

Operation studies of the power system containing solar power plants equipped with linear parabolic collectors

Mohammad Bagher Rezaeianzadeh¹, *M.Sc.*, Mohammad Hossein Fatehi², *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical & Computer, Kazeroun Branch, Islamic Azad University, Kazeroun, Iran
rezaeianzadehbagher@gmail.com

² Department of Electrical & Computer, Kazeroun Branch, Islamic Azad University, Kazeroun, Iran
mh.fatehi@iau.ac.ir

Received: 22 July 2023

Revised: 28 October 2023

Accepted: 18 November 2023

Abstract:

Due to the issues and problems that fossil fuel-based power plants have, the use of renewable energy sources such as wind, sun and ocean in the power system to generate electricity is increasing. Environmental pollution, worry about running out of fossil fuel resources and their price fluctuation are among the problems that have caused different countries of the world to think about replacing them with renewable energy sources. One of the types of power plants that uses the sun's energy to produce electricity is parabolic collector solar thermal power plants. In these power plants, the sunlight is focused on a focal point with the help of parabolic mirrors. In these power plants, the focal point is in the form of a line in which tubes containing fluid are placed. The heat from concentrated sunlight causes the temperature of the fluid inside the tube to increase. With the help of a heat exchanger, the heat of the fluid inside the pipe is transferred to the water and causes its evaporation. Water vapor also causes the rotation of the turbine and, as a result, produces electricity. Considering that the production capacity of these power plants is high, these power plants can be connected to the transmission network. On the other hand, one of the important issues in the power network is the operation issue. In the operation of the power system, the production power must be equal to the required load so that the network frequency remains constant at a certain value. Considering that the production power of parabolic collector solar power plants depends on the amount of solar radiation, due to the change of solar radiation, the production power of parabolic collector power plants also changes, and therefore, the study of the operation of the power system with the presence of this power plant will be different from the study of power system operation that has conventional power plants with constant and controllable power. Therefore, in this research, the study of power system utilization with the presence of parabolic collector power plant will be done.

Keywords: solar power plant equipped with linear parabolic collector, operation, sun irradiance, unit commitment risk, spinning reserve.

Corresponding Author: Mohammad Bagher Rezaeianzadeh

Corresponding Author Address: Department of Electrical & Computer - Kazeroun Branch -Islamic Azad University- Kazeroun, Iran

مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی حرارتی مجهز به کلکتور سهموی خطی

محمد باقر رضائیان زاده^۱، کارشناسی ارشد، محمدحسین فاتحی دیندارلو^۲، استادیار

^۱ دانشکده برق و کامپیوتر - واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
rezaecianzadehbagher@gmail.com

^۲ دانشکده برق و کامپیوتر - واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
mh.fatehi@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱

چکیده:

به دلیل مسائل و مشکلاتی که نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی دارند استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از قبیل باد، خورشید و اقیانوس در سیستم قدرت به منظور تولید برق در حال افزایش است. آلودگی محیط زیست، نگرانی از تمام شدن منابع سوخت‌های فسیلی و نوسان قیمت آن‌ها از جمله مشکلاتی است که سبب شده است کشورهای مختلف دنیا به فکر جایگزینی آن‌ها توسط منابع انرژی تجدیدپذیر باشند. یکی از انواع نیروگاه‌هایی که به منظور تولید برق از انرژی خورشید استفاده می‌کند، نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی کلکتور سهموی می‌باشد. در این نیروگاه‌ها به کمک آینه‌های سهموی نور خورشید بر نقطه کانونی متمرکز می‌شود. در این نیروگاه‌ها، نقطه کانونی به صورت یک خط بوده که لوله‌هایی محتوی سیال در این لوله‌ها قرار می‌گیرند. گرمای مربوط به نور خورشید متمرکز شده سبب افزایش دمای سیال درون لوله می‌گردد. به کمک یک مبدل حرارتی، گرمای سیال درون لوله به آب منتقل شده و سبب تبخیر آن می‌گردد. بخار آب نیز سبب چرخش توربین و در نتیجه تولید برق می‌شود. با توجه به اینکه توان تولیدی این نیروگاه‌ها زیاد می‌باشد، می‌توان این نیروگاه‌ها را به شبکه انتقال متصل نمود. از طرف دیگر یکی از مسائل مهم در شبکه قدرت، مسئله بهره‌برداری است. در بهره‌برداری سیستم قدرت، بایستی توان تولیدی با بار مورد نیاز برابر باشد تا فرکانس شبکه در مقدار مشخصی ثابت بماند. با توجه به اینکه توان تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی به میزان تابش خورشید وابسته است، به دلیل تغییر تابش خورشید، توان تولیدی نیروگاه‌های کلکتور سهموی نیز تغییر می‌کند و بنابراین مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها متفاوت از مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرتی خواهد بود که دارای نیروگاه‌های متعارف با توان ثابت و قابل کنترل می‌باشد. بنابراین در این تحقیق مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه کلکتور سهموی انجام خواهد شد.

کلمات کلیدی: نیروگاه خورشیدی حرارتی مجهز به کلکتورهای سهموی خطی، بهره‌برداری، شدت تابش خورشید، ریسک انتخاب واحد، رزرو چرخان.

نام نویسنده‌ی مسئول: محمد باقر رضائیان زاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کازرون - دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون - دانشکده برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در گذشته به منظور تولید برق، نیروگاه‌های مختلفی نظیر نیروگاه‌های آبی، هسته‌ای، بخار، سیکل ترکیبی و گازی با ظرفیت زیاد ساخته می‌شدند تا بازدهی بالایی داشته باشند. در نیروگاه‌های بخار، سیکل ترکیبی و گازی نیز معمولاً از سوخت‌های فسیلی نظیر زغال‌سنگ، مازوت، گازوئیل، گاز طبیعی و ... استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر وضعیت آلودگی کره زمین به مرز هشدار رسیده است و کشورهای مختلف دنیا به دنبال راه‌حلی جهت کاهش آلودگی زیست محیطی هستند. یکی از دلایل آلودگی محیط زیست انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن‌دار است که در نتیجه سوزاندن سوخت‌های فسیلی ایجاد می‌شوند. به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باید میزان سوزاندن سوخت‌های فسیلی از جمله در نیروگاه‌های تولید برق کاهش بیابد. بنابراین کشورهای مختلف جهان به سمت استفاده از نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر حرکت نموده‌اند تا بتوانند با احداث نیروگاه‌هایی نظیر نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های خورشیدی، نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی، نیروگاه‌های جزرومدی جریانی، نیروگاه‌های امواج، نیروگاه‌های زمین گرمایی و ... برق پاک تولید کنند. انتظار می‌رود در آینده منابع انرژی تجدیدپذیر در تامین برق مورد نیاز نقش زیادی داشته باشند. از بین منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشید در کشور ایران نسبت به سایر منابع تجدیدپذیر بیشتر در دسترس بوده و از پتانسیل بالایی نیز برخوردار است. بر همین اساس در این تحقیق نیروگاه‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بطور کلی دو نوع نیروگاه خورشیدی وجود دارد: یکی نیروگاه فتوولتاییک است که به کمک پنل‌های خورشیدی تابش خورشید به برق جریان مستقیم تبدیل می‌شود و دیگری نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی. در نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی، از گرمای ایجاد شده توسط تابش خورشید استفاده می‌شود و دمای یک سیال کاری بالا برده شده و در یک سیکل ترمودینامیکی این سیال توربین را چرخانده و برق تولید می‌کند. در این مقاله نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی مطالعه می‌شوند. با توجه به اهمیت نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی، تاکنون کارهای تحقیقاتی زیادی در زمینه این نیروگاه‌ها انجام شده است. در [۱] چگونگی طراحی یک نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی بیان شده است. در این مقاله طراحی آینه‌های سهموی به منظور بهینه نمودن تمرکز تابش خورشید در نقطه کانونی صورت گرفته و ابعاد مختلف آینه‌ها شامل شعاع سهموی، ارتفاع عمودی آن، طول قوس، طول، مساحت و در نتیجه نسبت تمرکز تعیین شده است. در [۲] مطالعات تجربی و همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی در زمینه طراحی کلکتورهای سهموی خورشیدی به منظور دریافت انرژی خورشیدی بهینه صورت گرفته است. در این مقاله بیان شده است که بازده نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی بیش از نیروگاه‌های فتوولتاییک می‌باشد و ارزیابی یک کلکتور سهموی خورشیدی به طول ۵ متر صورت گرفته است. در این کلکتور المان درافت کننده حرارتی از جنس استیل بوده و از آب به عنوان سیال کاری استفاده شده است. در [۳] سیستم کلکتور خورشیدی سهموی به منظور تولید بخار آب با دمای پایین مورد بررسی قرار گرفته و چگونگی طراحی و مشخصات عملکردی آن بیان شده است. در این مقاله مطابق با شرایط تست در استاندارد کلکتورها، بازده کلکتور و بهبود دهنده زاویه تابش آن اندازه‌گیری شده است. کلکتور سهموی مورد مطالعه توانسته است در شرایط تست به صورت پیوسته ماکزیمم بازده ممکن را داشته باشد. در [۴] مدل مربوط به کلکتورهای سهموی خورشیدی خطی به منظور تعیین عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل، تاثیر شدت تابش خورشید، زاویه تابش خورشید، ابعاد کلکتور، خواص مواد تشکیل دهنده، خواص سیال به کار رفته، شرایط محیطی و شرایط بهره‌برداری مورد توجه قرار گرفته و مشخصات عملکردی کلکتور خورشیدی سهموی در این شرایط مطالعه شده است. در [۵] اثر کسینوسی مربوط به کلکتورهای سهموی خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله به منظور بالا بردن دمای سیال درون لوله‌ها که ناشی از تمرکز نمودن تابش خورشید توسط آینه‌های سهموی است، ابعاد کلکتور مشخص شده است. بر همین اساس با توجه به تغییر زاویه تابش خورشید در طول سال، اثر کسینوسی در نظر گرفته شده و طراحی کلکتورها به منظور ماکزیمم نمودن تابش خورشید صورت پذیرفته است. در [۶] مسئله بهره‌برداری توربین‌های بادی در سیستم قدرت و ملزومات اتصال این نیروگاه‌ها به شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله پارامترهای کیفیت توان مربوط به نیروگاه‌های بادی توصیف شده و مدل الکتریکی، مکانیکی و آیرودینامیکی تجهیزات تشکیل دهنده توربین‌های بادی به دست آمده است. همچنین به

