

The impact of battery on reliability performance of power system containing reservoir based tidal power plant

Younes Mansouri, *M.Sc*

Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
y27.1364@yahoo.com

Received: 16 August 2023

Revised: 21 November 2023

Accepted: 27 November 2023

Abstract:

Tides are the result of the gravitational force between the moon and the earth and to some extent the gravitational force between the sun and the earth, as a result of which the waters in the open seas rise and fall during the day and night. The rising and falling sea water can be used to generate electricity. There are two ways to produce electrical power from tides. In the first type, which are known as current-type tidal power plants, turbines are used in the depths of the sea, and the kinetic energy of the tidal currents causes them to rotate and generate electricity. In the second type of tidal power plants, which are known as reservoir-type tidal power plants, a dam is built and it is possible to transfer water between the sea and the storage tank built behind the dam. Due to the occurrence of tides, when the water moves between the sea and the storage tank, it passes through the turbines installed inside the valves of the dam wall and electricity is generated by their rotation. One of the problems that tidal energy has, like other renewable energy sources, is that the height of tides changes over time, and therefore the production power of these power plants varies over time. Therefore, in the power system where the reservoir-type tidal plant has a significant contribution to electricity production, various aspects of the power system, including reliability, will be affected. In order to reduce the uncertainty of the production power of reservoir-type tidal plants, batteries with a large capacity can be used next to these plants. When the production capacity of the tidal power plant is high and exceeds the system load, the battery is charged, and when the production capacity of the tidal power plant is less than the required load, the battery can be discharged and participate in feeding the load. Therefore, in this paper, the effect of the battery on the reliability of the power system with the presence of a reservoir-type tidal plant is studied.

Keywords: barrage type tidal power plant, power system reliability, battery storage system, uncertainty.

Corresponding Author: Younes Mansouri

Corresponding Author Address: Department of Electrical Engineering- Kazerun Branch -Islamic Azad University- Kazerun, Iran

تاثیر باتری بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی مخزنی

یونس منصوری، کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
y27.1364@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۶

چکیده: جزرومد در نتیجه نیروی گرانشی بین ماه و زمین و تا حدی نیروی گرانشی بین خورشید و زمین حاصل می‌گردد که در نتیجه آن آب‌های واقع در دریا‌های آزاد در طول شبانه‌روز بالا و پایین می‌روند. همین بالا و پایین رفتن آب دریا می‌تواند به منظور تولید برق استفاده شود. به دو روش می‌توان از انرژی جزرومد توان الکتریکی تولید نمود. در نوع اول که به نیروگاه‌های جزرومدی نوع جریان‌ی مشهور هستند از توربین‌هایی در اعماق دریا استفاده می‌شود که انرژی جنبشی جریان‌های جزرومدی سبب چرخش آن‌ها شده و برق تولید می‌کند. در نوع دوم نیروگاه‌های جزرومدی که به نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی معروفند یک سد احداث می‌گردد و امکان جابه‌جایی آب بین دریا و مخزن ذخیره تعبیه شده پشت سد وجود دارد. به دلیل وقوع جزرومد، زمانی که آب بین دریا و مخزن ذخیره جابه‌جا می‌شود از توربین‌هایی که درون دریچه‌های دیواره سد تعبیه شده عبور کرده و با چرخش آن‌ها برق تولید می‌شود. یکی از مشکلاتی که انرژی جزرومد به مانند سایر منابع انرژی تجدیدپذیر دارد این است که ارتفاع جزرومد در طول زمان تغییر می‌کند و لذا توان تولیدی این نیروگاه‌ها در طول زمان متغیر می‌باشد. بنابراین در سیستم قدرتی که نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی سهم قابل توجهی در تولید برق دارد جنبه‌های مختلف سیستم قدرت از جمله قابلیت اطمینان تاثیر خواهد پذیرفت. به منظور کاهش عدم قطعیت توان تولیدی نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی می‌توان از باتری‌های با ظرفیت زیاد در کنار این نیروگاه‌ها استفاده کرد. در مواقعی که توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی زیاد و از بار سیستم بیشتر است باتری شارژ شده و در شرایطی که توان تولیدی نیروگاه جزرومدی کمتر از بار مورد نیاز باشد، باتری می‌تواند دشارژ شده و در تغذیه بار مشارکت نماید. بنابراین در این مقاله اثر باتری بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مطالعه می‌گردد.

