

Determining the Appropriate Mixture of Renewable Energy Sources in order to Reduce Uncertainty

Amir Ghaedi, *Associate Professor*

Department of Electrical and Computer Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun,
Iran
amir.ghaedi@iau.ac.ir

Received: 20 August 2023

Revised: 22 September 2023

Accepted: 26 September 2023

Abstract:

In recent years, the use of renewable energy sources to produce electricity in the power system has grown a lot. Compared to fossil fuels, these resources do not pollute the environment and there is no concern about their depletion. The problem of renewable energy sources is that their production power is variable due to the changes of these sources. Accordingly, in order to reduce the uncertainty of the production capacity of renewable energy sources, it is tried to use these sources in a combined manner. In this article, a method is introduced to determine the appropriate combination of renewable energy sources in order to reduce the uncertainty of their production power. In this method, the average, standard deviation, and the histogram related to the production power of the hybrid structure are obtained, and based on this, a structure with less uncertainty is determined. The proposed method has been used to determine the appropriate structure of renewable units in Bushehr region.

Keywords: Renewable energy sources, hybrid system, uncertainty, average, standard deviation, histogram of production power.

Corresponding Author: Dr. Amir Ghaedi

Corresponding Author Address: Department of Electrical and Computer Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran.

تعیین ترکیب مناسب منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور کاهش عدم قطعیت

امیر قائدی، دانشیار

گروه برق - واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران
amir.ghaedi@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

چکیده: در سال‌های اخیر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور تولید برق در سیستم قدرت رشد زیادی داشته است. این منابع نسبت به سوخت‌های فسیلی آلودگی محیط زیست نداشته و نگرانی از پایان یافتن آن‌ها وجود ندارد. مشکل منابع انرژی تجدیدپذیر این است که توان تولیدی آن‌ها به دلیل تغییرات این منابع، متغیر می‌باشد. بر همین اساس به منظور کاهش عدم قطعیت توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر، سعی می‌گردد این منابع به صورت ترکیبی استفاده شوند. در این مقاله روشی به منظور تعیین ترکیب مناسب از منابع انرژی تجدیدپذیر جهت کاهش عدم قطعیت توان تولیدی آن‌ها معرفی می‌گردد. در این روش میانگین، انحراف معیار و همچنین هیستوگرام مربوط به توان تولیدی ساختار هیبرید به دست آمده و بر این اساس ساختاری که عدم قطعیت کمتری داشته باشد مشخص می‌گردد. روش پیشنهادی به منظور تعیین ساختار مناسب از واحدهای تجدیدپذیر در منطقه بوشهر مورد استفاده قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم ترکیبی، عدم قطعیت، میانگین، انحراف معیار، هیستوگرام توان تولیدی.

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امیر قائدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: شهرستان داریون - دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر روند استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور تولید برق در سیستم قدرت سرعت گرفته است. نیروگاه‌های متداول سنتی از سوخت‌های فسیلی به منظور تولید برق استفاده می‌کردند. به دلیل مشکلات سوخت‌های فسیلی نظیر تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای، گرم شدن کره زمین، تخریب لایه ازن و ایجاد تغییرات اقلیمی، افزایش ناگهانی قیمت این سوخت‌ها و نگرانی از پایان یافتن منابع سوخت‌های فسیلی، کشورهای مختلف دنیا به سمت جایگزین نمودن این سوخت‌ها با منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر حرکت نموده‌اند. بر همین اساس است که امروزه شاهد نصب و راه‌اندازی نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر توربین‌های بادی، سیستم‌های فتوولتائیک، مبدل‌های انرژی امواج، توربین‌های جزرومدی جریان‌ی، نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی، نیروگاه‌های آبی جریان‌ی و نیروگاه‌های حرارتی اقیانوس در نقاط مختلف دنیا هستیم. علی‌رغم مزایای متعددی که منابع انرژی تجدیدپذیر دارد، مشکل اصلی این منابع عدم قطعیت توان تولیدی آن‌هاست. توان تولیدی نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک، جزرومدی مخزنی، جزرومدی جریان‌ی، امواج، آبی جریان‌ی و حرارتی اقیانوس به دلیل تغییر سرعت باد، تابش خورشید، ارتفاع جزرومد، سرعت جریان‌های جزرومدی، ارتفاع و دوره تناوب امواج، دبی آب رودخانه و دمای سطح اقیانوس تغییر می‌کند. همین عدم قطعیت توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر بر جنبه‌های مختلف سیستم قدرت که سهم قابل توجهی از تولیدات آن را منابع انرژی تجدیدپذیر تشکیل داده است تأثیر می‌گذارد. تاکنون در زمینه بررسی تأثیر منابع انرژی تجدیدپذیر بر جنبه‌های مختلف سیستم قدرت و کاهش عدم قطعیت توان تولیدی این سیستم تحقیقات زیادی انجام شده است. در [۱] برنامه‌ریزی بهینه نیروگاه جزرومدی مخزنی با در نظر گرفتن اثر هیدرو پمپ انجام شده است. در این مقاله به منظور کاهش عدم قطعیت توان تولیدی نیروگاه جزرومدی از هیدروپمپ استفاده شده است. در [۲] تأثیر استفاده از باتری وانادیوم ریداکس بر قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی جریان‌ی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله باتری‌های وانادیوم ریداکس با ظرفیت بالا و قابل نصب در سیستم انتقال در نظر گرفته شده‌اند. مقاله [۳] اثر تغییرات سرعت باد، تابش خورشید، سرعت جریان‌های جزرومدی و دمای محیط بر نرخ خرابی و قابلیت اطمینان ریزشک‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین بادی، توربین جزرومدی جریان‌ی و سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته شده است. مقاله [۴] تأثیر نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی بر مطالعات برنامه‌ریزی ریزشک‌های شامل این نیروگاه‌ها را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله، به دلیل عدم قطعیت نیروگاه جزرومدی مخزنی و نیروگاه فتوولتائیک، از باتری ذخیره انرژی جهت کاهش عدم قطعیت توان تولیدی ریزشک‌ها استفاده شده است. در [۵] تأثیر تغییرات سرعت باد بر قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این نیروگاه‌ها از تکنولوژی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده و اثر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی تجهیزات مختلف تشکیل دهنده این نیروگاه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاله [۶] میزان رزرو چرخان مورد نیاز یک سیستم قدرت با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید را به دست آورده است. روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته مبتنی بر ریسک انتخاب واحد سیستم قدرت بوده و به دلیل عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید، میزان رزرو چرخان مورد نیاز شبکه افزایش یافته است. در [۷] تأثیر مبدل‌های انرژی امواج بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله از تکنولوژی ژنراتورهای شیار مخروطی در مبدل انرژی امواج استفاده شده و به دلیل تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان تولیدی این نیروگاه‌ها در طول زمان تغییر کرده است. بر همین اساس در مدل قابلیت اطمینان به دست آمده برای مبدل انرژی امواج بیش از دو حالت وجود دارد. در [۸] قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله اثر تغییر ارتفاع جزرومد بر نرخ خرابی تجهیزات مختلف تشکیل دهنده این نیروگاه‌ها از جمله توربین، ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، ترانسفورماتور و کابل مورد بررسی قرار گرفته است. در [۹، ۱۰] تأثیر نیروگاه‌های حرارتی اقیانوس بر مطالعات قابلیت اطمینان و بهره‌برداری سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله اثر تغییر دمای سطح اقیانوس بر توان تولیدی نیروگاه‌های حرارتی اقیانوس از نوع سیکل بسته مورد بررسی قرار گرفته است. مقاله [۱۱] قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های جزرومدی نوع جریان‌ی را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع جریان‌ی به دلیل تغییرات سرعت جریان‌های جزرومدی متغیر در نظر گرفته شده