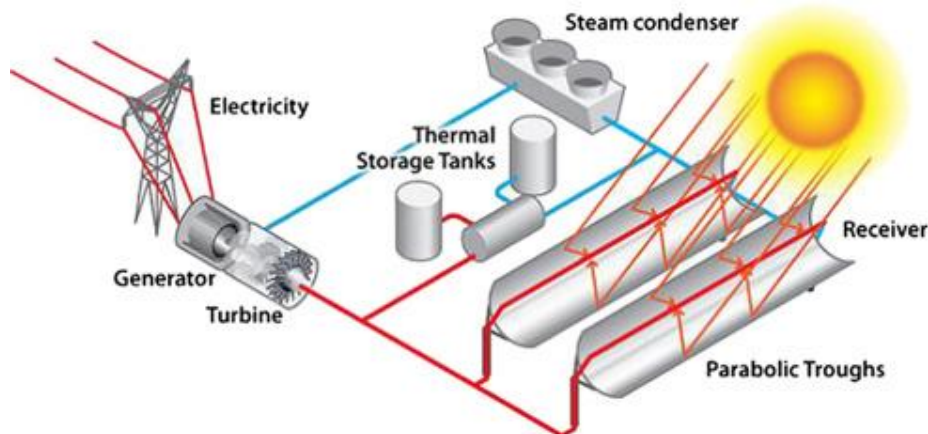
منظور تعیین پدیده‌های کیفیت توان توربین بادی، معادلات دیفرانسیل پیچیده‌ای به دست آمده که به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری حل شده است. در [۷] تاثیر نیروگاه بادی بر مطالعات بهره‌برداری سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به عدم قطعیت توربین بادی که در نتیجه تغییرات سرعت باد می‌باشد، پارامترهای سیستم نظیر ولتاژ، جریان و ... تغییر می‌کند. در این مقاله تاثیر یک مزرعه بادی ۵۰۰ مگاواتی بر سیستم قدرت ۲۲۰ کیلوولتی مورد بررسی قرار گرفته است. مزرعه بادی به در دو مدل در دو ناحیه که منحنی باد مختلفی دارند تقسیم شده است. سناریوهای مختلف توان تزریقی توسط نرم-افزار نپلن شبیه‌سازی شده و تاثیر مزرعه بادی بر ولتاژ، پخش بار و تلفات سیستم با در نظر گرفتن اثر تغییرات سرعت باد بررسی شده است. در [۸] بهره‌برداری بهینه سیستم قدرت با در نظر گرفتن انرژی بادی و مدیریت سمت تقاضا مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله بیان شده است که به دلیل تغییرات توان تولیدی نیروگاه بادی که ناشی از تغییرات سرعت باد می‌باشد اختلافی بین توان تولیدی و بار مورد نیاز ایجاد می‌شود که از مدیریت سمت تقاضا به منظور جبران این اختلاف استفاده شده است. بر همین اساس از دیسپاچینگ اقتصادی دینامیکی با در نظر گرفتن سناریوهای سطح نفوذ مختلف از انرژی بادی استفاده شده است تا تاثیر مدیریت سمت تقاضا بر هزینه بهره‌برداری در شرایط مختلف تولیدات بادی مشخص گردد. روش پیشنهادی به یک سیستم قدرت دارای ۶ واحد تولید اعمال شده تا کارایی این روش مشخص گردد. مقاله [۹] مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های حرارتی اقیانوس را انجام داده است. در این مقاله ابتدا یک مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای نیروگاه‌های حرارتی اقیانوس به دست آورده شده است. سپس با استفاده از روش ضرب ماتریسی احتمال حالت‌های مختلف این نیروگاه در زمان مطالعه به دست آورده شده است. از مدل به دست آمده به منظور تعیین شاخص‌های بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها استفاده شده است. در [۱۰] مطالعه بهره‌برداری بهینه نیروگاه-های جزرومدی نوع مخزنی با حضور هیدروپمپ انجام شده است. در این روش تعداد توربین‌ها، دریچه‌ها و هیدروپمپ‌ها در ساعات مختلف بهره‌برداری از نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی به گونه‌ای تعیین شده است تا انرژی تولیدی نیروگاه در بازه مورد مطالعه ماکزیمم گردد. روشی که در این مقاله برای بهینه‌سازی تابع هدف استفاده شده است الگوریتم توده ذرات می-باشد. در [۱۱] مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور مبدل‌های انرژی امواج صورت گرفته است. در این مقاله نیروگاه اژدهای موج به عنوان یکی از مبدل‌های انرژی امواج در نظر گرفته شده و مدل قابلیت اطمینان آن با در نظر گرفتن خرابی اجزای تشکیل دهنده و تغییرات توان خروجی ناشی از تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج به دست آمده است. سپس با استفاده از روش PJM شاخص‌های بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها محاسبه شده است. در این مقاله مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی حرارتی مجهز به کلکتورهای سهموی خطی انجام می‌شود. نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر می‌باشند:

- یک مدل قابلیت اطمینان چندحالتی برای نیروگاه‌های خورشیدی مجهز به کلکتور سهموی خطی به دست آمده است که هم خرابی اجزا و هم تغییرات توان خروجی را در نظر می‌گیرد.
- احتمال حالت‌های مختلف نیروگاه خورشیدی مجهز به کلکتور سهموی خطی بر اساس روش ضرب ماتریسی به دست آورده می‌شود.
- با استفاده از روش PJM اصلاح شده شاخص‌های بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی مجهز به کلکتورهای سهموی خطی محاسبه می‌گردد.

بر همین اساس سازماندهی این تحقیق به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی معرفی می‌گردد و در بخش سوم تکنیک انجام مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه کلکتور سهموی بیان می‌گردد. در این بخش همچنین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه کلکتور سهموی که برای انجام مطالعات بهره‌برداری مناسب است مشخص می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی دو سیستم تست روی بیلینتون و IEEE با در نظر گرفتن اثر نیروگاه‌های کلکتور سهموی در بخش چهارم بیان می‌شود و در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری مقاله آورده می‌شود.

۲- نیروگاه خورشیدی حرارتی مجهز به کلکتور سهموی خطی

ساختار یک نمونه نیروگاه حرارتی خورشیدی مجهز به کلکتورهای سهموی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این نیروگاه‌ها به کمک آینه‌های سهموی، تابش خورشید در نقطه کانونی آینه که یک خط می‌باشد متمرکز می‌گردد. در خط کانونی آینه‌ها یک لوله حاوی یک سیال قرار داده می‌شود. گرمای حاصل از تمرکز تابش خورشید بر این لوله‌ها سبب گرم شدن سیال درون لوله می‌شود. سپس در یک مبدل حرارتی دمای بالای این سیال به آب منتقل شده و آب به بخار تبدیل می‌شود. بخار آب نیز از توربین عبور داده شده و سبب چرخش توربین می‌گردد. محور توربین به محور ژنراتور کوپل شده و با چرخش توربین، روتور ژنراتور نیز به چرخش درآمده و برق تولید می‌شود.



شکل (۱): نیروگاه حرارتی خورشیدی مجهز به کلکتور سهموی خطی

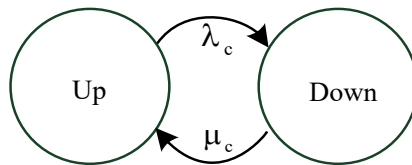
توان الکتریکی تولیدی نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی به شدت تابش خورشید وابسته است. به دلیل اینکه شدت تابش خورشید در طول زمان تغییر می‌کند، توان تولیدی نیروگاه کلکتور سهموی نیز تغییر کرده و این امر بر مطالعات مختلف سیستم قدرت زمانی که این نیروگاه‌ها سهم قابل توجهی در تامین برق مورد نیاز دارند تاثیر می‌گذارد. بر همین اساس در این مقاله مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی انجام می‌شود. در مطالعات بهره‌برداری سیستم قدرت همواره باید میزان توان تولیدی نیروگاه‌ها با بار مصرفی برابر باشد. در صورتی که این تعادل به هم بخورد فرکانس شبکه تغییر می‌کند که این امر قابل قبول نخواهد بود. بنابراین باید تعادل بین تولید و بار در هر لحظه از زمان برقرار بماند. بر همین اساس لازم است که همواره مقداری رزرو چرخان در سیستم قدرت وجود داشته باشد تا زمانی که به هر دلیلی نظیر خرابی نیروگاه‌ها یا خطوط انتقال، میزان توان تولیدی در دسترس کاهش یابد بلافاصله این رزروهای چرخان وارد عمل شده و کمبود توان مورد نیاز را جبران نماید. بنابراین در این تحقیق میزان رزرو بهره‌برداری مورد نیاز در سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی تعیین می‌گردد. بنابراین به دلایل زیر مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی اهمیت دارد: با توجه به آلودگی محیط زیست ناشی از سوخت‌های فسیلی، تمام شدن منابع این سوخت‌ها و نوسان قیمت آن‌ها انتظار می‌رود در آینده منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی سهم بسزایی در تولید برق داشته باشد. بنابراین مطالعه نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی که نمونه‌ای از نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر است اهمیت دارد. در سیستم قدرت، مسئله بهره‌برداری و تعادل تولید و مصرف بسیار حائز اهمیت است. بنابراین مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با در نظر گرفتن اثر نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی دارای اهمیت می‌باشد. در این مقاله ارزیابی بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی انجام می‌شود.

۳- تکنیک انجام مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه کلکتور سهموی

در بهره‌برداری سیستم قدرت باید در هر لحظه از زمان میزان توان تولیدی نیروگاه‌های موجود در شبکه با میزان بار مورد نیاز برابر باشد. در غیر این صورت فرکانس شبکه تغییر می‌کند که این امر برای بسیاری از تجهیزات شبکه از جمله ژنراتورها قابل قبول نیست. در صورتی که میزان توان تولیدی از بار سیستم بیشتر باشد فرکانس شبکه افزایش می‌یابد و در صورتی که توان تولیدی از بار شبکه کمتر باشد فرکانس شبکه کاهش می‌یابد. بر همین اساس و به منظور حفظ پایداری سیستم قدرت باید توان تولیدی با بار مورد نیاز شبکه برابر باشد. در صورتی که میزان توان تولیدی نیروگاه‌ها به اندازه بار مورد نیاز شبکه نباشد به منظور ثابت نگه داشتن فرکانس شبکه باید مقداری از بار شبکه قطع شود که این امر قابلیت اطمینان سیستم قدرت را کاهش می‌دهد. قابلیت اطمینان یک سیستم به معنای درست انجام دادن کار محوله به آن سیستم می‌باشد. در شبکه قدرت هدف تامین بار مورد نیاز شبکه است و بنابراین قابلیت اطمینان شبکه قدرت یعنی بار مورد نیاز شبکه تامین گردد. در انجام مطالعات شبکه قدرت سه سطح سلسله مراتبی وجود دارد: در سطح اول فقط سیستم تولید در نظر گرفته می‌شود، در سطح دوم هم سیستم تولید و هم سیستم انتقال مطالعه می‌شود و سطح سوم به مطالعه همه بخش‌های سیستم قدرت شامل تولید، انتقال و توزیع می‌پردازد [۱۲]. در مطالعات قابلیت اطمینان شبکه قدرت دو دسته مطالعه وجود دارد: دسته اول مطالعات کفایت سیستم قدرت است و هدف از آن بررسی این است که آیا امکانات و ادوات کافی در تمامی بخش‌های سیستم قدرت جهت تامین بار وجود دارد یا نه. مطالعه دسته دوم مطالعات امنیت شبکه قدرت است. در این دسته از مطالعات پاسخ سیستم قدرت به اغتشاش‌های ممکن بررسی می‌شود. در مطالعات امنیت سیستم قدرت هدف این است که بررسی شود آیا با بروز اغتشاشاتی نظیر خرابی نیروگاه‌ها یا خطوط انتقال، بار سیستم باز تامین می‌گردد یا نه. در مطالعات بهره‌برداری سیستم قدرت که نیروگاه‌های موجود در شبکه در حال تامین بار مورد نیاز شبکه هستند باید بررسی نمود که آیا خرابی یک یا چند نیروگاه منجر به قطعی بار می‌شود یا نه. به منظور جلوگیری از قطعی بار در این مطالعات، مقداری رزرو چرخان در شبکه قدرت در نظر گرفته می‌شود. منظور از رزرو چرخان این است که برخی از نیروگاه‌های سنکرون در شبکه در حال تولید توان هستند اما ماکزیمم توان خود را تولید نمی‌کنند. حال اگر یکی از نیروگاه‌های سنکرون در شبکه خراب شود، نیروگاه‌های رزرو چرخان می‌توانند بلافاصله و در مدت زمان کوتاهی توان تولیدی خود را افزایش دهند و کمبود توانی که در نتیجه خرابی نیروگاه ایجاد شده است جبران شود. به منظور تعیین میزان رزرو چرخان از گذشته تا کنون از روش‌های مختلفی استفاده شده است. در گذشته میزان رزرو چرخان به صورت درصدی از بار، یا درصدی از توان تولیدی نیروگاه‌ها و یا ترکیبی از این دو در نظر گرفته می‌شده است. در یکی از روش‌ها که به معیار $n-1$ معروف است میزان رزرو چرخان به اندازه ظرفیت بزرگترین نیروگاه سنکرون در مدار در نظر گرفته می‌شود. معیار $n-1$ به این معنا است که فرض شود n نیروگاه در مدار وجود دارد که دارند بار را تامین می‌کنند، اگر یکی از این نیروگاه‌ها خراب شود طبق معیار $n-1$ باید بقیه نیروگاه‌ها باز بتوانند بار را تامین کنند. بدترین حالت این است که بزرگترین نیروگاه خراب شود که در این حالت نیز باید بتوان بار را تامین نمود. بر همین اساس در معیار $n-1$ باید میزان رزرو چرخان برابر با ظرفیت بزرگترین نیروگاه سنکرون در شبکه باشد که اگر این نیروگاه خراب شود باز بتوان بار را تامین نمود. در نظر گرفتن میزان رزرو بر اساس روش‌های گفته شده را روش‌های قطعی می‌گویند زیرا در این روش‌ها وضعیت خرابی نیروگاه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود و بر اساس تجربه این مقادیر برای رزرو در نظر گرفته می‌شود. عیب این روش‌ها این است که ممکن است دو حالت اتفاق بیفتد: در حالت اول فرض شود سیستم نو بوده و احتمال خرابی نیروگاه‌ها خیلی کم است. در این صورت ممکن است میزان رزرو در نظر گرفته بیشتر از مقدار مورد نیاز باشد که سبب وارد آمدن هزینه بهره‌برداری بیشتر بر شبکه قدرت می‌گردد. حالت دوم ممکن است سیستم قدرت بسیار فرسوده باشد. در این حالت مقدار رزرو در نظر گرفته شده ممکن است کافی نباشد و منجر به قطعی بار و کاهش قابلیت اطمینان گردد. بنابراین استفاده از روش‌های قطعی در تعیین رزرو سیستم قدرت مناسب نیست. بر همین اساس برای تعیین رزرو از روش‌های تصادفی که مبتنی بر در نظر گرفتن احتمال خرابی نیروگاه‌ها است استفاده می‌شود.