کلمات کلیدی: نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی، قابلیت اطمینان سیستم قدرت، باتری ذخیره انرژی، عدم قطعیت

نام نویسنده‌ی مسئول: یونس منصوری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

به دلیل اینکه سوزاندن سوخت‌های فسیلی مشکلات زیست محیطی زیادی را ایجاد نموده است سازمان‌های مختلف سعی کرده‌اند استفاده از این سوخت‌ها را محدود نمایند. سوزاندن سوخت‌های فسیلی سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای به مانند دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن می‌شود. بنابراین رشد منابع انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر سرعت گرفته است. توان تولیدی نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر در سال ۲۰۱۱ حدود ۱۱۰/۱ گیگاوات بوده که در سال ۲۰۲۰ این میزان به ۲۷۸/۳ گیگاوات رسیده است. انرژی‌های تجدیدپذیر نیز انواع مختلفی دارد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به باد، خورشید، اقیانوس، زیست توده و انرژی زمین‌گرمایی اشاره نمود. انرژی اقیانوس نیز به عنوان یکی از انواع مهم انرژی تجدیدپذیر مطرح می‌باشد که خود از انرژی‌های جزرومدی، امواج، انرژی حرارتی اقیانوس و گرادیان شوری تشکیل شده است. بنابراین انتظار می‌رود در آینده منابع انرژی تجدیدپذیر به ویژه نیروگاه‌های جزرومدی به منظور تولید برق در سیستم قدرت رشد زیادی داشته باشند. بر همین اساس مطالعه نیروگاه‌های جزرومدی و بررسی تاثیر آن‌ها بر جنبه‌های مختلف سیستم قدرت اهمیت دارد که تاکنون در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است. در [۱] روش‌های بهبود توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله ابتدا مشخصات نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی شامل تعداد توربین‌ها، تعداد دریچه‌ها، قطر توربین و عرض دریچه به گونه‌ای تعیین شده که انرژی تولیدی نیروگاه در طول یک سال ماکزیمم گردد. سپس در هنگام بهره‌برداری نیز تعداد دریچه‌ها و توربین‌ها جهت بهبود توان تولیدی نیروگاه تعیین شده است. همچنین در ساختار نیروگاه از هیدروپمپ استفاده شده و به منظور بهبود توان تولیدی نیروگاه، توربین‌ها در شرایط جزر توان الکتریکی تولید می‌کنند. در [۲] تکنیک‌های بهینه‌سازی نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی بیان شده است. در این مقاله پتانسیل انرژی جزرومد در نقاط مختلف جهان و به ویژه کشور چین و همچنین وضعیت نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی آورده شده است. به علاوه انواع مختلف توربین‌هایی که می‌توانند در نیروگاه‌های جزرومد نوع مخزنی مورد استفاده قرار بگیرند مطالعه شده است. در [۳] امکان احداث نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی در دهانه رود باکانگا در کشور برزیل با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود بررسی شده است. در این مقاله محدودیت‌های محیطی که به منظور ایجاد مخزن ذخیره آب در این منطقه دارد بررسی شده است و بر اساس مشخصات مخزن ذخیره آب و رابطه بین حجم ذخیره مخزن و ارتفاع آب درون آن میزان توان و انرژی تولیدی نیروگاه تعیین شده است. در [۴] گزینه‌های موجود جهت بهبود توان تولیدی یک نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی که در برزیل احداث شده است بررسی شده است تا بتوان به لحاظ اقتصادی این نیروگاه را مقرون به صرفه نمود. در این مقاله بر اساس داده‌های ساعت به ساعت ارتفاع جزرومد، ارتفاع آب درون مخزن و حجم آن توان تولیدی نیروگاه به دست آمده و بر این اساس گزینه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در [۵] کفایت سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان برای نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی به دست آمده است که هم خرابی اجزای تشکیل دهنده نیروگاه نظیر توربین، دریچه، ژنراتور، ترانسفورماتور و کابل را در نظر گرفته و هم تغییرات توان تولیدی نیروگاه که ناشی از تغییر ارتفاع جزرومد می‌باشد. در [۶] مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی انجام شده است. در این مقاله به منظور تعیین رزرو چرخان در سیستم قدرتی که سهم قابل توجهی از تولیدات آن را نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی بر عهده دارد ریسک انتخاب واحد به دست آمده است و آنقدر نیروگاه به سیستم اضافه شده است تا ریسک انتخاب واحد کمتر از مقدار مجاز قرار بگیرد. در [۷] تاثیر تغییر ارتفاع جزرومد بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله اثر تغییر ارتفاع جزرومد بر نرخ خرابی اجزای تشکیل دهنده نیروگاه شامل توربین، ژنراتور، ترانسفورماتور، کابل و مبدل‌های الکترونیک قدرت بررسی شده است و بر این اساس شاخص‌های دقیقی از قابلیت اطمینان محاسبه شده است. در [۸] روش‌های مختلف ارزیابی قابلیت اطمینان باتری‌های مورد استفاده در خودروهای برقی آورده شده است. در این مقاله اصول بهره‌برداری باتری‌های یون لیتیوم، الگوهای فرسودگی آن‌ها و همچنین مدل‌های فرسودگی آن‌ها بیان شده است، سپس قابلیت اطمینان آن‌ها با استفاده از دو روش کیفی و کمی به دست آورده شده است. مقاله [۹] مروری بر شارژکننده‌های سریع و باتری‌های مورد استفاده در خودروهای برقی را انجام داده است. در این مقاله توپولوژی، قابلیت اطمینان، روش‌های کنترلی و

جنبه‌های خنک‌سازی باتری‌های مورد استفاده در خودروهای برقی مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۱۰] آنالیز قابلیت اطمینان سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری که در کاربردهای استاتیکی مختلف استفاده می‌شود صورت گرفته است. در این مقاله به منظور محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان از شبیه‌سازی مونت کارلو با در نظر گرفتن توزیع عمر مفید اجزای تشکیل دهنده سیستم ذخیره‌ساز استفاده شده است.