و تاثیر این عدم قطعیت بر مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها لحاظ شده است. مقاله [۱۲] اثر تغییر ارتفاع جزرومد بر توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی در نظر گرفته شده و میزان رزرو چرخان مورد نیاز سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها مطالعه شده است. در این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی در نظر گرفته شده و احتمال حالت‌های مختلف این مدل در زمان بهره‌برداری به کمک روش ضرب ماتریسی تعیین شده است. در [۱۳] مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی با در نظر گرفتن اثر خرابی اجزا و تغییر توان تولیدی این نیروگاه‌ها که دلیل آن تغییر ارتفاع جزرومد است، به دست آمده است. سپس از مدل چند حالتی به دست آمده به منظور تعیین شاخص‌های کفایت سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها استفاده شده است. در مقاله [۱۴] تاثیر استفاده از باتری‌های با ظرفیت بالا در بهبود قابلیت اطمینان شبکه قدرت با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر مورد مطالعه قرار گرفته است. روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته روش تحلیلی بوده و بر اساس روش جدول خروج ظرفیت‌ها، شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت به دست آورده شده است. در [۱۵] قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های آبی جریان‌ی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای نیروگاه‌های آبی جریان‌ی به دست آمده که هم خرابی اجزای تشکیل‌دهنده را در نظر گرفته است و هم عدم قطعیت مربوط به تغییرات توان تولیدی این نیروگاه‌ها که ناشی از تغییر دبی آب رودخانه می‌باشد. مقاله [۱۶] قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های فتوولتاییک را مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله نیز یک مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای مزارع فتوولتاییک با در نظر گرفتن اثر خرابی اجزا و عدم قطعیت توان تولیدی این نیروگاه‌ها که ناشی از تغییر تابش خورشید می‌باشد به دست آورده شده است. در [۱۷] مطالعات کفایت سیستم قدرت با در نظر گرفتن مزارع بادی در سطح تولید انجام شده است. نیروگاه بادی که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته و مدل قابلیت اطمینان آن به دست آورده شده است مبتنی بر تکنولوژی ژنراتور القایی دو سو تغذیه بوده است.

با توجه به مقالات مرور شده نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت می‌باشند؛ چرا که توان تولیدی این نیروگاه‌ها به دلیل تغییر کمیت‌های تجدیدپذیر نظیر سرعت باد، تابش خورشید، ارتفاع جزرومد، سرعت جریان‌های جزرومدی، ارتفاع و دوره تناوب امواج، دبی آب رودخانه و دمای سطح اقیانوس تغییر می‌کند. بر همین اساس روش‌هایی نظیر استفاده از این نیروگاه‌ها در شبکه، استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی در کنار این نیروگاه‌ها و استفاده از چند منبع انرژی تجدیدپذیر به صورت هیبرید (ترکیبی) جهت کاهش عدم قطعیت این منابع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله به منظور کاهش عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر، ساختار ترکیبی آن‌ها پیشنهاد شده است و به منظور تعیین ساختار هیبرید مناسب شاخص‌های عدم قطعیت میکانگین و انحراف معیار توان تولیدی سیستم محاسبه شده است. همچنین هیستوگرام توان تولیدی سیستم هیبرید تعیین شده و بر این اساس ترکیبی مناسب از منابع انرژی تجدیدپذیر به دست آمده است. با توجه به اهدافی که این مقاله دنبال می‌کند ساختار آن به صورت زیر خواهد بود:

در بخش دوم منابع انرژی مختلف شامل توربین بادی، سیستم فتوولتاییک، نیروگاه جزرومدی مخزنی و جریان‌ی، مبدل انرژی امواج، نیروگاه آبی جریان‌ی و نیروگاه حرارتی اقیانوس مطالعه شده است. در بخش سوم روش تعیین سیستم هیبرید مناسب تشریح شده و در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری تحقیق اختصاص یافته است.

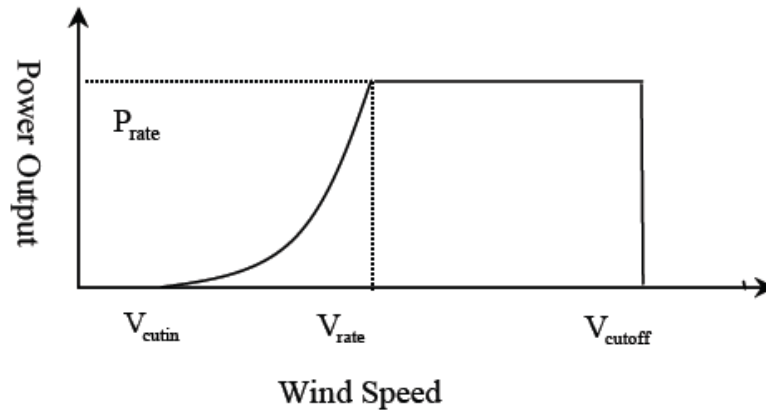
۲- منابع انرژی تجدیدپذیر

در این بخش از تحقیق منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر که در سیستم قدرت به منظور تولید برق استفاده می‌شوند معرفی می‌گردد. این منابع شامل توربین‌های بادی، سیستم فتوولتاییک، نیروگاه جزرومدی مخزنی، نیروگاه جزرومدی جریان‌ی، مبدل انرژی امواج، نیروگاه آبی جریان‌ی و نیروگاه حرارتی اقیانوس می‌باشد.

۲-۱- نیروگاه بادی

در توربین‌های بادی، انرژی جنبشی توده متحرک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. میزان توان تولیدی نیروگاه بادی به سرعت وزش باد بستگی دارد. رابطه بین توان تولیدی نیروگاه بادی و سرعت باد بر اساس منحنی توان توربین بیان می‌شود. در

شکل (۱)، منحنی توان یک نمونه توربین بادی نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است به ازای سرعت‌های باد کمتر از سرعت قطع پایین، توان تولیدی توربین بادی صفر است. به ازای سرعت‌های بین سرعت قطع پایین و سرعت نامی، توان تولیدی توربین بادی متناسب با توان سوم سرعت باد می‌باشد. به ازای سرعت‌های باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا، توان تولیدی توربین بادی ثابت و برابر با توان نامی توربین بادی خواهد بود. در سرعت‌های بیشتر از سرعت قطع بالا نیز توان تولیدی واحد بادی صفر می‌باشد؛ زیرا این سرعت‌ها برای توربین بادی خطرناک بوده و ممکن است به توربین آسیب بزند و به همین خاطر در این سرعت‌ها توربین متوقف می‌شود.