روشی که در این مقاله به منظور تعیین رزرو چرخان مورد استفاده قرار می‌گیرد روش PJM است [۱۳]. این روش در ایالت‌های پنسیلوانیا، نیوجرسی و مریلند آمریکا استفاده می‌شده است. در این روش ریسک سیستم در مطالعات بهره‌برداری به دست آورده شده و بر اساس آن میزان رزرو چرخان تعیین می‌گردد. منظور از حالت‌های ریسک، حالت‌هایی است که توان تولیدی

نیروگاه‌ها از بار مورد نیاز شبکه کوچکتر بوده و به ناچار باید بشی از بار را قطع نمود. برای به دست آوردن ریسک سیستم، ابتدا باید مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های مختلف به دست آورده شود. مدل مارکوف حالت‌های مختلفی که یک سیستم می‌تواند داشته باشد را بیان می‌کند. در این تحقیق، برای نیروگاه‌های متعارف سنتی یک مدل قابلیت اطمینان دو حالت به صورت نشان داده شده در شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، یک نیروگاه متعارف سنتی دارای دو حالت می‌باشد: یا سالم است و دارد توان نامی را تولید می‌کند و یا اینکه خراب است و توان تولیدی آن صفر است. در این مدل نرخ گذر از حالت سالم به خراب λ_c و نرخ گذر از حالت خراب به سالم μ_c می‌باشد.



شکل (۲): مدل مارکوف دو حالت برای نیروگاه‌های متعارف سنتی

در مطالعات بهره‌برداری باید توجه داشت که زمان مطالعه کوتاه است. بنابراین انجام تعمیرات در این زمان کوتاه امکان‌پذیر نمی‌باشد. از طرف دیگر در مدل مارکوف تنها یک خرابی اتفاق می‌افتد و خرابی همزمان دو تجهیز صرف‌نظر می‌شود. بنابراین می‌توان اینگونه فرض کرد که در مطالعات بهره‌برداری نیز به دلیل کوتاهی زمان مطالعه، تنها خرابی یک تجهیز اتفاق می‌افتد. اگر یک تجهیز که مدل مارکوف دو حالت دارد در شروع مطالعه یعنی زمان صفر سالم باشد، احتمال خراب بودن آن در لحظه T به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$P(\text{down}) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)T} \quad (1)$$

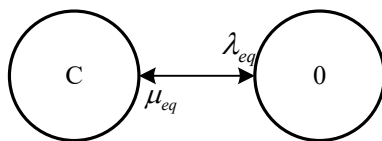
با توجه به اینکه در مطالعات بهره‌برداری زمان مطالعه کوتاه است، از نرخ تعمیر صرف‌نظر می‌گردد. به علاوه به دلیل کوتاه بودن زمان مطالعه بهره‌برداری، مقدار T نیز کم بوده و بنابراین با تقریب خوبی می‌توان احتمال خرابی یک نیروگاه متعارف سنتی را از رابطه زیر تعیین کرد:

$$P(\text{down}) = 1 - e^{-\lambda T}, \lambda T \ll 1 \Rightarrow P(\text{down}) = ORR = \lambda T \quad (2)$$

در این رابطه ORR احتمال خراب بودن نیروگاه متعارف سنتی در لحظه T بوده و به آن نرخ جایگزینی خروجی گفته می‌شود. به منظور تعیین ریسک بهره‌برداری در یک سیستم قدرت جدول احتمال خروج ظرفیت‌ها برای هر کدام از نیروگاه‌ها به دست می‌آید. در این جدول توان تولیدی هر نیروگاه و احتمال مربوطه وجود دارد. نیروگاه‌های متعارف سنتی دو حالت دارند یا خراب هستند با احتمال برابر نرخ جایگزینی خروجی و یا سالم هستند که احتمال آن از کم کردن احتمال خرابی از ۱ تعیین می‌شود. به همین صورت برای همه نیروگاه‌های متعارف سنتی جدول ظرفیت - احتمال به دست آمده و این جدول‌ها با هم ترکیب می‌شوند تا جدول ظرفیت - احتمال سیستم تولید شامل کل نیروگاه‌ها به دست آید. مقدار بار سیستم نیز در مطالعات بهره‌برداری که زمان کوتاه است ثابت فرض می‌شود. از مقایسه توان تولیدی هر حالت با بار سیستم حالت‌های ریسک به دست می‌آید. ریسک بهره‌برداری سیستم قدرت برابر با جمع احتمال حالت‌های ریسک می‌باشد.

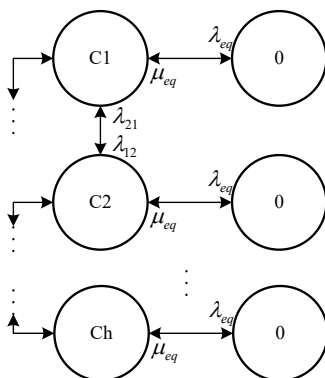
با لحاظ نمودن احتمال خرابی اجزای تشکیل دهنده مدل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی مجهز به کلکتورهای سهموی خطی به صورت نشان داده شده در شکل (۳) خواهد بود. در این مدل نرخ خرابی و نرخ تعمیر معادل مربوط به اتصال سری مجموعه آینه‌های سهموی متصل به لوله‌های جاذب، بویلر، توربین، کندانسور، پمپ‌های گردش سیال و گردش آب،

ژنراتور و ترانسفورماتور می‌باشد. احتمال خراب شدن همزمان آینه‌های سهموی و لوله‌های جاذب متصل به آن بسیار کم بوده و لذا به دلیل ناچیز بودن نرخ خرابی این مجموعه از آن صرف‌نظر می‌گردد.

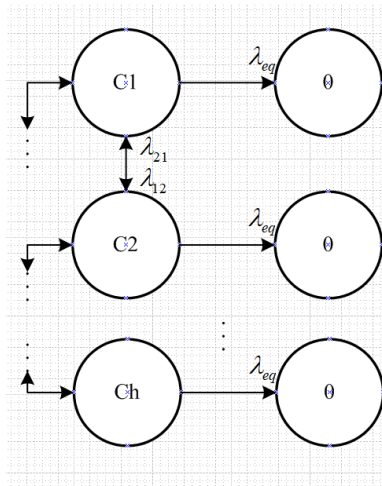


شکل (۳): مدل نهایی قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی خطی با لحاظ کردن خرابی تجهیزات

حال باید تاثیر تغییرات تابش خورشید در طول روز، ماه‌ها و فصل‌های مختلف بر مدل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی مجهز به کلکتورهای سهموی خورشیدی بررسی شود. توان خروجی ساعت به ساعت یک نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی از ضرب مقدار تابش ساعت به ساعت خورشید در مساحت آینه‌های سهموی، بازده انعکاس آینه‌ها، ضریب انتشار جو، بازده کسینوسی، بازده لوله دریافت‌کننده، بازده بویلر یا مبدل انتقال حرارت، بازده توربین، بازده ژنراتور، بازده مبدل و بازده ترانسفورماتور به دست می‌آید. به دلیل متغیر بودن تابش خورشید در طول ساعت‌های مختلف، توان تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی نیز متغیر بوده و تعداد حالت‌های توان خروجی این نیروگاه‌ها زیاد می‌باشد که باید به کمک یک روش خوشه‌بندی مناسب تعداد این حالت‌ها کاهش یابد. روشی که در این تحقیق پیشنهاد می‌گردد روش خوشه‌بندی میانگین فازی از نوع C می‌باشد. در این روش با معلوم بودن تعداد خوشه‌ها یا کلاسترها، اعداد مختلف بر اساس یک عدد فازی بین ۰ و ۱ به هر کدام از خوشه‌ها تعلق می‌گیرند. این روش به منظور تعیین مرکز کلاسترها و همچنین عدد فازی مربوط به هر داده تابع هدف که همان فاصله بین داده‌ها تا مرکز خوشه‌ها می‌باشد را مینیمم می‌نماید [۱۴]. با به دست آوردن تعداد کلاسترها و احتمال مربوط به هر کلاستر، مدل کامل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی مجهز به کلکتورهای سهموی خطی از ترکیب مدل دو حالتی مربوط به خرابی اجزا با مدل حاصل از کلاستربندی به صورت نشان داده شده در شکل (۴) به دست می‌آید. در این مدل فرض شده است کلاستر بندی منجر به تعداد h حالت با توان‌های C1, C2, ..., Ch شده است. می‌توان این مدل را با ادغام نمودن حالت‌های با ظرفیت صفر ساده‌تر نمود. به منظور تعیین احتمال هر کدام از این حالت‌های غیر از حالت با توان صفر کافی است دسترس‌پذیری نیروگاه را در احتمال مربوطه ضرب نمود و احتمال حالت صفر را نیز از کسر نمودن مجموع احتمال تمام حالت‌ها از عدد ۱ می‌توان محاسبه کرد. مدل به دست آمده برای انجام مطالعات با زمان زیاد به مانند مطالعات برنامه‌ریزی مناسب است. در مطالعات بهره‌برداری زمان مطالعه کوتاه است و بنابراین امکان انجام تعمیرات وجود ندارد. لذا از نرخ تعمیر در مدل صرف‌نظر می‌شود. در شروع مطالعه نیز فرض می‌گردد همه تجهیزات سالم هستند و در مدت زمان کوتاه مطالعه بهره‌برداری فقط خرابی یک تجهیز اتفاق می‌افتد. بنابراین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی که برای انجام مطالعات بهره‌برداری مناسب است به صورت نشان داده شده در شکل (۵) خواهد بود.