با توجه به مقالات مرور شده تاکنون در زمینه بررسی تاثیر باتری ذخیره‌کننده انرژی بر قابلیت اطمینان نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی کار خاصی صورت نگرفته است. بر همین اساس در این مقاله مطالعه قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی انجام می‌شود. بنابراین نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

- تعیین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی
 - تعیین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی
 - ارائه تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی
- بر همین اساس سازماندهی این تحقیق به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی و باتری ذخیره انرژی معرفی می‌شوند. بخش سوم مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی و همچنین مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه در حالت متصل به باتری ذخیره انرژی را تعیین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی به منظور بررسی قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی متصل به باتری در بخش چهارم آورده شده است. بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص یافته است.

۲- نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی

در این بخش، به ارائه جزئیات نیروگاه‌های جزر و مدی در چندین زیربخش پرداخته می‌شود.

۲-۱- نیروگاه جزرومدی مخزنی

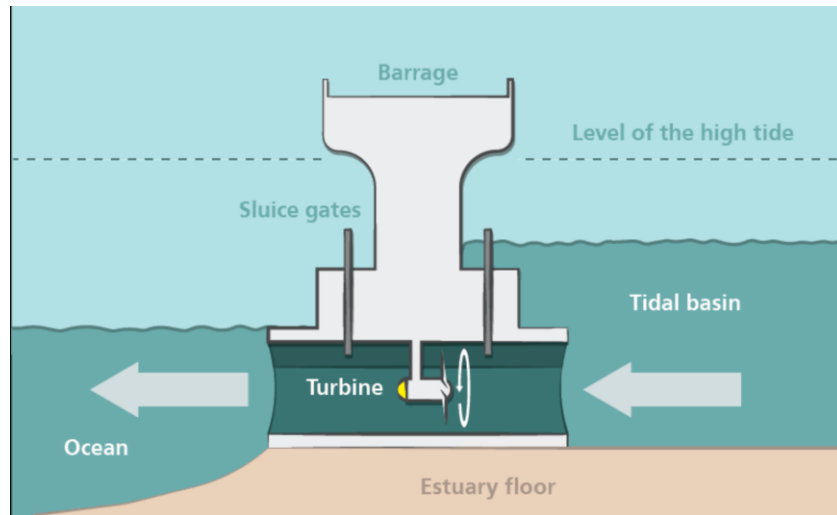
بطور کلی دو نوع نیروگاه جزرومدی وجود دارد: یکی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی که یک سد بین دریا و مخزن ذخیره آب ساخته شده و امکان جابجایی آب بین دریا و مخزن از طریق دریچه‌های تعبیه شده در سد وجود دارد. در این دریچه‌ها توربین قرار می‌گیرد و با عبور آب در هنگام جزرومد از این دریچه‌ها برق تولید می‌شود. در شکل (۱) ساختار این نیروگاه‌ها نشان داده شده است. البته تولید برق در این نیروگاه‌ها می‌تواند در سه حالت اتفاق بیفتد: یکی اینکه مخزن نیروگاه در هنگام مد پر شود و در هنگام جزر برق تولید کند، دوم اینکه مخزن نیروگاه در هنگام مد پر شود و در همین حالت نیز برق تولید شود و سوم اینکه مخزن نیروگاه در حالت مد پر می‌شود اما هم در حالت مد و هم در حالت جزر برق تولید شود.

نوع دیگر نیروگاه جزرومدی، نیروگاه جزرومدی جریان‌ی است که با نصب توربین‌های جزرومدی در اعماق اقیانوس به مانند توربین‌های بادی برق تولید می‌شود. جریان‌های جزرومدی که دارای سرعت و انرژی جنبشی می‌باشند با عبور از این توربین‌ها برق تولید می‌کنند. توان الکتریکی تولیدی هر کدام از توربین‌های به کار رفته در نیروگاه جزرومدی مخزنی بر حسب هد آب (اختلاف ارتفاع بین آب درون مخزن ذخیره و آب دریا)، بازده توربین و بازده ژنراتور کوپل شده به توربین، دبی حجمی آب عبوری از سطح مقطع توربین و چگالی آب بر اساس رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$P = \eta_T \eta_G \rho g (H_R - H_{TD}) q_T \quad (1)$$