شکل (۱): منحنی توان توربین بادی

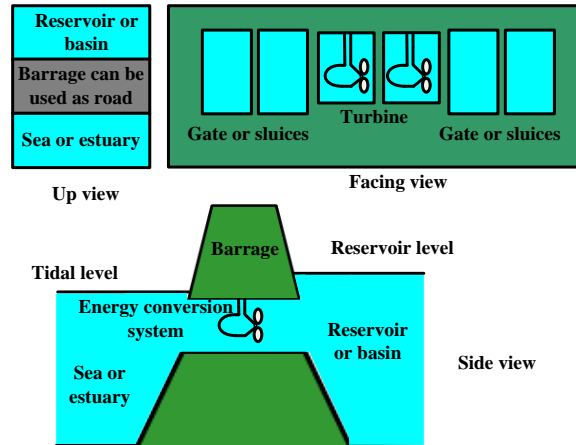
در شکل (۱)، V_{cutin} ، V_{rate} ، V_{cutoff} و P_{rate} به ترتیب معرف سرعت قطع پایین، سرعت نامی، سرعت قطع بالا و توان نامی توربین بادی می‌باشند. با داشتن داده‌های سرعت باد در یک منطقه و منحنی توان توربین، می‌توان توان تولیدی نیروگاه بادی را به دست آورد.

۲-۲- سیستم فتوولتاییک

یک سلول فتوولتاییک در واقع یک پیوند p-n می‌باشد که تابش خورشید را به انرژی الکتریکی جریان مستقیم تبدیل می‌کند. به دلیل پایین بودن ولتاژ و جریان تولیدی سلول فتوولتاییک، در یک پنل فتوولتاییک تعداد مشخصی از این سلول‌ها به صورت سری و موازی قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه توان تولیدی پنل فتوولتاییک به نقطه کار پنل بستگی دارد به کمک یک مبدل الکترونیک قدرت DC به DC که مبدل دنبال کننده توان ماکزیمم نام دارد، پنل فتوولتاییک حداکثر توان ممکن را تولید می‌کند. سپس توسط یک اینورتر، توان تولیدی سیستم فتوولتاییک به AC تبدیل می‌شود. توان تولیدی سیستم فتوولتاییک به شدت تابش خورشید، مساحت پنل‌های فتوولتاییک، بازده تجهیزات مختلف سیستم فتوولتاییک شامل پنل‌های خورشیدی، مبدل الکترونیک قدرت، سیم و اتصالات بستگی دارد. با توجه به تغییر تابش خورشید در طول روز، ماه و همچنین فصل‌های مختلف سال، توان تولیدی نیروگاه فتوولتاییک تغییر می‌کند. بنابراین با داشتن داده‌های تابش خورشید و مشخصات نیروگاه، می‌توان توان تولیدی سیستم فتوولتاییک را محاسبه نمود.

۲-۳- نیروگاه جزرومدی مخزنی

جزرومد در نتیجه نیروی گرانش بین ماه و تا حدی خورشید بر آب‌های سطحی زمین ایجاد می‌شود. در نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی یک سد بین دریا و مخزن ذخیره آب احداث می‌ود و در دیواره این سد دریچه‌هایی تعبیه می‌شود که این دریچه‌ها اجازه عبور آب بین دریا و مخزن را در نتیجه بروز جزرومد و تغییر ارتفاع آب می‌دهند. در این دریچه‌ها توربین نیز قرار داده شده که در نتیجه عبور آب از این توربین‌ها برق تولید می‌شود. در شکل (۲) ساختار یک نیروگاه جزرومدی مخزنی نشان داده شده است.



شکل (۲): ساختار نیروگاه جزرومدی مخزنی

نیروگاه جزرومدی مخزنی می‌تواند در مودهای مختلف تولید در جزر، تولید در مد و تولید دو طرفه کار کند. در مود تولید در جزر، با بروز مد آب دریا بالا آمده و با عبور از دریچه‌های فاقد توربین، مخزن را پر می‌کند. در هنگام بروز جزر، آب دریا پایین می‌آید و آب ذخیره شده در مخزن آزاد می‌گردد. لذا آب ضمن تخلیه مخزن، با عبور از دریچه‌های دارای توربین برق تولید می‌کند. در مود تولید در مد، آب دریا در هنگام مد با عبور از دریچه‌های مجهز به توربین، ضمن پر کردن مخزن ذخیره آب، برق نیز تولید می‌کند. در هنگام جزر، آب دریا پایین آمده و آب واقع در مخزن رها می‌شود تا با عبور از دریچه‌های فاقد توربین، مخزن را تخلیه کند. در تولید دو طرفه نیز هم در هنگام بروز مد و پر کردن مخزن و هم در هنگام بروز جزر و تخلیه مخزن، آب از دریچه‌های دارای توربین عبور کرده و در هر دو حالت برق تولید می‌شود. بایستی در این حالت توربین دو طرفه باشد و بتواند در دو حالت برق تولید کند. توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P = \eta_t \eta_g \rho g h_t q_t \quad (1)$$

در رابطه فوق، P توان تولیدی نیروگاه، η_t بازده توربین، η_g بازده ژنراتور، ρ چگالی آب دریا، g شتاب گرانش زمین، h_t اختلاف ارتفاع آب بین مخزن و دریا (هد آب عبوری از توربین) و q_t دبی حجمی آب عبوری از توربین می‌باشد. دبی حجمی آب عبوری از توربین نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$q_t = \frac{\pi \sqrt{g h_t}}{2\sqrt{2}} (d_{tip}^2 - d_{hub}^2) \quad (2)$$

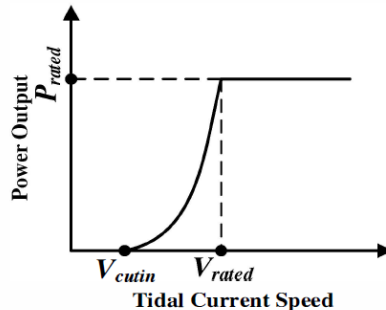
در رابطه فوق، d_{hub} و d_{tip} به ترتیب قطر تیپ و قطر هاب توربین مورد استفاده می‌باشند. بنابراین می‌توان با داشتن داده‌های ارتفاع جزرومد و روابط فوق، توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی را محاسبه نمود.

۴-۲- نیروگاه جزرومدی جریان‌ی

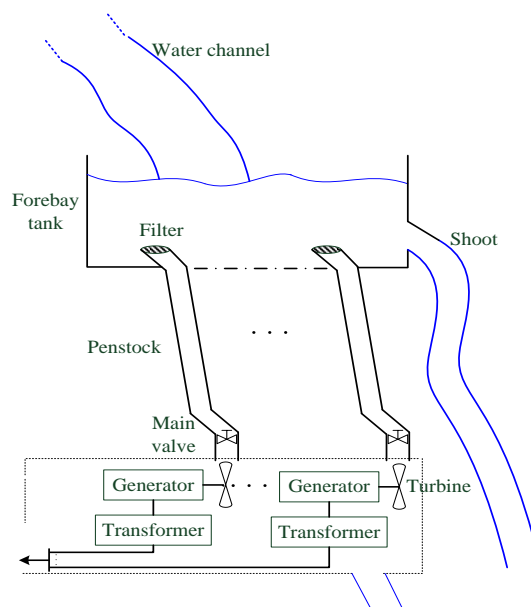
در نیروگاه جزرومدی نوع جریان‌ی، مشابه نیروگاه بادی، به کمک توربین‌های جریان‌ی نصب شده در اعماق دریا برق تولید می‌شود. در این نیروگاه‌ها جریان‌های جزرومدی دارای سرعت و انرژی جنبشی می‌باشند. لذا این جریان‌ها توربین‌های جزرومدی را به چرخش درآورده و برق تولید می‌کنند. رابطه بین توان تولیدی این توربین‌ها و سرعت جریان‌های جزرومدی به کمک منحنی توان توربین بیان می‌گردد. در شکل (۳) منحنی توان توربین‌های جزرومدی نشان داده شده است. این منحنی مشابه منحنی توان توربین‌های بادی بوده با این تفاوت که در توربین‌های جزرومدی جریان‌ی، سرعت جریان‌های جزرومدی کم بوده و به سرعت قطع بالا نمی‌رسد.