شکل (۴): مدل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی خطی در مطالعات درازمدت



شکل (۵): مدل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی خطی در مطالعات بهره‌برداری

در این بخش روش PJM توسعه داده شده تا نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی نیز بتوانند در مطالعات بهره‌برداری وارد شوند. با توجه به تغییرات گسترده توان خروجی نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی، مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌های چند حالتی بوده و نمی‌توان آن‌ها را به مانند نیروگاه‌های متعارف سنتی تنها با دو حالت سالم و خراب مدل نمود. بنابراین فرض می‌شود نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی مدلی m حالت دارد. این مدل بر اساس در نظر گرفتن خرابی تجهیزات و همچنین تغییرات توان خروجی به دست آمده است. با داشتن داده‌های تابش خورشید و مشخصات نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی، می‌توان توان خروجی آن را برای یک سال در بازه‌های مشخص (ساعت به ساعت و یا بازه‌های دیگر) مشخص نمود. بنابراین در مدل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی، تعداد حالت‌ها، ظرفیت هر کدام از این حالات و نرخ گذر بین حالت‌ها یا همان ماتریس گذر بین حالات مختلف در دسترس می‌باشد. فرض کنیم ماتریس اولیه گذر نیروگاه که از داده‌های گذشته به صورت ساعت به ساعت در طول یک سال به دست می‌آید به صورت زیر می‌باشد.

$$[P] = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \dots & N_{1m} \\ N_{21} & N_{22} & \dots & N_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{m1} & N_{m2} & \dots & N_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه فوق N_{ij} برابر با تعداد ساعات یا دفعاتی در سال است که تغییر توان تولیدی نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی از حالت i ام به حالت j ام اتفاق افتاده است. در صورتی که بخواهیم احتمال حالت‌های مختلف نیروگاه را در زمان t به دست آوریم باید وضعیت نیروگاه در زمان شروع مطالعه یا $t=0$ مشخص باشد. در این حالت نیروگاه در یکی از حالت‌های m گانه می‌باشد؛ چرا که توان تولیدی آن مشخص است لذا احتمال مربوط به آن حالت در شروع مطالعه ۱ و احتمال مربوط به سایر حالت‌ها صفر است. بنابراین ماتریس اولیه $[P(0)]$ که وضعیت اولیه نیروگاه را مشخص می‌کند (با فرض اینکه توان خروجی نیروگاه در ابتدای مطالعه در حالت k ام است) به صورت زیر خواهد بود:

$$P(0) = [P_{11} \ P_{12} \ \dots \ P_{1m}] \quad P_{li} = \begin{cases} 0 & i=1,2,\dots,m \quad i \neq k \\ 1 & i=k \end{cases} \quad (4)$$

حال اگر بخواهیم احتمال مربوط به حالت‌های m گانه نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی را در زمان t به دست آوریم باید این زمان را به تعدادی زمان کوتاه‌تر Δt تقسیم نماییم و مشخص کنیم در زمان t چند پله یا مرحله از زمان Δt وجود دارد. با فرض اینکه در هر مرحله نیروگاه یک انتقال انجام می‌دهد باید ماتریس گذر بین حالت‌ها و نرخ انتقال یا گذر بین حالت‌ها در زمان

Δt مشخص باشد. به این منظور باید ماتریس گذر بین حالات را که در زمان ۱ ساعت داریم در زمان Δt به صورت زیر مشخص نماییم:

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 - (\sum_{i=2}^m \lambda_{1i})\Delta t & \lambda_{12}\Delta t & \dots & \lambda_{1m}\Delta t \\ \lambda_{21}\Delta t & 1 - (\sum_{i=1, i \neq 2}^m \lambda_{2i})\Delta t & \dots & \lambda_{2m}\Delta t \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{m1}\Delta t & \lambda_{m2}\Delta t & \dots & 1 - (\sum_{i=1, i \neq m}^m \lambda_{mi})\Delta t \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در رابطه فوق داریم:

$$\lambda_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{k=1}^m N_{ik}}, i \neq j \quad (6)$$

حال اگر بخواهیم احتمال حالت‌های مختلف را در زمان t به دست آوریم باید تعداد $n=t/(\Delta t)$ گذر اتفاق بیفتد و در واقع ماتریس گذر حالت به اندازه n بار در خود ضرب شود. لذا بر اساس روش ضرب ماتریسی داریم:

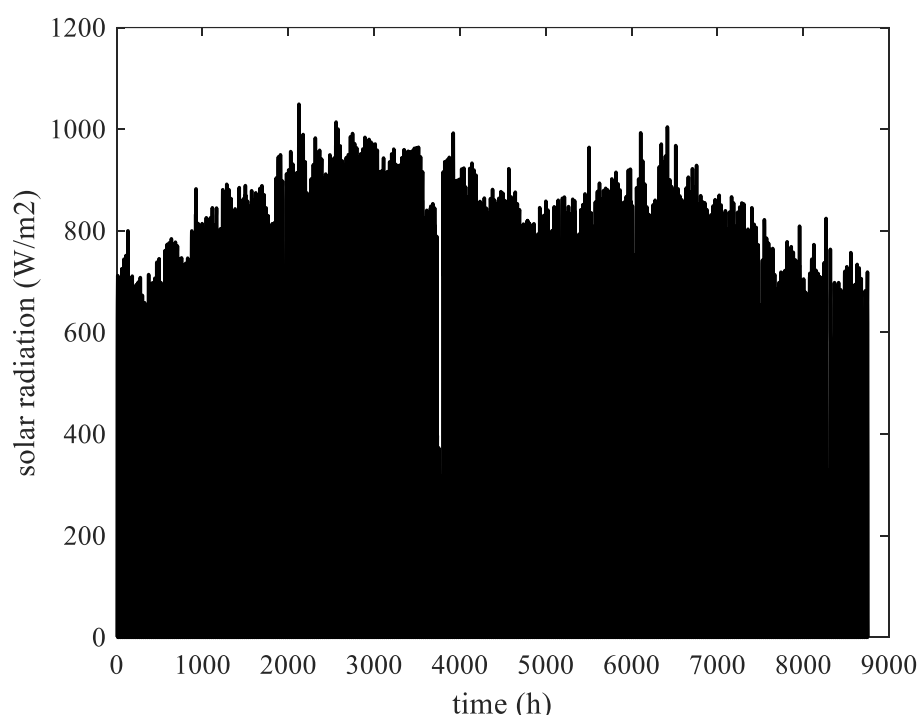
$$[P(t)] = [P(0)][P]^n \quad (7)$$

که در واقع ماتریس $[P(t)]$ یک ماتریس سطری با m ستون است که احتمال حالت‌های ۱ تا m را در لحظه t نشان می‌دهد. با داشتن احتمال حالت‌های m گانه نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی در هر لحظه از زمان t جدول احتمال ظرفیت‌های این نیروگاه نیز مشخص بوده و با جدول احتمال ظرفیت‌های سایر واحدهای تولید جدول احتمال ظرفیت‌های کل سیستم تولید را به دست می‌دهند. سپس می‌توان از مقایسه این جدول با بار سیستم ریسک انتخاب واحد و سایر شاخص‌های مهم بهره‌برداری را به صورت زیر به دست آورد:

- **ریسک یا خطرپذیری بهره‌برداری:** برابر با مجموع احتمال حالت‌هایی است که میزان تولید از بار کمتر و یا برابر می‌باشد.
- **رزرو چرخان:** به ازای یک بار مشخص و همچنین در یک زمان عملکرد معین، آنقدر واحد تولید به ترتیب اولویت به مدار آوردن به سیستم قدرت اضافه می‌شود تا اینکه معیار قابلیت اطمینان (که همان کمتر بودن ریسک بهره‌برداری از مقدار مجاز است) برآورده شود. در این حالت رزرو چرخان به صورت تفاوت مجموع ظرفیت واحدهای تولید به مدار آورده شده و بار سیستم تعیین می‌شود.
- **تعیین پیک بار قابل تغذیه:** به ازای تعداد مشخصی واحد تولید به مدار آورده شده که ظرفیت معینی دارند، مقدار پیک بار قابل تغذیه به صورت مقدار پیک باری که این سیستم می‌تواند تأمین نماید به شرط اینکه معیار قابلیت اطمینان را نیز پاسخگو باشد تعریف می‌شود. منظور از پاسخگو بودن معیار قابلیت اطمینان این است که مقدار ریسک بهره‌برداری از مقدار مجاز کمتر باشد.
- **تعیین قابلیت افزایش پیک بار:** این شاخص در شرایطی که یک واحد تولید جدید به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شود تعریف می‌شود. به این معنا که با اضافه شدن واحد تولید جدید چقدر می‌توان پیک بار قابل تغذیه سیستم را افزایش داد به شرطی که برای سیستم جدید با پیک بار جدید معیار قابلیت اطمینان برقرار باشد. در اینجا نیز معیار قابلیت اطمینان به مانند شاخص‌های قبل مبتنی بر ریسک بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود، بدین معنا که باید ریسک بهره‌برداری سیستم کمتر از مقدار مجاز باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