در رابطه فوق η_G بازده ژنراتور، η_T بازده توربین، ρ چگالی آب دریا (معمولاً ۱۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود)، g شتاب گرانشی زمین (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)، H_R ارتفاع آب درون مخزن ذخیره بر حسب متر، H_{TD} ارتفاع آب دریا یا همان ارتفاع جزرومد و q_T نرخ انتقال آب از توربین‌ها بر حسب مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. توربین‌های کاپلان به دلیل

اینکه بازده خوبی در محدوده وسیعی از هد آب و نرخ انتقال آب دارند در نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بازده توربین‌های کاپلان در شرایط مختلف هد آب، نرخ انتقال آب، سرعت چرخش توربین و ... را می‌توان هم از منحنی‌هایی که سازندگان در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهند به دست آورد و هم از طریق روابط موجود. در رابطه ۲ وابستگی بازده این توربین‌ها به نرخ انتقال آب نشان داده شده است.



شکل (۱): نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی

$$\eta_T = [1 - (\alpha |1 - \beta \frac{q_T}{q_{Tn}}|^\gamma)] \delta \quad (2)$$

در رابطه فوق q_{Tn} نرخ انتقال نامی آب از توربین بر حسب مترمکعب بر ثانیه است که برای توربین در نظر گرفته شده در این مقاله ۶۸ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود، پارامترهای α , β , γ , δ بدون بعد بوده و به ترتیب برای توربین کاپلان در نظر گرفته شده در مقاله ۰/۹۰۵، ۶، ۱/۳۳۳ و ۳/۵ می‌باشند. نرخ انتقال آب از طریق توربین نیز توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$q_T = \frac{\pi}{4} (D_{tip}^2 - D_{hub}^2) v_f \quad (3)$$

در رابطه فوق D_{hub} و D_{tip} به ترتیب قطر تیپ و هاب توربین بر حسب متر می‌باشند که برای توربین در نظر گرفته شده در این مقاله به ترتیب ۳/۷۲ و ۱/۶۴ متر خواهند بود. همچنین v_f سرعت انتقال آب از طریق توربین بر حسب متر بر ثانیه بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$v_f = \sqrt{2g(H_R - H_{TD})} \quad (4)$$

البته در رابطه فوق فرض شده است که نیروگاه جزرومدی مخزنی در استراتژی تولید در جزر کار می‌کند. بر همین اساس در رابطه سرعت عبور آب از توربین، ارتفاع آب درون مخزن از ارتفاع آب دریا بیشتر بوده و آب از سمت مخزن ذخیره به سمت دریا از طریق توربین حرکت می‌کند. در صورتی که بنا باشد نیروگاه در استراتژی تولید در مد کار کند ارتفاع آب دریا از ارتفاع آب مخزن ذخیره بیشتر بوده و آب از سمت دریا وارد مخزن می‌شود و با عبور از توربین برق تولید می‌کند و لذا رابطه (۴) باید اصلاح شده و جای ارتفاع جزرومد و ارتفاع آب درون مخزن ذخیره جابه‌جا می‌شود. در رابطه ۵ نیز نرخ انتقال آب از طریق دریچه‌های فاقد توربین عبور می‌کنند و در شرایطی که مد اتفاق می‌افتد و آب در حال بالا آمدن است می‌خواهد مخزن ذخیره را پر کند آورده شده است.

$$q_s = H_R W_s \sqrt{\frac{2g(H_{TD} - H_R)}{1 - \frac{H_R}{H_{TD}}}} \quad (5)$$

در رابطه فوق W_s مجموع عرض همه دریچه‌ها می‌باشد. رابطه فوق مربوط به شرایطی است که در حالت مد آب از سمت دریا به سمت مخزن ذخیره آب حرکت کرده و با عبور از دریچه‌ها، مخزن ذخیره را پر می‌کند. البته در شرایطی که بنا باشد در شرایط جزر آب از سمت مخزن به سمت دریا بدون عبور از توربین و از طریق دریچه‌ها انتقال یابد و مخزن را تخلیه کند جای ارتفاع جزرومد و ارتفاع آب درون مخزن ذخیره تغییر می‌کند. همچنین در شرایطی که نیروگاه می‌خواهد در دو حالت جزرومد برق تولید کند، همه دریچه‌ها مجهز به توربین هستند و همواره آب از طریق توربین بین مخزن ذخیره و دریا منتقل می‌شود و باید نرخ انتقال آب از رابطه ۳ بدست آید. به منظور تعیین ارتفاع آب درون مخزن ذخیره در حالت جدید با داشتن نرخ انتقال و مدت زمان این انتقال، حجم آب درون مخزن تعیین شده و سپس بر اساس روابط باتیمتریک که ارتباط بین حجم مخزن ذخیره و ارتفاع آب درون مخزن را مشخص می‌کند ارتفاع آب درون مخزن تعیین می‌شود. همچنین در شرایطی که ارتفاع آب درون مخزن در دسترس باشد و مطلوب محاسبه حجم مخزن ذخیره باشد باز می‌توان از رابطه بین حجم مخزن ذخیره و ارتفاع آب درون مخزن استفاده نمود و حجم مخزن ذخیره را تعیین کرد.