۵-۲- نیروگاه آبی جریان‌ی

در شکل (۴) ساختار نیروگاه‌های آبی جریان‌ی نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است از طریق کانال آب، آب‌های واقع در کوهستان به مخزن ذخیره هدایت می‌شوند و از طریق لوله‌های پمپ‌ستاک به توربین منتقل شده و آنجا برق تولید می‌شود. البته یک کانال دیگر نیز به نام شوت یا سرریز وجود دارد که در شرایطی که آب زیادی وارد مخزن می‌گردد از طریق این کانال‌ها تخلیه می‌گردد.



شکل (۳): منحنی توان توربین جزرومدی جریان‌ی

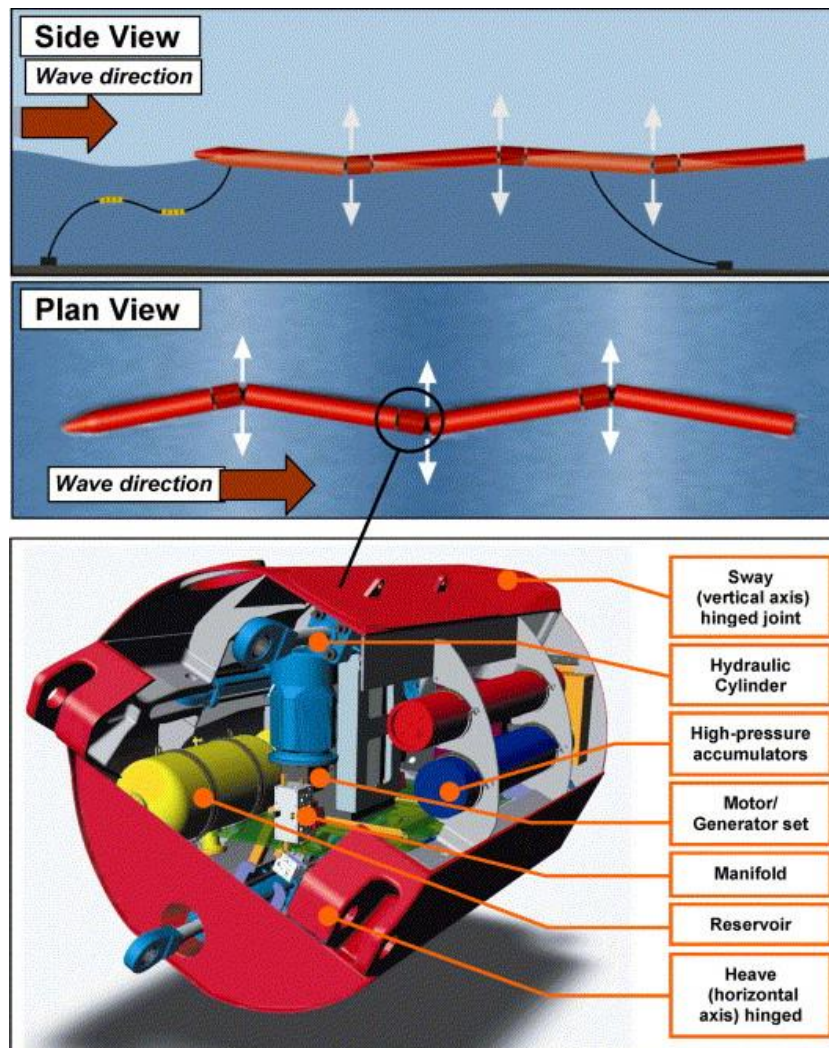


شکل (۴): ساختار نیروگاه آبی جریان‌ی

میزان توان تولیدی این نیروگاه‌ها به دبی آب رودخانه بستگی دارد که از توربین‌ها می‌گذرد. با توجه به اینکه در طول سال، دبی آب رودخانه به دلیل شدت مختلف بارش‌ها و آب شدن برف کوهستان در حال تغییر است توان تولیدی این نیروگاه‌ها نیز در طول سال تغییر می‌کند.

۶-۲- مبدل انرژی امواج

انرژی امواج یک نمونه از انرژی اقیانوس بوده که در مبدل‌های انرژی امواج به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. تاکنون تکنولوژی‌های مختلفی جهت استخراج انرژی الکتریکی از انرژی امواج ساخته شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. برخی از این تکنولوژی‌ها عبارتند از پلامیس، ستون آب نوسانگر، اژدهای موج، ژنراتور شیار مخروطی، لیمپت، تپچان، اردک سلتز، بایو و نوسانگر موج ارشمیدس. در شکل (۵) ساختار پلامیس نشان داده شده است. با برخورد امواج به این تجهیز، لوله‌ها نسبت به هم حرکت کرده و بازوی قرار گرفته در مفصل بین لوله‌ها تغییر طول بازو می‌دهند. بنابراین امکان حرکت روتور در ژنراتور خطی تعبیه شده در این مفصل‌ها وجود دارد و بر اساس آن برق تولید می‌شود.



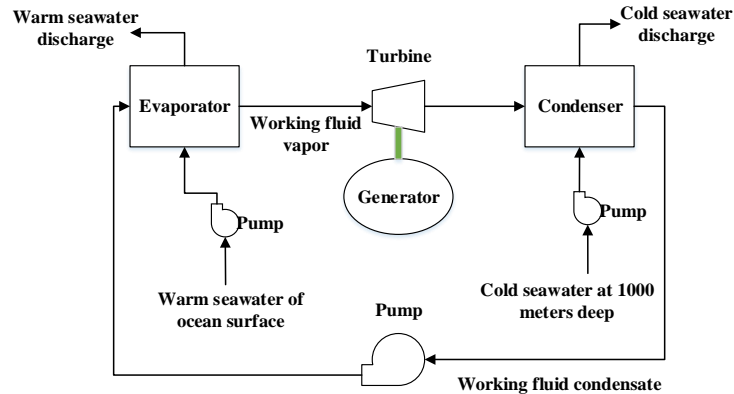
شکل (۵): ساختار پلامیس

توان تولیدی مبدل‌های انرژی امواج به ارتفاع و دوره تناوب موج بستگی دارد. برای هر کدام از مبدل‌های انرژی امواج یک ماتریس توان تعریف می‌شود که بیان می‌کند به ازای ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان تولیدی چقدر خواهد بود. بنابراین با داشتن داده‌های ارتفاع و دوره تناوب امواج در یک منطقه و همچنین ماتریس توان مبدل انرژی امواج، می‌توان توان تولیدی نیروگاه امواج را به دست آورد.