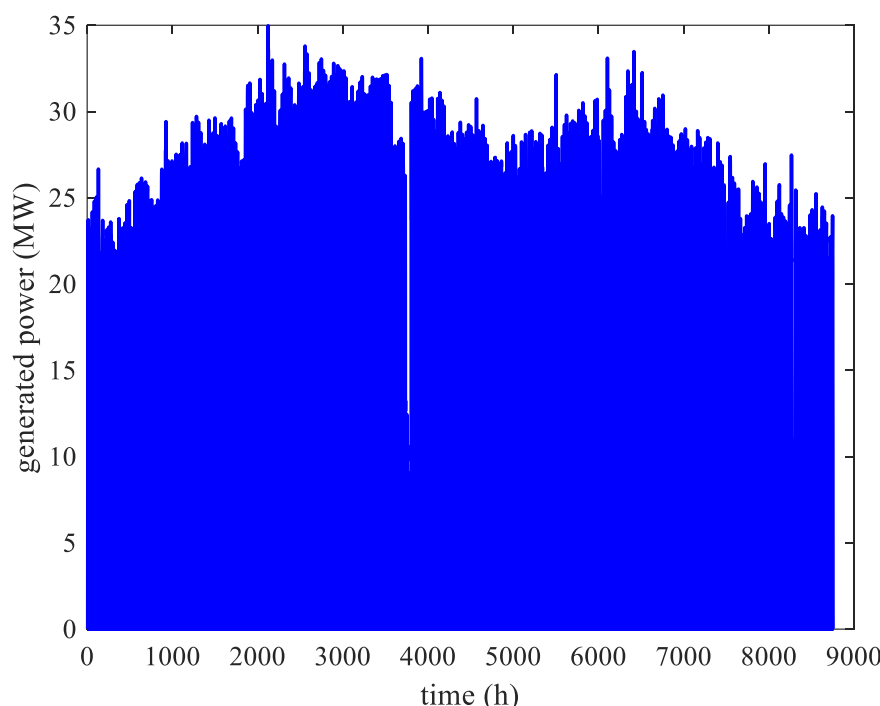
در این بخش ابتدا مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه ۳۰ مگاواتی از نوع نیروگاه خورشیدی مجهز به کلکتورهای سهموی خطی به دست آورده می‌شود. این نیروگاه ۳۰ مگاواتی کلکتور سهموی خطی در منطقه جاسک نصب شده است که داده‌های تابش خورشید مربوط به این جزیره به صورت ساعت به ساعت در سال ۲۰۱۸ در شکل (۶) نشان داده شده است. نرخ انعکاس آینه-های سهموی نیروگاه ۰/۹۴، بازده انتقال حرارت سیال کاری ۸۵ درصد، بازده بویلر ۸۹ درصد، بازده توربین ۴۵ درصد، بازده ژنراتور ۹۷ درصد، بازده مبدل الکترونیک قدرت ۹۸ درصد، بازده ترانسفورماتور ۹۸ درصد، درجه تمیزی آینه‌ها ۰/۸۵ و بازده کسینوسی نیز به طور متوسط ۰/۹۳ در نظر گرفته شده است. نرخ انتقال اتمسفر نیز با توجه به فاصله آینه‌های سهموی تا لوله دریافت‌کننده تعیین شده که در این تحقیق ۰/۹۹ در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود روش دنبال نمودن خورشید به کار رفته در این مقاله، دنبال کننده تک محوره شرقی به غربی بوده که بر اساس زاویه ارتفاع و آزیموت خورشید کار کنترل را انجام می‌دهد. این نیروگاه از ۵۷۱۴۳ آینه سهموی خطی هر کدام به مساحت ۲/۵ مترمربع تشکیل شده است. بنابراین در تابش نامی ۹۰۰ وات بر متر مربع توان خروجی نیروگاه ۳۰ مگاوات خواهد بود. توان تولیدی ساعت به ساعت این نیروگاه در شکل (۷) نشان داده شده است. نتیجه خوشه‌بندی فازی منجر می‌شود مرکز کلاسترها ۰، ۱۰/۹، ۲۱/۷ و ۲۸ مگاوات باشد. در این تحقیق نرخ خرابی و تعمیر تجهیزات به گونه‌ای است که نرخ خرابی معادل ۲ خرابی در سال و نرخ تعمیر معادل نیز ۹۸ تعمیر در سال می‌باشد. بنابراین دسترس‌پذیری نیروگاه ۰/۹۸ و دسترس‌ناپذیری آن نیز ۰/۰۲ خواهد بود. با ترکیب مدل قابلیت اطمینان ناشی از خرابی اجزای تشکیل دهنده نیروگاه و مدل قابلیت اطمینان حاصل از خوشه‌بندی، مدل کامل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی مجهز به کلکتور سهموی خطی به دست می‌آید. مدل نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی به دست آمده برای انجام مطالعات بلندمدت مناسب است. به منظور انجام مطالعات بهره‌برداری باید ماتریس گذر بین حالت‌های آن به دست آورده شود. در جدول (۱) این ماتریس نشان داده شده است.



شکل (۶): تابش خورشید ساعت به ساعت

همان‌گونه که گفته شد در مطالعات بهره‌برداری به دلیل کوتاهی زمان مطالعه تنها خروجی یک المان در نظر گرفته شده و همچنین از نرخ تعمیر نیز صرف‌نظر می‌گردد. با فرض اینکه در ابتدای مطالعه همه واحدها سالم هستند مدل قابلیت اطمینان نیروگاه نمونه ۸ حالت خواهد بود که ۵ حالت آن ظرفیت صفر دارد. به منظور استفاده از این مدل در مطالعات بهره‌برداری

سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی باید ماتریس گذر احتمال تصادفی به دست آورده شود. در این مطالعه پله‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای در نظر گرفته شده و بنابراین در هر ساعت ۶ انتقال یا گذر انجام می‌شود.

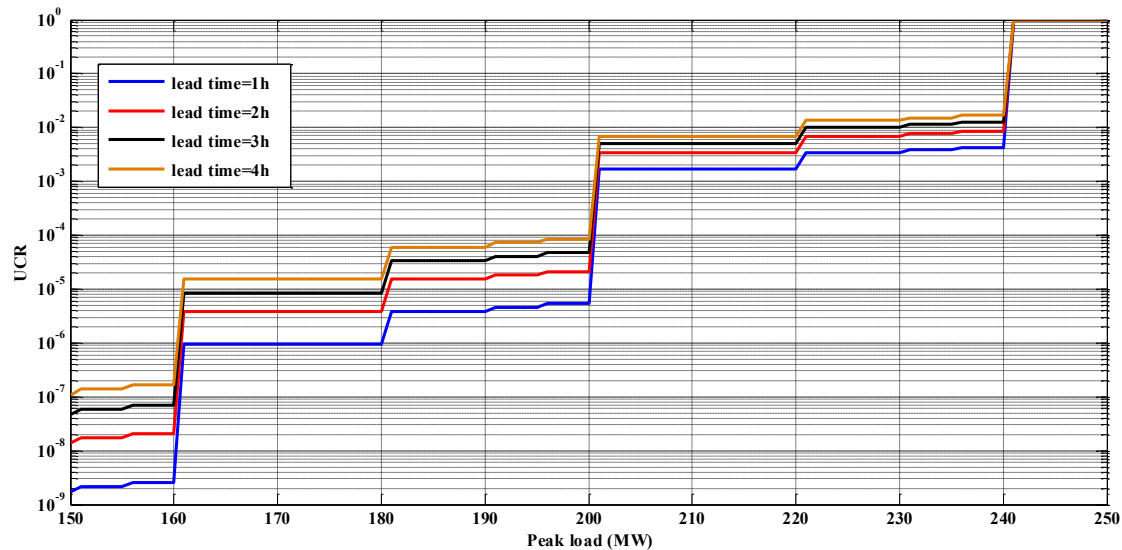


شکل (۷): توان تولیدی ساعت به ساعت نیروگاه

جدول (۱): ماتریس گذر بین حالت‌های چهارگانه بر حسب گذر در هر ساعت

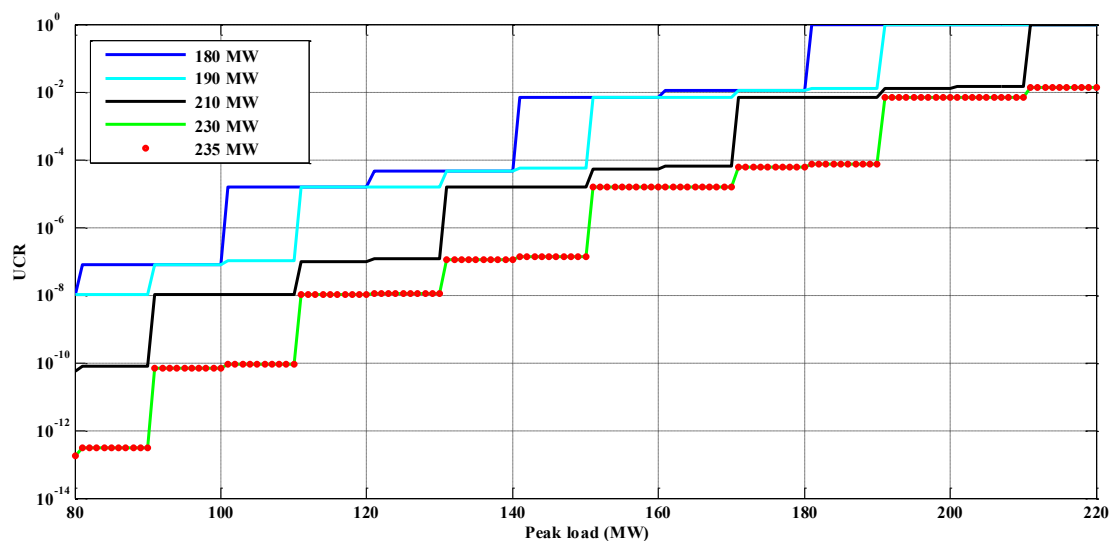
حالت‌ها	۱	۲	۳	۴
۱	۰/۷۶۸۳۰۰	۰/۱۶۱۰۴۴	۰/۰۴۲۶۴۸	۰/۰۲۸۰۰۸
۲	۰/۱۲۸۴۶۹	۰/۷۲۲۵۰۸	۰/۱۳۳۶۰۷	۰/۰۱۱۳۰۵
۳	۰/۰۳۶۷۴۳	۰/۱۲۵۱۲۴	۰/۶۷۷۷۵۶	۰/۱۵۹۹۷۸
۴	۰/۰۰۹۵۸۷	۰/۰۱۷۳۷۶	۰/۱۶۰۵۷۵	۰/۸۱۲۴۶۲

در این بخش از مقاله سیستم تست روی بیلینتون که شامل ۱۱ واحد تولید با ظرفیت ۲۴۰ مگاوات می‌باشد در نظر گرفته شده و تأثیر نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی بر شاخص‌های بهره‌برداری این سیستم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به منظور انجام مطالعات بهره‌برداری در حضور نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی، در این قسمت ۴ حالت در نظر گرفته می‌شود: حالت اول همان سیستم روی بیلینتون بدون اضافه کردن نیروگاه جدید بوده، در حالت دوم یک نیروگاه متعارف سنتی ۳۰ مگاواتی با نرخ خرابی ۵ بار در سال، در حالت سوم یک نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی ۳۰ مگاواتی با مشخصات بیان شده در قبل در شرایط تولید حداکثر توان به دلیل بالا بودن تابش خورشید در شروع مطالعه و در حالت چهارم نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی ۳۰ مگاواتی در شرایط تابش خورشید کم و تولید حداقل توان در شروع مطالعه به این سیستم اضافه می‌شود. در شکل (۸) نمودار خطرپذیری (ریسک) بهره‌برداری بر حسب اوج بار به ازای زمان عملکرد ۱ و ۴ ساعت برای سیستم تست روی بیلینتون پایه که همه واحدهای آن در مدار است رسم شده است. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود اولاً خطرپذیری انتخاب واحد به دلیل گسسته بودن ظرفیت واحدهای تولید طبیعی گسسته دارد و ثانیاً با افزایش پیک بار و زمان عملکرد میزان ریسک بیشتر می‌شود.



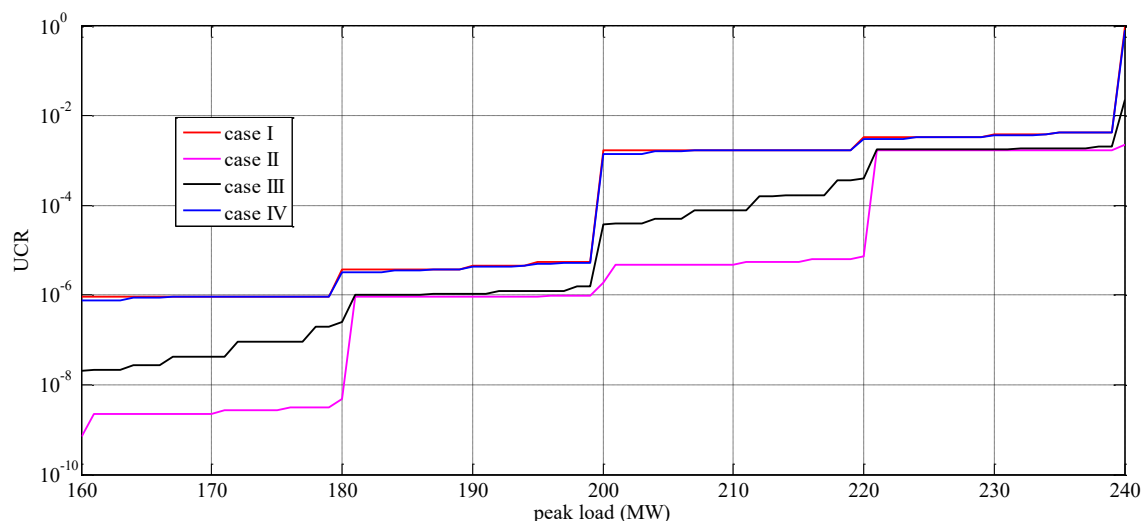
شکل (۸): نمودار ریسک بهره‌برداری بر حسب اوج بار به ازای زمان عملکرد ۴ تا ۱ ساعت

در شکل (۹) نمودار ریسک بهره‌برداری بر حسب اوج بار سیستم تست روی بیلینتون به ازای به مدار آوردن تعداد ۶ تا ۱۰ واحد با ظرفیت‌های ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۱۰، ۲۳۰ و ۲۳۵ مگاوات در زمان عملکرد ۴ ساعت آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است با افزایش تعداد نیروگاه‌ها و در نتیجه ظرفیت تولید بیشتر، میزان ریسک سیستم کاهش می‌یابد. در شکل (۱۰) مقدار ریسک بهره‌برداری در ۴ حالت ذکر شده بر حسب پیک بار و به ازای زمان عملکرد ۱ ساعت رسم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود اضافه شدن واحدهای متعارف سنتی و همچنین نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی میزان ریسک سیستم را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند؛ اما نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی به دلیل اینکه توان خروجی متغیر داشته و در بیشتر موارد توانی کمتر از توان نامی خود را به شبکه تحویل می‌دهند به نسبت واحدهای متعارف سنتی که توان خروجی ثابت و نامی دارند ریسک بهره‌برداری را به مقدار کمتری کاهش می‌دهند و تأثیر کمتری در بهبود شاخص‌های بهره‌برداری به نسبت واحدهای متعارف سنتی با توان نامی دارند. همچنین در صورتی که در شروع مطالعه انرژی تابشی خورشید کم و در نتیجه توان تولیدی نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی نیز کم باشد، نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی تأثیر چندانی در کاهش ریسک بهره‌برداری نخواهد داشت.