۲-۲- باتری ذخیره انرژی

امروزه به دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق و همچنین به دلیل نیاز به ایجاد شبکه هوشمند استفاده از منابع ذخیره انرژی اهمیت زیادی پیدا کرده است. به همین دلیل استفاده از منابع ذخیره انرژی در ظرفیت‌های مختلف (ظرفیت بالا و قابل اتصال به شبکه قدرت در سطح انتقال، ظرفیت کمتر و قابل استفاده در سیستم‌های میکروگرید و هیبرید و همچنین ظرفیت کم و برای استفاده در کاربردهای خانگی) مطرح شده است. توان تولیدی نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر به مانند نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک، امواج و جزرومدی به طور دقیق قابل پیش‌بینی نبوده و به علت متغیر بودن سرعت وزش باد، تابش نور خورشید، ارتفاع و دوره تناوب امواج، و ارتفاع جزرومد دارای نوسان می‌باشند؛ چرا که توان تولیدی این منابع وابسته به شرایط آب و هوایی سرعت وزش باد، شدت تابش نور خورشید، ارتفاع و دوره تناوب امواج، و ارتفاع جزرومد است، لذا این منابع قابل کنترل نمی‌باشند؛ به این معنا که ممکن است در مواقع کم باری توانی بیشتر از توان مورد نیاز بار تولید کنند و یا در مواقع پیک بار، توان تولیدی آن‌ها کم باشد. به منظور مقابله با این مشکل و همچنین کاهش نوسانات توان می‌توان به دو صورت عمل نمود: روش اول اینکه این منابع را در کنار شبکه قدرت استفاده نمود؛ در این حالت در مواقع کم باری مازاد توان تولیدی این واحدها جذب شبکه شده و در مواقع پیک بار، شبکه کمبود توان مورد نیاز بار را تأمین می‌کند. روش دوم استفاده از منابع ذخیره انرژی در کنار این منابع است؛ در این روش نیز در مواقعی که توان تولیدی این منابع از بار مورد نیاز بیشتر است مازاد توان در منبع ذخیره انرژی ذخیره شده و در مواقعی که توان تولیدی واحد از بار کمتر است میزان کمبود را منبع ذخیره انرژی جبران می‌کند. مهمترین منابع ذخیره انرژی که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است شامل باتری ذخیره انرژی الکتریکی، سیستم‌های ذخیره پمپی، سیستم شامل دستگاه الکترولیز آب، تانک ذخیره هیدروژن و پیل سوختی، خازن‌های بزرگ یا ابرخازن‌ها، سیستم هوای فشرده و چرخ‌های طیار می‌باشند. در این بخش استفاده از باتری‌های وانادیوم ریداکس (VR) با ظرفیت بالا و قابل اتصال به شبکه قدرت در سطح انتقال، در مطالعات قابلیت اطمینان سیستم قدرت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری

قابلیت اطمینان در یک سیستم به معنای این است که آن سیستم تا چه حد می‌تواند کارکرد مطلوب داشته باشد. در صورتی که به هر دلیلی سیستم خراب شود و نتواند کارکرد خود را انجام دهد، قابلیت اطمینان آن دچار مشکل شده است. در شبکه قدرت، نیروگاه‌ها برق تولید می‌کنند، خطوط انتقال و توزیع نیز برق تولیدی نیروگاه‌ها را به بارها می‌رسانند. در صورتی که

نیروگاه‌ها، خطوط انتقال و یا خطوط توزیع خراب شوند عملیات برق‌رسانی به بارها دچار مشکل شده و قابلیت اطمینان سیستم قدرت کاهش می‌یابد. به منظور مطالعه قابلیت اطمینان در شبکه قدرت سه سطح در نظر گرفته می‌شود: در مطالعات سطح اول که سطح تولید نامیده می‌شود فقط خرابی نیروگاه‌ها در نظر گرفته شده و از خرابی خطوط انتقال و خطوط توزیع صرف‌نظر می‌گردد. در این مطالعات کلیه نیروگاه‌ها و بارها به یک شین مشترک متصل شده و شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه می‌گردد. در مطالعات سطح دوم که مطالعات سیستم مرکب تولید و انتقال نام دارد هم خرابی نیروگاه‌ها و هم خرابی خطوط انتقال در نظر گرفته می‌شود و از خرابی خطوط توزیع صرف‌نظر می‌شود. در مطالعات سطح سوم خرابی همه بخش‌ها یعنی نیروگاه‌ها، خطوط انتقال و خطوط توزیع در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی