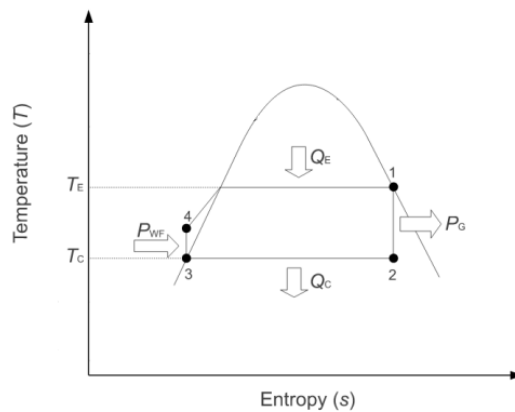
۷-۲- نیروگاه حرارتی اقیانوس

در نیروگاه حرارتی اقیانوس از اختلاف دمای آب‌های واقع در سطح اقیانوس و آب‌های واقع در اعماق اقیانوس به منظور راه‌اندازی یک سیکل ترمودینامیکی استفاده می‌شود تا بتوان یک سیال کاری را به بخار تبدیل کرده و این بخار با عبور از توربین و چرخاندن آن برق تولید می‌کند. در شکل (۶) ساختار یک نیروگاه حرارتی اقیانوس نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۶) مشخص است آب‌های سطحی اقیانوس به عنوان منبع گرما استفاده شده و در یک مبدل انتقال حرارت، سبب تبخیر سیال کاری که ماده با نقطه جوش پایین نظیر آمونیاک می‌باشد، می‌شود. بخار سبب چرخش توربین و تولید برق می‌گردد. سپس آب‌های واقع در اعماق اقیانوس توسط پمپ به سطح زمین آورده شده و به عنوان منبع سرما استفاده می‌شوند تا سبب میعان بخار در یک مبدل انتقال حرارت شوند. سیال کاری مجدداً پمپ شده و به مبدل انتقال حرارت

جهت تبادل حرارت با آب‌های سطحی اقیانوس منتقل می‌شوند. فرایندهای بیان شده به منظور تولید برق در این نیروگاه مبتنی بر سیکل ترمودینامیکی رنکین می‌باشد. نمودار دما - انتروپی مربوط به سیکل ترمودینامیکی رنکین در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۶): نیروگاه حرارتی اقیانوس



شکل (۷): نمودار دما - انتروپی سیکل ترمودینامیکی رنکین

۳- روش تعیین سیستم هیبرید مناسب

با توجه به تغییر کمیت‌های تجدیدپذیر نظیر سرعت باد، تابش خورشید، ارتفاع جزرومد، سرعت جریان‌های جزرومدی، ارتفاع و دوره تناوب امواج، دبی آب رودخانه و دمای سطح اقیانوس، توان تولیدی نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک، جزرومدی مخزنی، جزرومدی جریانی، مبدل انرژی امواج، آبی جریانی و حرارتی اقیانوس در طول زمان تغییر می‌کند. بنابراین این نیروگاه‌ها به تنهایی نمی‌توانند بار مورد نیاز را تامین کنند. به همین خاطر در این مقاله، پیشنهاد شده است سیستم ترکیبی که متشکل از دو یا چند نیروگاه تجدیدپذیر است به منظور تامین بار مورد نیاز استفاده شود. برای تعیین سیستم ترکیبی مناسب متشکل از نیروگاه‌های تجدیدپذیر روش زیر پیشنهاد می‌گردد:

مرحله اول- بر اساس داده‌های یک سال منابع انرژی تجدیدپذیر، توان تولیدی سیستم هیبرید در هر ساعت از سال محاسبه گردد.

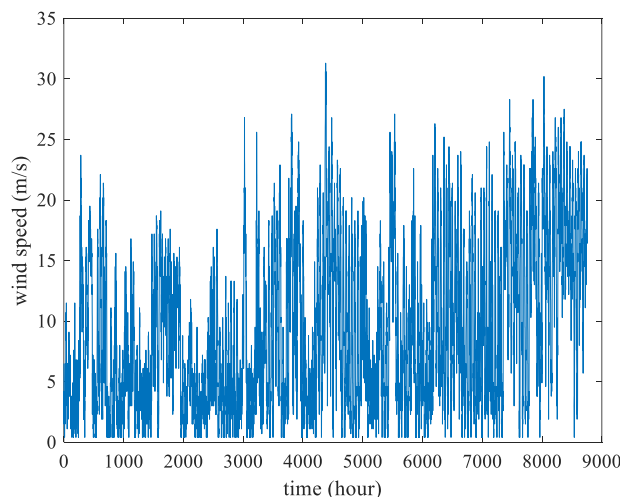
مرحله دوم- مقدار میانگین توان تولیدی سیستم هیبرید و انحراف معیار آن محاسبه گردد. هر چه مقدار میانگین بیشتر و مقدار انحراف معیار کمتر باشد، نشان‌دهنده این است که پتانسیل سیستم هیبرید بیشتر و عدم قطعیت آن کمتر می‌باشد.

مرحله سوم- هیستوگرام توان تولیدی سیستم هیبرید تعیین گردد. هر چه تنوع توان‌های تولیدی سیستم هیبرید کمتر بوده و احتمال بروز توان‌های در محدوده کوچکی بیشتر باشد، سیستم هیبرید مناسب‌تر است.

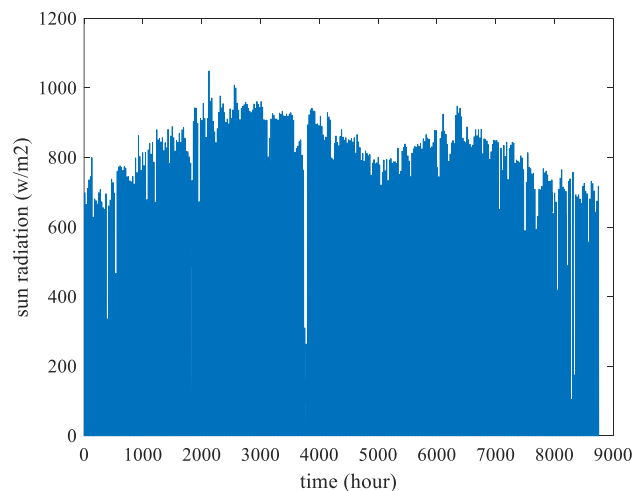
۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش از مقاله در منطقه بوشهر که در جنوب ایران واقع شده است یک سیستم هیبرید مناسب انتخاب می‌گردد. با توجه به پتانسیل این منطقه ۴ نیروگاه تجدیدپذیر بادی، فتوولتاییک، جزرומدی مخزنی و جزرומدی جریان‌ی مورد مطالعه قرار گرفته است. از داده‌های ساعت به ساعت سرعت باد، تابش خورشید، ارتفاع جزر و مد و سرعت جریان‌های جزر و مدی در طول یک سال جهت انجام شبیه‌سازی بهره گرفته شده است. در شکل‌های (۸) تا (۱۱) به ترتیب داده‌های ساعت به ساعت سرعت باد، تابش خورشید، ارتفاع جزر و مد و سرعت جریان‌های جزر و مدی نشان داده شده است. چهار نیروگاه ۱ مگاواتی بادی، فتوولتاییک، جزر و مدی مخزنی و جزر و مدی جریان‌ی نیز در نظر گرفته شده و بر اساس داده‌های ساعت به ساعت سرعت باد، تابش خورشید، ارتفاع جزر و مد و سرعت جریان‌های جزر و مدی توان ساعت به ساعت این نیروگاه‌ها محاسبه و در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده است.