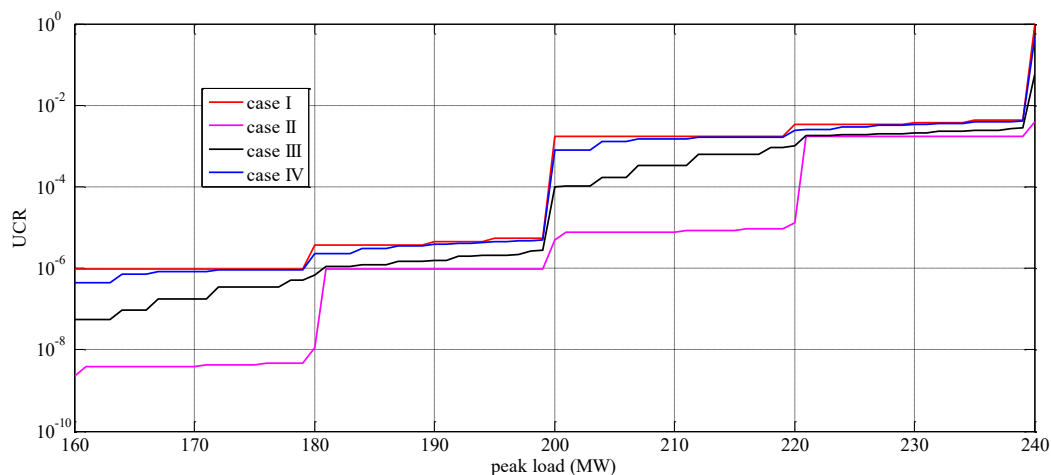


شکل (۹): نمودار ریسک بر حسب اوج بار سیستم تست روی بیلینتون به ازای به مدار آوردن تعداد ۶ تا ۱۰ واحد

در شکل (۱۱) مقدار خطرپذیری انتخاب واحد در ۴ حالت ذکر شده بر حسب پیک بار و به ازای زمان عملکرد ۴ ساعت رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است با زیاد شدن زمان عملکرد میزان ریسک افزایش می‌یابد. به مانند مطالعه قبل در این حالت نیز نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی و همچنین نیروگاه‌های متعارف توانسته‌اند ریسک بهره‌برداری را کاهش دهند اما در اینجا نیز نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی به نسبت نیروگاه‌های متعارف ریسک را کمتر کاهش داده‌اند. همان‌گونه که در این شکل نیز مشخص است در صورتی که در شروع مطالعه انرژی تابشی خورشید زیاد باشد، این نیروگاه‌ها تأثیر بیشتری در کاهش ریسک انتخاب واحد دارند اما به دلیل طولانی‌تر بودن زمان مطالعه به نسبت مطالعه قبل، تأثیر شرایط اولیه بر مقدار ریسک کم‌تر شده است.



شکل (۱۰): مقدار ریسک مربوط به ۴ حالت بیان شده بر حسب پیک بار و به ازای زمان عملکرد ۱ ساعت



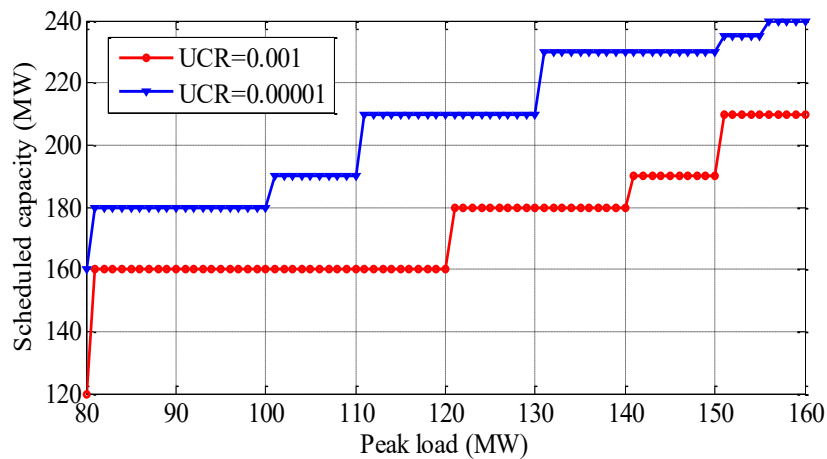
شکل (۱۱): مقدار ریسک در ۴ حالت ذکر شده بر حسب اوج بار و به ازای زمان عملکرد ۴ ساعت

در جدول (۲) اولویت به مدار آوردن و باردار نمودن واحدهای تولید سیستم تست روی بیلینتون از نقطه نظر اقتصادی نشان داده شده است. به لحاظ کم بودن هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌های آبی، به مدار آوردن این نیروگاه‌ها نسبت به نیروگاه‌های حرارتی تقدم دارد اما به لحاظ پاسخگویی به بار پیک، برخی نیروگاه‌های آبی برای تأمین اضافه بار نیز استفاده می‌شوند. در این قسمت به ازای بارهای مختلف، میزان ظرفیت تولید برای اینکه مقدار ریسک از مقادیر مجاز بیشتر نشود در حالت‌های مختلف آورده شده است. دو مقدار ریسک به صورت ریسک کم $UCR=0.00001$ و ریسک زیاد $UCR=0.001$ در این

مطالعات لحاظ شده است. به منظور انجام این مطالعه تعداد نیروگاه‌هایی که بر اساس اولویت لازم است به منظور برآورده شدن محدودیت ریسک در مدار آورده شوند در حالت‌های مختلف سیستم تست روی بیلینتون (حالت اول)، سیستم تست روی بیلینتون با نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی در شرایط انرژی تابشی خورشید زیاد در شروع مطالعه (حالت سوم) و سیستم تست روی بیلینتون با نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی در شرایط انرژی تابشی خورشید کم در شروع مطالعه (حالت چهارم) به ازای زمان عملکرد ۴ ساعت تعیین شده است. نمودار ظرفیت مورد نیاز بر حسب پیک بار به منظور برآورده شدن ریسک‌های کم و زیاد در ۳ حالت ذکر شده به ازای زمان عملکرد ۴ ساعت در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) آورده شده است. همانگونه که در این شکل‌ها فوق مشاهده می‌شود به منظور برآورده نمودن الزامات ریسک کمتر، مقدار ظرفیت بیشتری از واحدهای سیستم تست روی بیلینتون باید وارد مدار شوند. همچنین اضافه کردن نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی توانسته است میزان ظرفیت نیروگاه‌ها را به منظور برآورده نمودن ملزومات ریسک کاهش قابل توجهی دهد. در این جا نیز مشخص است که هر چه انرژی تابشی اولیه خورشید بیشتر باشد به ظرفیت کمتری از واحدهای متعارف نیاز است.

جدول (۲): ترتیب به مدار آوردن واحدهای تولید سیستم تست روی بیلینتون

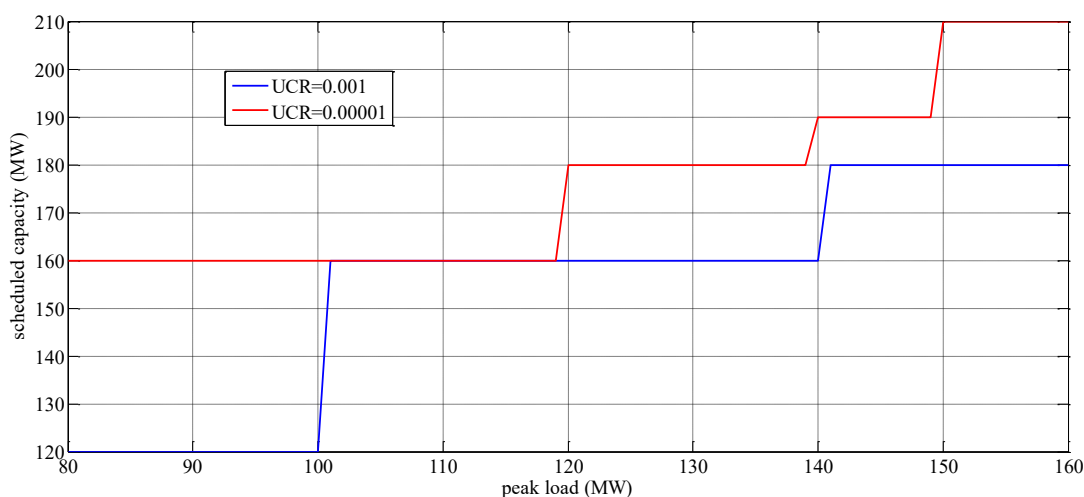
ظرفیت (مگاوات)	نوع	تعداد نیروگاه‌ها	اولویت	نرخ خرابی (تعداد در سال)
۴۰	آبی	۱	۱	۳
۲۰	آبی	۲	۲-۳	۲/۴
۴۰	حرارتی	۲	۴-۵	۶
۲۰	حرارتی	۱	۶	۵
۱۰	حرارتی	۱	۷	۴
۲۰	آبی	۲	۸-۹	۲/۴
۵	آبی	۲	۱۰-۱۱	۲



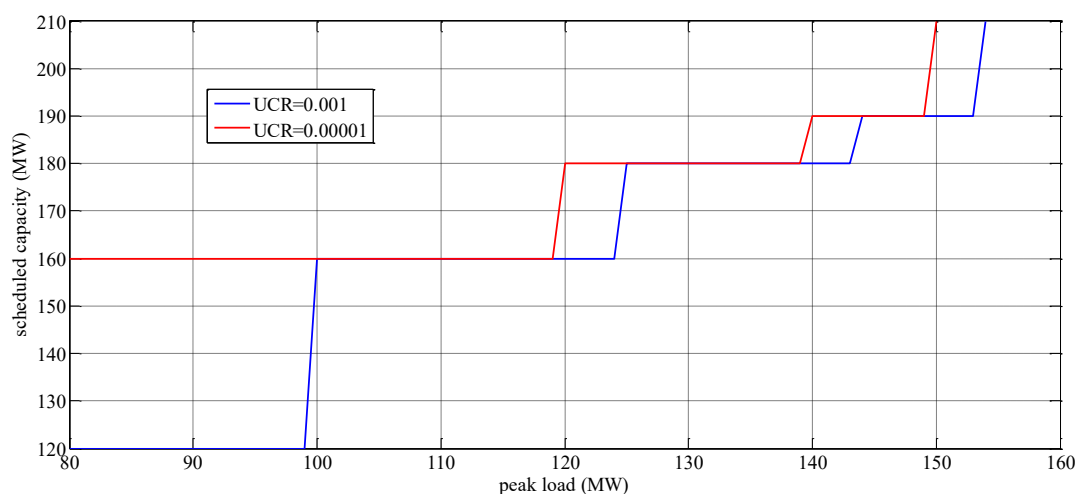
شکل (۱۲): ظرفیت مورد نیاز برای برآورده نمودن محدودیت ریسک برای سیستم تست روی بیلینتون