در این بخش از مقاله، مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی با در نظر گرفتن خرابی اجزای تشکیل دهنده و تغییرات توان خروجی به دست آورده می‌شود. اجزای اصلی تشکیل دهنده نیروگاه جزرومدی مخزنی عبارتند از سد و دیواره سد، مخزن ذخیره آب، دریچه‌ها، توربین‌ها، ژنراتورها، مبدل الکترونیک قدرت، ترانسفورماتور و کابل. با توجه به اینکه نرخ خرابی این تجهیزات بسیار کم می‌باشد در مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی از خرابی تجهیزات صرف‌نظر شده و تنها تغییرات توان خروجی نیروگاه به دلیل تغییر ارتفاع جزرومد در نظر گرفته می‌شود. توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی دارای تغییرات زیادی بوده و بنابراین مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها تعداد زیادی حالت خواهد داشت. استفاده از مدل قابلیت اطمینان با تعداد حالت زیاد برای انجام مطالعات قابلیت اطمینان تحلیلی مناسب نیست. بنابراین باید به کمک تکنیک خوشه‌بندی مناسبی تعداد حالات توان را در مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها کاهش داد. روشی که در اینجا پیشنهاد می‌شود روش خوشه‌بندی فازی c میانگین می‌باشد. این الگوریتم یکی از مهمترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های خوشه‌بندی می‌باشد. در این الگوریتم داده‌ها به c خوشه از قبل مشخص شده تقسیم می‌شوند در الگوریتم خوشه بندی c میانگین فازی تابع هدف بصورت زیر می باشد [۱۱]:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m |x_k - v_i| \quad (6)$$

در رابطه فوق x_k داده‌های توان خروجی نیروگاه جزرومدی مخزنی در ساعت k ام و v_i مرکز کلاستر i ام می‌باشد. در این الگوریتم باید تعداد کلاسترها در ابتدای الگوریتم به عنوان ورودی وارد شود. این تحقیق به دنبال روشی است که تعداد کلاسترها را خود الگوریتم تعیین نماید. برای این منظور به ازای تعداد کلاسترهای از ۲ تا یک مقدار دلخواه مناسب (مثلاً ۲۰) مقدار تابع هدف رابطه (۶) محاسبه می‌شود. مسلماً هر چه تعداد خوشه‌ها بیشتر شود مقدار تابع هدف کمتر می‌شود به گونه‌ای که اگر تعداد کلاسترها با تعداد داده‌ها برابر شود مقدار تابع هدف صفر می‌شود. به هر حال اگر نمودار تابع هدف بر حسب تعداد کلاسترها رسم شود مشاهده می‌شود روند کاهشی تابع هدف به ازای تعداد کلاسترهای بیشتر از یک مقدار مشخص کند می‌شود و می‌توان آن مقدار مشخص را به عنوان تعداد مناسب برای کلاسترها در نظر گرفت. پس از اعمال روش خوشه‌بندی تعداد حالت‌ها (کلاسترها)، مرکز حالت‌ها و داده‌های متعلق به هر حالت تعیین می‌شوند.

۳-۲- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری

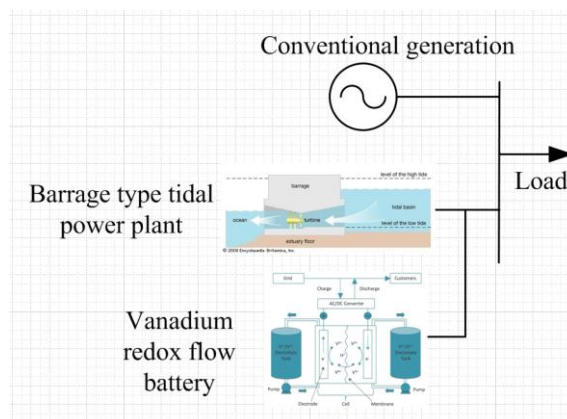
به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان باتری ذخیره انرژی باید دو مرحله در نظر گرفته شود. در مرحله اول خرابی اجزای تشکیل دهنده باتری و در مرحله بعد تغییرات توان خروجی باتری در طول زمان‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که توان خروجی باتری به وضعیت منابع تجدیدپذیر که در اینجا نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی است، شبکه و میزان بار بستگی دارد لذا توان خروجی آن در هر زمان (دقیقه، ساعت و ...) متفاوت می‌باشد. در این مقاله هدف این است که یک مدل تحلیلی قابلیت اطمینان برای مجموعه شامل واحد تولیدی تجدیدپذیر و باتری ذخیره انرژی ارائه گردد. از آنجا که فرایند شارژ و دشارژ باتری‌ها بازدهی کمتر از ۱۰۰ درصد دارد بنابراین مقرون به صرفه نیست که توان تولیدی شبکه، که در نتیجه تولید