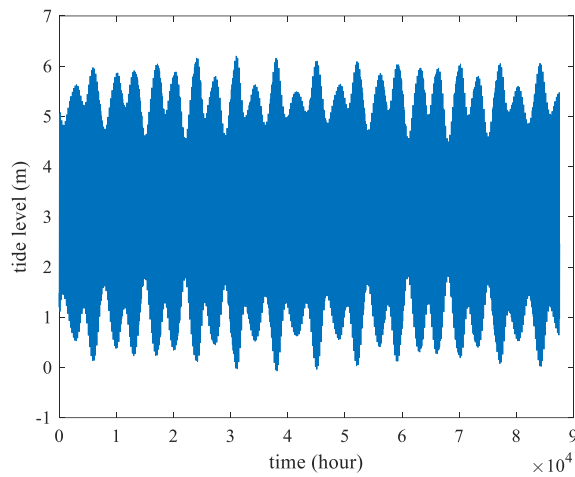
در این قسمت از تحقیق ۱۰ حالت برای سیستم هیبرید در نظر گرفته شده است: حالت اول دو نیروگاه بادی، حالت دوم دو نیروگاه فتوولتاییک، حالت سوم دو نیروگاه جزر و مدی مخزنی، حالت چهارم دو نیروگاه جزر و مدی جریان‌ی، حالت پنجم یک نیروگاه بادی و یک نیروگاه فتوولتاییک، حالت ششم یک نیروگاه بادی و یک نیروگاه جزر و مدی مخزنی، حالت هفتم یک نیروگاه بادی و یک نیروگاه جزر و مدی جریان‌ی، حالت هشتم یک نیروگاه فتوولتاییک و یک نیروگاه جزر و مدی مخزنی، حالت نهم یک نیروگاه فتوولتاییک و یک نیروگاه جزر و مدی جریان‌ی و حالت دهم یک نیروگاه جزر و مدی مخزنی و یک نیروگاه جزر و مدی جریان‌ی در سیستم هیبرید در نظر گرفته شده‌اند.



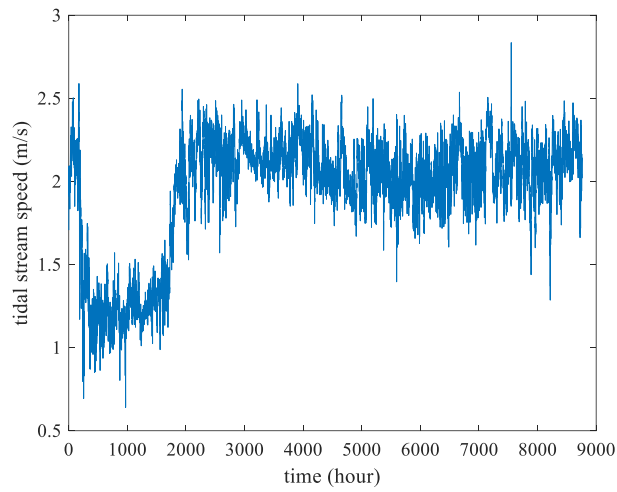
شکل (۸): سرعت ساعت به ساعت باد



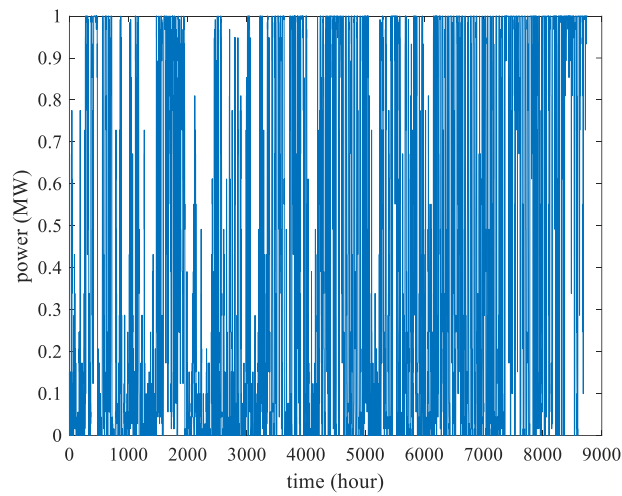
شکل (۹): تابش ساعت به ساعت خورشید



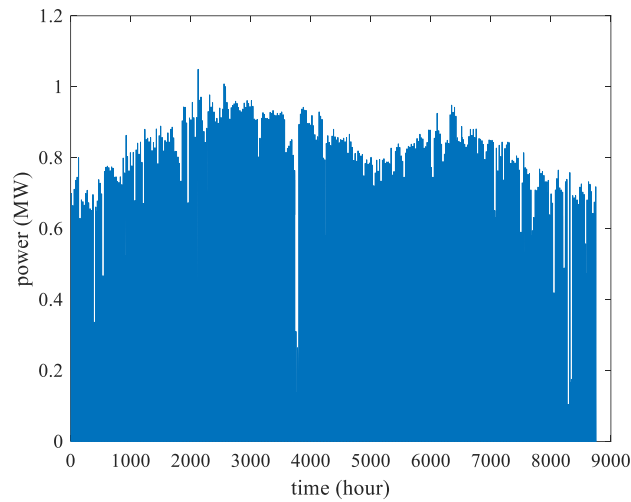
شکل (۱۰): ارتفاع ساعت به ساعت جزر و مد



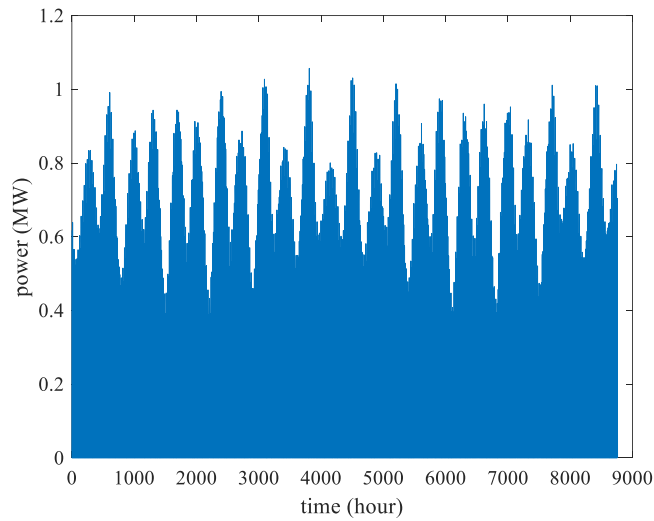
شکل (۱۱): سرعت ساعت به ساعت جریان های جزر و مدی



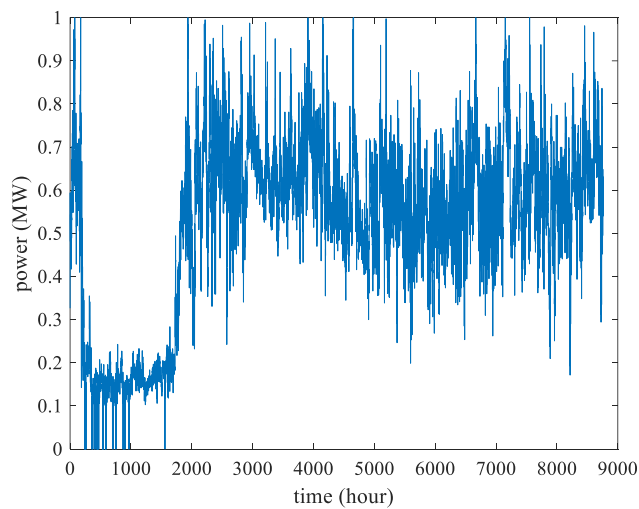
شکل (۱۲): توان ساعت به ساعت نیروگاه بادی



