری کاملاً به صرفه می باشد، از طرفی با توجه به کاهش چشمگیر هزینه سرمایه گذاری اولیه (مابه التفاوت هزینه احداث نیروگاه از میزان وام اخذ شده) و با عنایت به عدم افزایش معنادار در مدت زمان مورد نیاز برای سودآوری، نسبت به حالت اول مجدداً به این نتیجه می رسیم که اخذ وام حداکثری در احداث نیروگاه با توجه به سود تجمعی پروژه و نیز مدت زمان بازگشت سرمایه در مقایسه با سرمایه گذاری بلند مدت بانکی کاملاً توجیه پذیر می باشد.

در حالت پنجم به بررسی اخذ وام با سود بسیار بالا پرداخته شده است که در مقایسه با حالت 3 (یعنی اخذ وام با شرایط مناسب و فلذا سود کمتر) تنها 1.1 سال، مدت زمان سودآوری را افزایش خواهد داد بنابراین به این نتیجه می رسیم که اخذ هرگونه وام متداول صنعتی در کشور با توجه به نرخ تورم و نرخ افزایش قیمت ارز و با عنایت به سود تجمعی محاسبه شده توجیه پذیر بوده و مورد تأیید می باشد. ولی با توجه به حاشیه های شدن سود، در سال های 8 تا 11، می توان به این نتیجه رسید که احتمال یافتن سرمایه گذاری های پرسودتر نیز در این حالت وجود خواهند داشت.

نتیجه گیری:

طرح پیشنهادی در بر گیرنده کلیات مربوط به برآورد میزان و چگونگی قرارگیری تجهیزات و نیز ساختار کلی یک نیروگاه متصل به شبکه با ظرفیت نامی 1 MW است. این طرح با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و نیز استفاده بهینه از حداکثر ظرفیت اینورترها پیشنهاد شده است. همان گونه که گفته شد متأسفانه تولید نیرو در ایران دارای مشکلات گسترده ای در خصوص بازدهی نیروگاه ها و شبکه های انتقال است. می توان گفت حدود 30 درصد انرژی مصرفی صرف بازدهی پایین نیروگاه ها و شبکه های انتقال می شود که این 30 درصد بررسی تأثیر تأسیس یک نیروگاه خورشیدی با این ظرفیت را توجیه پذیر می نماید. هزینه تمام شده برای یک نیروگاه با ظرفیت 1 مگاوات طی 20 سال 464 میلیارد ریال محاسبه گردیده است. همچنین تولید کل در طی 20 سال و با کسر راندمان و مصرف داخلی، حدوداً 16.4 مگاوات محاسبه گردید. فضای مورد نیاز برای احداث یک نیروگاه 1 مگاواتی حدوداً برابر با 1.3 هکتار است. زمان نصب و راه اندازی حدود 12 ماه می باشد. با عنایت به میزان تولید و مطابق با آخرین قیمت اعلامی توسط سازمان انرژی های نو ایران (سنا)، قیمت خرید هر کیلووات برق 22000 ریال به ازای هر کیلووات 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 سمنان، <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 a vital factor in the progress and sustainable development of human societies. Given the non-renewability and increasing price of fossil fuels, as well as their detrimental environmental impacts, the utilization of renewable energy sources has gained significant importance. Solar energy is one of the most important renewable energy sources. In this paper, a 1 MW photovoltaic power plant is designed and analyzed in 3D using the photovoltaic simulation software PVsol. Additionally, economic calculations for the construction of this power plant have been performed in various scenarios with the aim of comparison and identifying the optimal investment conditions. The results indicate that, considering the reduction in production and installation costs, the use of photovoltaic systems can be presented as a sustainable and economical option.

Keywords: Feasibility Study, PVsol, Photovoltaic Power Plant, Economic Analysis, Return on Investment