واحدهای متعارف با هزینه بهره‌برداری مربوطه می‌باشد، به منظور استفاده در مواقع دیگر ذخیره شود. اما در مورد واحدهای تجدیدپذیر امواج، جزرومد، باد و خورشید که هزینه بهره‌برداری ناچیز دارند این امر مقرون به صرفه است. بنابراین در مواقعی که تولیدات از بار بیشتر است مازاد تولیدی واحدهای تجدیدپذیر در باتری ذخیره می‌شود و در مواقعی که تولیدات از بار کمتر است باتری دشارژ شده و بخشی از بار را تأمین می‌کند. بر این اساس باتری‌های ذخیره در کنار نیروگاه‌های تجدیدپذیر قرار دارند و به همین لحاظ به مجموعه آن‌ها یک مدل قابلیت اطمینان تعلق می‌گیرد. در این مرحله مدل قابلیت اطمینان باتری بر اساس خرابی اجزای تشکیل‌دهنده بدست می‌آید. کوچکترین تجهیز تشکیل دهنده این باتری‌ها، سلول‌های تولید توان می‌باشند و یک ماژول از ترکیب این سلول‌ها حاصل می‌شود. در سیستم ذخیره انرژی، علاوه بر باتری به سیستم کنترل و مبدل DC به AC نیز نیاز است. با خراب شدن هر کدام از این سه بخش شامل باتری، سیستم کنترل و مبدل، عملکرد سیستم ذخیره متوقف می‌شود و از نقطه نظر قابلیت اطمینان این سه قسمت با هم سری هستند. بنابراین بر اساس پارامترهای قابلیت اطمینان این سه بخش، پارامترهای قابلیت اطمینان کل سیستم ذخیره انرژی بدست می‌آید. در یک سیستم که تجهیزات تشکیل دهنده آن به لحاظ قابلیت اطمینان با هم سری قرار گرفته‌اند، نرخ خرابی معادل سیستم برابر با مجموع نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده می‌باشد. حال باید عدم قطعیت توان خروجی باتری در نظر گرفته شود. اگر یک واحد تولید تجدیدپذیر در کنار یک باتری ذخیره انرژی به شبکه قدرت متصل، و داده‌های توان خروجی این مجموعه برای چندین سال به صورت ساعت به ساعت در دسترس باشد می‌توان به کمک تکنیک فرکانس و تداوم و بر اساس روش خوشه‌بندی مدل قابلیت اطمینان چند حالته‌ای برای مجموعه بدست آورد. مزیت این روش این است که در این حالت محدودیت‌های موجود در مجموعه شامل خرابی نیروگاه تجدیدپذیر و یا سیستم ذخیره انرژی، بازدهی سیستم ذخیره انرژی، محدودیت‌های ماکزیمم و مینیمم ظرفیت باتری و سرعت شارژ و دشارژ باتری به خودی خود در مدل وجود دارد. زیرا داده‌های حاصل، از عملکرد واقعی سیستم نتیجه شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق این داده‌ها وجود ندارد بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو وضعیت سیستم مدل می‌شود. بدین صورت که با اعمال محدودیت‌های گفته شده به سیستم توان خروجی مجموعه به صورت ساعت به ساعت تعیین شده و مدل قابلیت اطمینان آن بدست می‌آید. در این شبیه‌سازی خرابی واحدهای تولید متعارف، خرابی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، خرابی سیستم ذخیره انرژی، بازده سیستم ذخیره انرژی، محدودیت مینیمم و ماکزیمم ظرفیت باتری و سرعت شارژ و دشارژ آن در نظر گرفته شده است.

۳-۳- تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری

در این بخش تکنیک ارزیابی کفایت سیستم قدرت در سطح اول (سیستم تولید) با حضور نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری به روش تحلیلی بیان و نحوه محاسبه شاخص‌های مهم این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مطالعه قابلیت اطمینان سیستم قدرت در این سطح کلیه واحدهای تولید و همچنین کلیه بارهای مصرفی به یک باس مشترک وصل شده و از تأثیر سیستم انتقال صرف‌نظر می‌گردد. در شکل (۲) روش بیان شده به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی متصل به ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری‌های وانادیوم ریداکس آورده شده است. همانگونه که مشخص است در این شکل فرض شده است که علاوه بر نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی، نیروگاه‌های متعارف نیز به منظور تغذیه بارهای الکتریکی شبکه حضور دارند. در ارزیابی تحلیلی قابلیت اطمینان در سطح اول، ظرفیت‌ها و احتمالات مربوط به واحدهای تولید با مدل قابلیت اطمینان دو و یا چند حالته در جدول احتمال خروج ظرفیت‌ها (COPT) جمع‌آوری شده و از ترکیب این مدل تولید و مدل بار، ریسک سیستم و شاخص‌های مربوطه به دست می‌آید. در مطالعه کفایت سیستم قدرت شاخص‌های قابلیت اطمینانی به مانند مقدار متوسط بار قطع شده (LOLE)، متوسط انرژی تأمین نشده (EENS)، میزان بار قابل تغذیه (PLCC) و قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه (IPLCC) محاسبه می‌شوند. به منظور مطالعه کفایت سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی باید دقت کرد که مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها را به دلیل تغییرات زیاد توان خروجی که ناشی از تغییرات ارتفاع جزرومد می‌باشد نمی‌توان با دو حالت نشان داد. بنابراین مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها چند حالته (بیش از دو حالت) داشته و علاوه بر حالت‌های سالم (توان نامی) و خراب، حالت‌های با توان کمتر از