شکل (۱۳): توان ساعت به ساعت سیستم فتوولتائیک



شکل (۱۴): توان ساعت به ساعت نیروگاه جزرومدی مخزنی

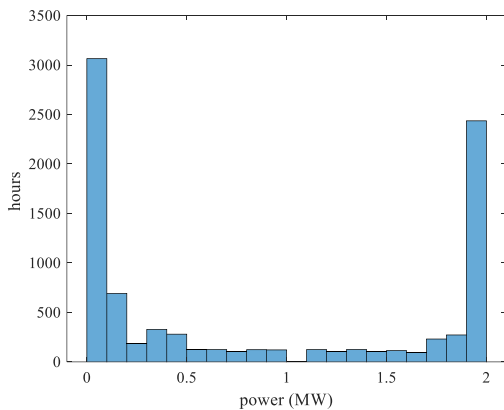


شکل (۱۵): توان ساعت به ساعت نیروگاه جزرومدی جریان

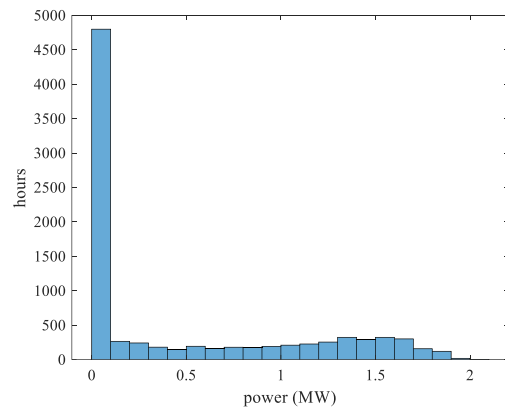
در جدول (۱) برای هر کدام از این حالت‌ها مقدار میانگین و انحراف معیار توان تولیدی ساعت به ساعت در طول یک سال و همچنین انرژی تولیدی سالانه به دست آورده شده است. در شکل (۱۶) نیز هیستوگرام توان تولیدی مربوط به این ۱۰ حالت نشان داده شده است.

جدول (۱): میانگین و انحراف معیار توان تولیدی ۱۰ حالت

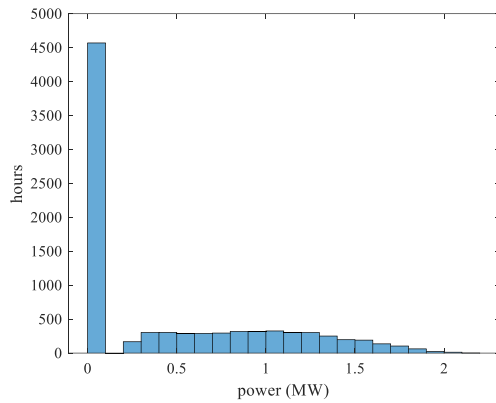
حالت‌های مختلف	میانگین (مگاوات)	انحراف معیار (مگاوات)	انرژی سالانه (گیگاوات ساعت)
۱	۰/۸۶۷۷	۰/۸۶۵۱	۷/۶۰۰۶
۲	۰/۴۷۲۰	۰/۶۱۹۹	۴/۱۱۹۲
۳	۰/۴۵۷۷	۰/۵۶۲۸	۴/۰۰۹۱
۴	۱/۰۳۶۵	۰/۳۹۹۶	۹/۰۷۹۴
۵	۰/۶۶۸۹	۰/۵۲۸۷	۵/۸۵۹۹
۶	۰/۶۶۲۷	۰/۵۱۸۲	۵/۸۰۴۹
۷	۰/۹۵۲۱	۰/۴۹۰۵	۸/۳۴۰۰
۸	۰/۴۶۳۹	۰/۴۱۰۸	۴/۰۶۴۲
۹	۰/۷۵۳۳	۰/۳۷۶۱	۶/۵۹۹۳
۱۰	۰/۷۴۷۱	۰/۳۴۵۲	۶/۵۴۴۳