در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) نیز نمودار ذخیره چرخان بر حسب پیک بار برای حالت‌های شامل سیستم تست روی بیلینتون، سیستم تست روی بیلینتون به همراه نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی با انرژی تابشی خورشید زیاد در شروع مطالعه و سیستم تست روی بیلینتون همراه با نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی با انرژی تابشی خورشید کم در شروع مطالعه در زمان عملکرد ۴ ساعت رسم شده است. در این نمودارها ذخیره چرخان به صورت تفاوت ظرفیت نیروگاه‌های سنکرون در مدار و پیک بار از نمودارهای (۱۲) تا (۱۴) به دست آورده شده است. همان گونه که در این شکل‌ها فوق مشاهده می‌شود رسیدن به محدودیت ریسک بهره‌برداری کمتر مستلزم این است که میزان ذخیره چرخان موجود در سیستم افزایش

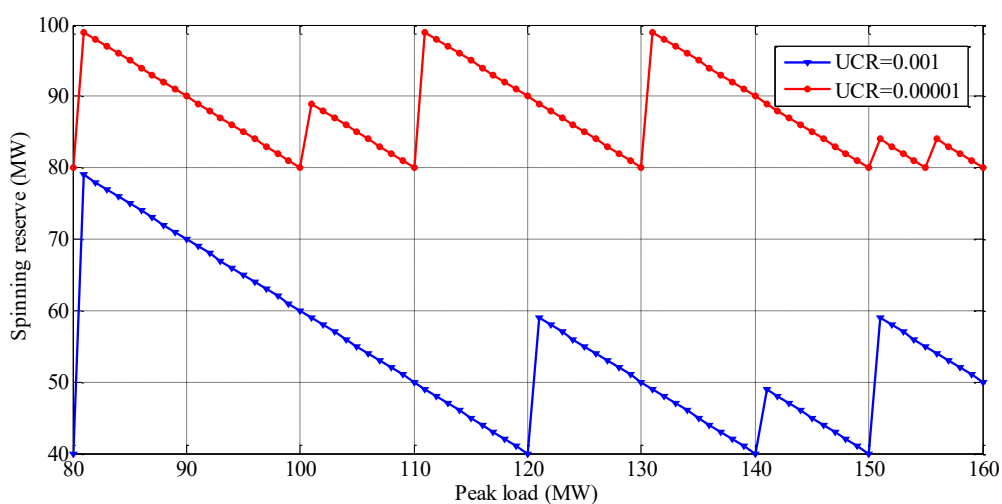
یابد که این امر هزینه بهره‌برداری بیشتری را طلب می‌کند. به علاوه مشاهده می‌شود که با حضور نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی میزان ذخیره مورد نیاز کاهش می‌یابد. به دلیل گسسته بودن ظرفیت‌های تولید مشاهده می‌شود که برای برآورده نمودن محدودیت خطرپذیری به ظرفیت تولید مشخصی نیاز است که این ظرفیت می‌تواند در یک محدوده از بارها جوابگو باشد. لذا ملاحظه می‌شود که ذخیره چرخان در این محدوده‌ها با زیاد شدن بار روند کاهشی دارد. اما به ازای هر کدام از خطرپذیری‌ها یک مینیمم ذخیره چرخان وجود دارد که در شکل‌ها مشخص است. در جدول (۳) میزان پیک باری را که ۴ حالت بیان شده می‌توانند تأمین کنند به این شرط که مقدار خطرپذیری از 0.000001 بیشتر نشود در زمان عملکرد ۱ و ۴ ساعت نشان شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است اضافه کردن نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی پیک بار قابل تغذیه سیستم را افزایش می‌دهد. در جدول (۴) مقدار افزایش مجاز در پیک بار با اضافه کردن نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی به شرط این‌که مقدار خطرپذیری از 0.000001 بیشتر نشود، در دو زمان عملکرد ۱ و ۴ ساعت آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی می‌توان پیک بار را افزایش داد.



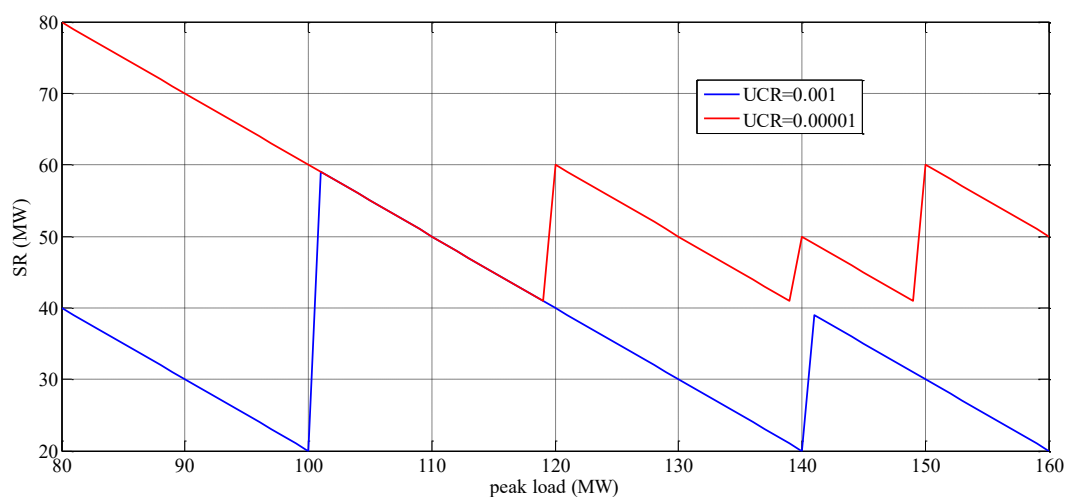
شکل (۱۳): ظرفیت مورد نیاز برای برآورده نمودن ریسک سیستم روی بیلینتون همراه با نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی با انرژی تابشی خورشید اولیه بالا



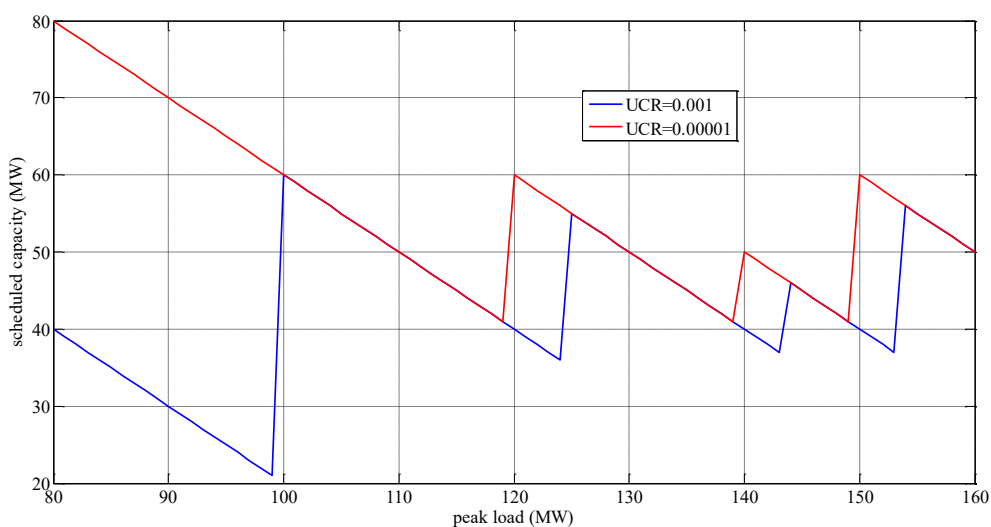
شکل (۱۴): ظرفیت مورد نیاز برای برآورده نمودن ریسک سیستم تست روی بیلینتون همراه با نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی با انرژی تابشی خورشید اولیه کم



شکل (۱۵): نمودار ذخیره چرخان بر حسب اوج بار برای سیستم تست روی بیلینتون تنها



شکل (۱۶): نمودار ذخیره چرخان بر حسب اوج بار برای سیستم تست روی بیلینتون همراه با نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی با انرژی تابشی اولیه زیاد



شکل (۱۷): نمودار ذخیره چرخان بر حسب اوج بار برای سیستم تست روی بیلینتون همراه با نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی با انرژی تابشی اولیه کم

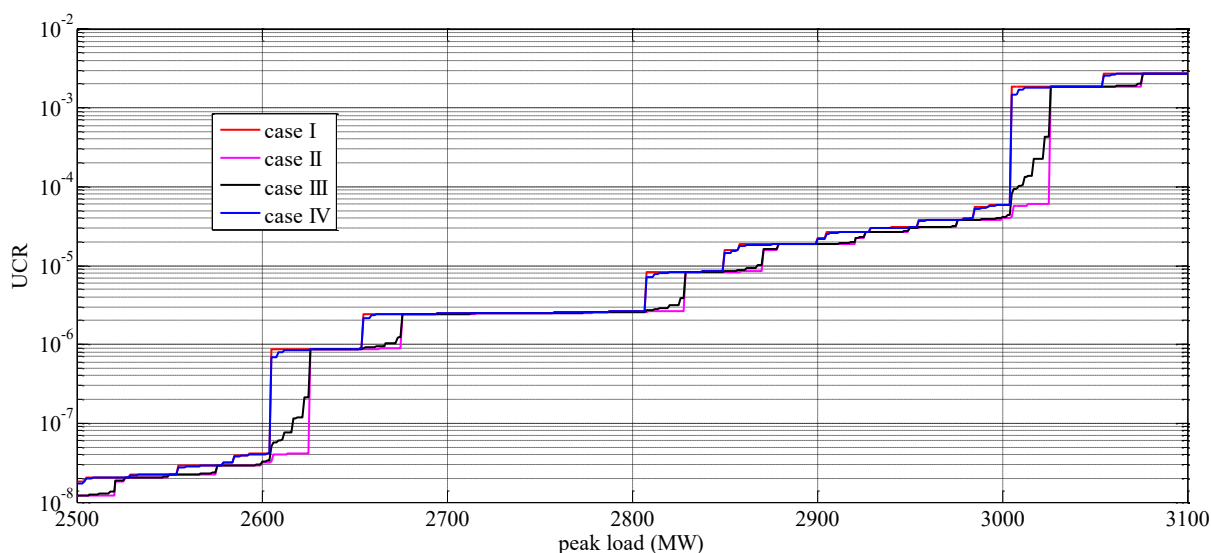
جدول (۳): میزان پیک بار قابل تغذیه (مگاوات) در ۴ حالت به ازای خطرپذیری ۰/۰۰۰۰۰۵

زمان عملکرد	۱ ساعت	۴ ساعت
حالت اول	۱۹۴	۱۹۴
حالت دوم	۲۱۹	۲۰۹
حالت سوم	۲۰۸	۲۰۸
حالت چهارم	۲۰۳	۲۰۸