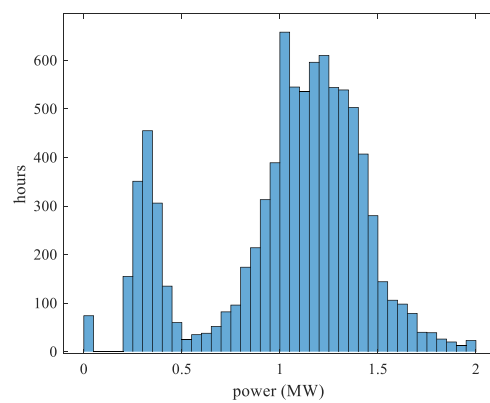
حالت اول



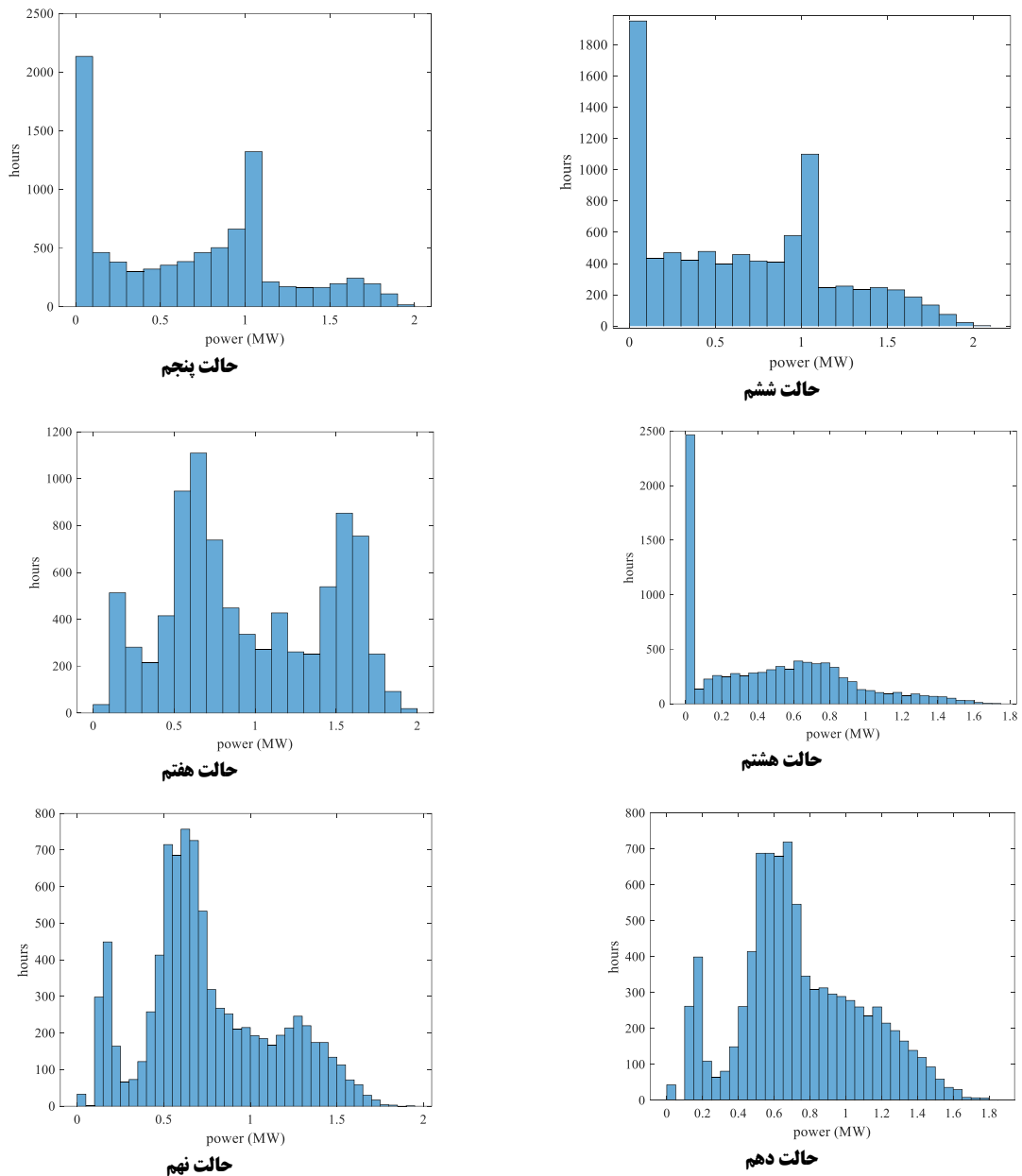
حالت دوم



حالت سوم



حالت چهارم



شکل (۱۵): هیستوگرام توان تولیدی ۱۰ حالت

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی به منظور تعیین سیستم هیبرید مناسب متشکل از منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف در یک منطقه ارائه شد. ابتدا انواع مختلف منابع انرژی تجدیدپذیر شامل نیروگاه‌های بادی، فتوولتاییک، جزرومدی مخزنی، جزرومدی جریان‌ی، مبدل انرژی امواج، آبی جریان‌ی و حرارتی اقیانوس معرفی و چگونگی وابستگی توان تولیدی این نیروگاه‌ها به سرعت باد، تابش خورشید، ارتفاع جزرومد، سرعت جریان‌های جزرومدی، ارتفاع و دوره تناوب امواج، دبی آب رودخانه و دمای سطح اقیانوس بیان گردید. با توجه به تغییر توان تولیدی این نیروگاه‌ها که در نتیجه تغییر کمیت‌های تجدیدپذیر می‌باشد پیشنهاد شد این نیروگاه‌ها به صورت هیبرید مورد استفاده قرار بگیرند تا عدم قطعیت آن‌ها کمتر شود. در تعیین سیستم هیبرید مناسب نیز پیشنهاد گردید میانگین و انحراف معیار توان تولیدی نیروگاه‌ها محاسبه و سیستم‌های هیبرید مناسب با هم مقایسه شوند. سیستمی که میانگین بیشتر و انحراف معیار کمتری دارد نشان‌دهنده بیشتر بودن پتانسیل منطقه در آن انرژی‌ها و کمتر بودن عدم قطعیت توان تولیدی آن است. همچنین پیشنهاد شد هیستوگرام توان تولیدی سیستم‌های هیبرید مختلف نیز با هم

مقایسه شود و سیستم هیبریدی که هیستوگرام آن تنوع توان کمتری با احتمال وقوع بالاتر داشته باشد مناسب تر است. سپس یک شبیه سازی در نرم افزار متلب برای تعیین سیستم هیبرید مناسب در منطقه بوشهر صورت گرفته و ۴ نیروگاه بادی، فتوولتاییک، جزرومدی مخزنی و جزرومدی جریانی برای تشکیل سیستم هیبرید در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد از بین ۱۰ گزینه مختلف حالت چهارم از همه مناسب تر است. این حالت دارای میانگین توان تولیدی ماکزیمم، انحراف معیار کم و انرژی تولیدی ماکزیمم در بین گزینه ها می باشد. توان تولیدی میانگین این حالت که مربوط به استفاده از دو توربین جزرومدی جریانی است ۱/۰۳۶۵ مگاوات، انحراف معیار آن ۰/۳۹۹۶ مگاوات و انرژی تولیدی سالانه آن ۷/۰۷۹۴ گیگاوات ساعت می باشد. بنابراین با داشتن داده های مختلف، می توان سیستم هیبرید مناسب را تعیین نمود. البته در این تحقیق سیستم هیبرید متشکل از دو نیروگاه در نظر گرفته شده است که می توان سیستم های هیبرید متشکل از ۳ یا تعداد بیشتر نیروگاه را نیز مورد توجه قرار داد.

References

مراجع

- [1] M.R. Negahdari, et al. "Optimal planning of the barrage type tidal power plants equipped to the hydro-pumps", *Electric Power Systems Research*, vol. 220, July 2023.
- [2] A. Ghaedi, R. Sedaghati and M. Mahmoudian, "The Impact of Vanadium-Redox Batteries on the Reliability of Power Systems Integrated with Current-Type Tidal-Turbines", *Energy Engineering & Management*, vol. 12, no. 4, pp. 2-17, winter 2023.
- [3] A. Nargeszar, A. Ghaedi, M. Nafar and M. Simab, "Reliability evaluation of the renewable energy-based microgrids considering resource variation", *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 3, pp. 507-527, 2023.
- [4] M.R. Negahdari, A. Ghaedi, M. Nafar and M. Simab, "Optimal planning of a micro-grid containing tidal barrage equipped to the hydro-pumps", *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 9, pp. 2215-2224, 2023.
- [5] A. Ghaedi and H. Gorginpour, "Reliability evaluation of permanent magnet synchronous generator-based wind turbines considering wind speed variations", *Wind Energy*, vol. 24, no. 11, pp. 1275-1293, 2021.
- [6] A. Ghaedi and H. Gorginpour, "Spinning reserve scheduling in power systems containing wind and solar generations", *Electrical Engineering*, vol. 103, pp. 2507-2526, 2021.
- [7] A. Ghaedi and H. Gorginpour, "Reliability assessment of composite power systems containing sea wave slot-coned generators", *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 16, pp. 3172-3180, 2020.
- [8] A. Ghaedi and M. Mirzadeh, "The impact of tidal height variation on the reliability of barrage-type tidal power plants", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 9, 2020.
- [9] K. Nasiriani, A. Ghaedi and M. Nafar, "Reliability Evaluation of Power Systems Containing Ocean Thermal Energy Conversion Power Plants", *Scientia Iranica*, vol. 29, no. 4, pp. 1957-1974, 2020.
- [10] A. Ghaedi, K. Nasiriani and M. Nafar, "Spinning Reserve Scheduling in a Power System Containing OTEC Power Plants", *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization*, vol. 3, no. 3, pp. 379-391, 2020.
- [11] M. Mirzadeh, M. Simab and A. Ghaedi, "Reliability evaluation of power systems containing tidal power plant", *Journal of Energy Management and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 28-38, 2020.
- [12] M. Mirzadeh, M. Simab and A. Ghaedi, "Reliability Modeling of Reservoir-Based Tidal Power Plants for Determination of Spinning Reserve in Renewable Energy-based Power Systems", *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 16-17, pp. 1534-1550, 2019.
- [13] M. Mirzadeh, M. Simab and A. Ghaedi, "Adequacy studies of power systems with barrage-type tidal power plants", *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 14, pp. 2612-2622, 2019.
- [14] A. Ghaedi and E. Noroozi, "Reliability evaluation of renewable energy-based power system containing energy storage", *Advances in Science and Technology*, vol. 10, no. 32, pp. 198-205, 2016.
- [15] E. Khalilzadeh, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar and A. Ghaedi, "Reliability Modeling of Run-of-the-River Power Plants in Power System Adequacy Studies", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1278-1286, Oct. 2014.
- [16] A. Ghaedi, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad and M. Parvania, "Incorporating Large Photovoltaic Farms in Power Generation System Adequacy Assessment", *Scientia Iranica*, vol. 21, no. 3, pp. 924-934, 2014.
- [17] A. Ghaedi, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad and M. Moeini-Aghtaie, "Toward a Comprehensive Model of Large-Scale DFIG-Based Wind Farms in Adequacy Assessment of Power Systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 55-63, Jan. 2014.