جدول (۴): قابلیت افزایش پیک بار (مگاوات) با اضافه شدن واحد جدید به ازای برآورده شدن خطرپذیری ۰/۰۰۰۰۰۵

زمان عملکرد	۱ ساعت	۴ ساعت
حالت دوم	۲۵	۱۵
حالت سوم	۱۴	۱۴
حالت چهارم	۹	۱۴

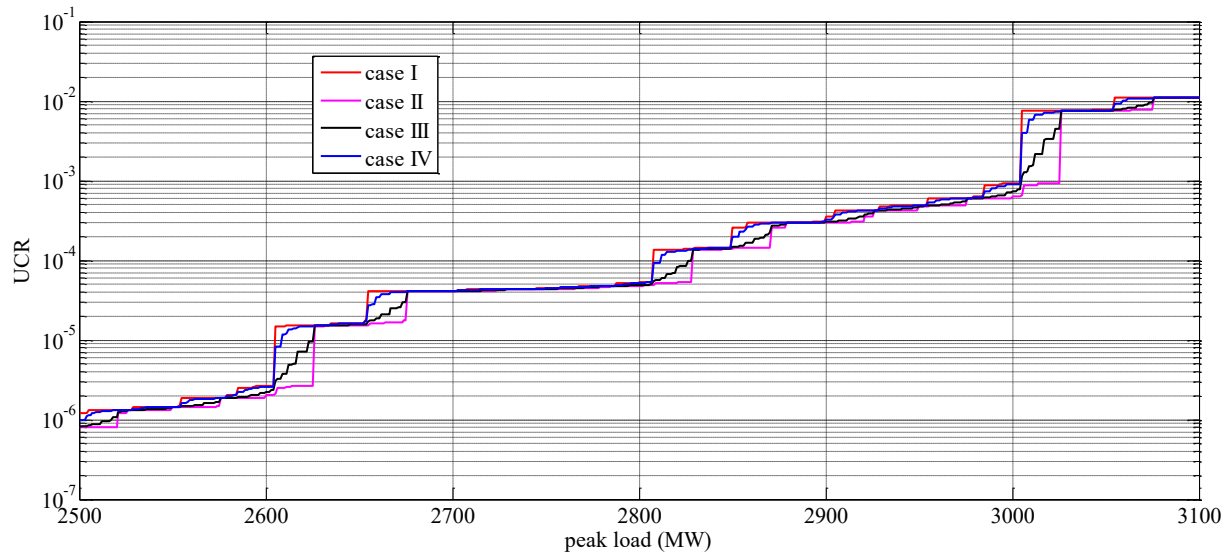
سیستم تست IEEE یک شبکه قدرت نسبتاً بزرگ بوده و در این بخش از مقاله تأثیر نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی بر شاخص‌های بهره‌برداری این سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور انجام مطالعات بهره‌برداری در حضور نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی، در این قسمت نیز ۴ حالت در نظر گرفته می‌شود: حالت اول همان سیستم تست IEEE بدون اضافه کردن واحد جدید بوده، در حالت دوم یک واحد متعارف سنتی ۳۰ مگاواتی با نرخ خرابی ۵ بار در سال، در حالت سوم یک نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی ۳۰ مگاواتی با مشخصات بیان شده در قبل در شرایط تولید حداکثر توان به دلیل بالا بودن انرژی تابشی خورشید در شروع مطالعه و در حالت چهارم نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی ۳۰ مگاواتی در شرایط تابش خورشید کم و تولید حداقل توان در شروع مطالعه به این سیستم اضافه می‌شود.



شکل (۱۸): نمودار خطرپذیری - اوج بار در زمان ۱ ساعت به ازای ۴ حالت بیان شده

در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نمودار ریسک بر حسب پیک بار برای این ۴ حالت و در زمان‌های مطالعه ۱ و ۴ ساعت آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است اضافه شدن نیروگاه‌های متعارف سنتی و خورشیدی کلکتور سهموی سبب کاهش ریسک بهره‌برداری سیستم می‌شود. اما به دلیل عدم قطعیت موجود در نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی که سبب می‌شود این نیروگاه‌ها در بیشتر اوقات توانی کمتر از مقدار نامی را تولید کنند به نسبت واحدهای متعارف سنتی تأثیر

کمتری در کاهش ریسک بهره‌برداری سیستم قدرت دارند. به علاوه در شرایط کم بودن انرژی تابشی خورشید در شروع مطالعه، تأثیر این نیروگاه‌ها در کاهش ریسک بهره‌برداری کمتر از زمانی است که این نیروگاه‌ها به دلیل بالا بودن انرژی تابشی خورشید قادرند توان بیشتری را در شروع مطالعه به شبکه تزریق کنند.



شکل (۱۹): نمودار خطرپذیری - اوج بار به ازای در ۴ حالت بیان شده در زمان ۴ ساعت

در جدول (۵) میزان پیک باری را که سیستم تست IEEE (حالت اول) و همچنین در شرایطی که به ترتیب نیروگاه‌های متعارف سنتی، نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی با انرژی تابشی خورشید زیاد در شروع مطالعه و نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی با انرژی تابشی خورشید کم در شروع مطالعه به سیستم تست IEEE اضافه شوند (حالت‌های دوم تا چهارم) می‌توانند تأمین کنند به این شرط که مقدار خطرپذیری از 0.000005 بیشتر نشود در زمان عملکرد ۱ و ۴ ساعت نشان شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است اضافه کردن نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی پیک بار قابل تغذیه سیستم را افزایش می‌دهد. در جدول ۶ نیز مقدار افزایش مجاز در پیک بار با اضافه کردن نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی به شرط این که مقدار خطرپذیری از 0.000005 بیشتر نشود، در دو زمان عملکرد ۱ و ۴ ساعت آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول نیز مشاهده می‌شود با افزایش نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی می‌توان پیک بار را افزایش داد.

جدول (۵): میزان پیک بار قابل تغذیه (مگاوات) به ازای خطرپذیری 0.000005

زمان عملکرد	۱ ساعت	۴ ساعت
حالت اول	۲۸۰۷	۲۶۱۳
حالت دوم	۲۸۳۷	۲۶۳۴
حالت سوم	۲۸۳۷	۲۶۲۵
حالت چهارم	۲۸۱۶	۲۶۱۷

جدول (۶): قابلیت افزایش پیک بار (مگاوات) به ازای برآورده شدن خطرپذیری 0.000005

زمان عملکرد	۱ ساعت	۴ ساعت
حالت دوم	۳۰	۳۰
حالت سوم	۳۰	۲۱
حالت چهارم	۰	۱۳

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه خورشیدی مجهز به کلکتورهای سهموی خطی انجام شده است. در ابتدا مشخصات و اجزای تشکیل دهنده نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه مطالعات بهره‌برداری سیستم قدرت به منظور تعیین میزان رزرو چرخان مورد نیاز انجام شد. به منظور تعیین میزان رزرو چرخان در این مقاله از معیار ریسک بهره‌برداری سیستم قدرت استفاده شد. به منظور تعیین میزان ریسک بهره‌برداری شبکه قدرت نیز از روش PJM استفاده شد. در این روش نیروگاه‌های متعارف سنتی با دو حالت سالم و خراب مدل شده‌اند و احتمال خرابی آن‌ها در زمان بهره‌برداری از طریق نرخ جایگزینی خروجی به دست آورده می‌شود. سپس مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی به دست آورده شد. در مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها هم خرابی اجزای تشکیل دهنده در نظر گرفته شد و هم تغییرات توان تولیدی این نیروگاه‌ها که ناشی از تغییرات تابش خورشید بود. به منظور تعیین احتمال حالت-های مختلف در مدل قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی از روش ضرب ماتریسی استفاده شد. به منظور بررسی تاثیر نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی بر مطالعات بهره‌برداری سیستم قدرت از شبیه‌سازی سیستم‌های تست روی بیلینتون و IEEE در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش پیک بار و همچنین زمان مطالعه، ریسک سیستم افزایش می‌یابد. همچنین اضافه شدن نیروگاه جدید سبب کاهش ریسک بهره‌برداری سیستم قدرت می‌شود. به علاوه نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی نسبت به نیروگاه‌های متعارف سنتی تاثیر کمتری بر کاهش ریسک بهره‌برداری دارند. دلیل آن نیز به این خاطر است که توان تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی کلکتور سهموی به دلیل تغییرات تابش خورشید در بیشتر اوقات از توان نامی نیروگاه کمتر است. همچنین میزان تابش خورشید بر میزان ریسک بهره‌برداری مهم است. هر چه میزان تابش خورشید بیشتر باشد نیروگاه خورشیدی کلکتور سهموی تاثیر بیشتری در کاهش ریسک دارد.

تشکر و قدردانی

نویسنده از آقای دکتر امیر قاضی، دانشیار مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز شبیه‌سازی تشکر و قدردانی می‌نماید.

References

مراجع

- [1] K. S. Reddy and C. Ananthasornaraj, "Design, development and performance investigation of solar Parabolic Trough Collector for large-scale solar power plants," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1943–1957, Feb. 2020.
- [2] S. A. Murtuza, H. V. Byregowda, M. M. A. H., and M. Imran, "Experimental and simulation studies of parabolic trough collector design for obtaining solar energy," *Resource-Efficient Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 414–421, Dec. 2017.
- [3] S. Kalogirou, "Parabolic trough collector system for low temperature steam generation: Design and performance characteristics," *Applied Energy*, vol. 55, no. 1, pp. 1–19, Sep. 1996.
- [4] M. Qu, D. H. Archer, and H. Yin, "A Linear Parabolic Trough Solar Collector Performance Model," *ASME 2007 Energy Sustainability Conference*, Jan. 2007.
- [5] H. Panchal, K.K. Sadasivuni, M. Suresh, M. Israr and S. Sengottain, "A concise review on solar still with parabolic trough collector." *International Journal of Ambient Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2021.
- [6] Y. Liao, H. Li, J. Yao, and K. Zhuang, "Operation and control of a grid-connected DFIG-based wind turbine with series grid-side converter during network unbalance," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 1, pp. 228–236, Jan. 2011.
- [7] Y. V. Makarov, C. Loutan, Jian Ma, and P. de Mello, "Operational Impacts of Wind Generation on California Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 1039–1050, May 2009.
- [8] M. H. Alham, M. Elshahed, D. K. Ibrahim, and E. E. D. A. El Zahab, "Optimal operation of power system incorporating wind energy with demand side management," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2017.
- [9] Amir Ghaedi, Khodakhash Nasiriani, and Mehdi Nafar, "Spinning Reserve Scheduling in a Power System Containing OTEC Power Plants," vol. 3, no. 3, pp. 379–391, Jul. 2020.

-
- [10] Mohammad Reza Negahdari, Amir Ghaedi, Mehdi Nafar, and Mohsen Simab, "Optimal operation of basin-based tidal units equipped with hydro-pumps," *The Journal of Engineering*, vol. 2023, no. 2, Jan. 2023.
- [11] A. Ghaedi and H. Gorginpour, "Reliability-based operation studies of wave energy converters using modified PJM approach," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 8, May 2021.
- [12] K. Prabhakar, S. K. Jain, and P. K. Padhy, "Inertia estimation in modern power system: A comprehensive review," *Electric Power Systems Research*, vol. 211, p. 108222, Oct. 2022.
- [13] A. L. Ott, "Experience with PJM market operation, system design, and implementation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 528–534, May 2003.
- [14] H. WANG and M. LIU, "Generalized fuzzy c-means algorithm with improved fuzzy partitions based on local membership and neighbor information," *Journal of Computer Applications*, vol. 33, no. 8, pp. 2355–2358, Nov. 2013.