توان نامی (de-rated) نیز خواهند داشت. بنابراین با توجه به جدول احتمال حالت‌های این نیروگاه‌ها و ترکیب آن‌ها با جدول احتمال حالت‌های سایر نیروگاه‌ها جدول احتمال حالت‌های کلی سیستم تولید به دست آمده و با مقایسه این مدل با بار سیستم شاخص‌های مهم کفایت سیستم تولید به صورت بیان شده در فوق تعیین می‌شوند. در مورد ترکیب نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی و باتری ذخیره انرژی نیز مدل قابلیت اطمینان این سیستم چندحالتی خواهد بود و با تکنیک مشابه ارزیابی خواهد شد.



شکل (۲): روش ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تولید با حضور نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته در محیط نرم‌افزار متلب به منظور ارزیابی و تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح تولید در شرایطی که نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی به سیستم‌های تست روی بیلینتون و IEEE اضافه شده است آورده شده است تا بتوان تأثیر این نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر جزرومد و همچنین باتری ذخیره انرژی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت را مورد مطالعه قرار داد. به منظور انجام این شبیه‌سازی ابتدا مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی ۳۰ مگاواتی تعیین می‌گردد. سپس مدل قابلیت اطمینان مجموعه شامل نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی ۳۰ مگاواتی متصل به باتری وانادیوم ریداکس تعیین و به منظور محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

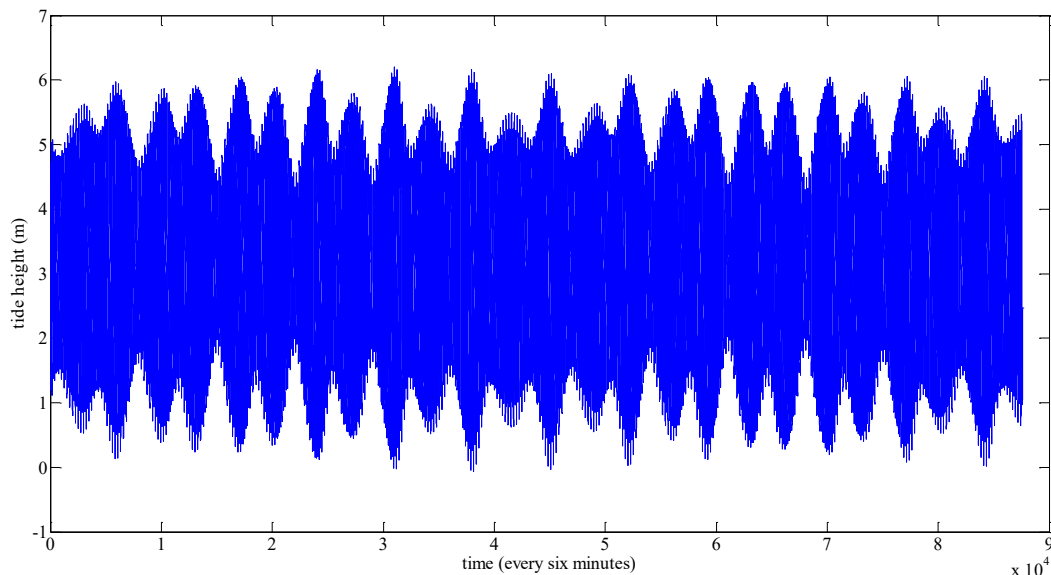
۴-۱- مشخصات نیروگاه جزرومدی مخزنی مورد مطالعه

در این بخش فرض می‌شود یک نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی با ظرفیت ۳۰ مگاوات، شامل ۱۲ توربین کاپلان ۲/۵ مگاواتی در دهانه رودخانه باکانگا واقع در کشور برزیل ساخته شده است. تغییرات ارتفاع آب دریا در هنگام جزرومد بر اساس رابطه زیر بیان می‌شود. در این رابطه مولفه‌های هارمونیک ارتفاع جزرومد، بر اساس داده‌های ارتفاع جزرومد که در طول چندین سال اندازه‌گیری و ثبت شده است به دست می‌آید.

$$H_{TD}(t) = H_0 + \sum_{k=1}^n H_k \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (7)$$

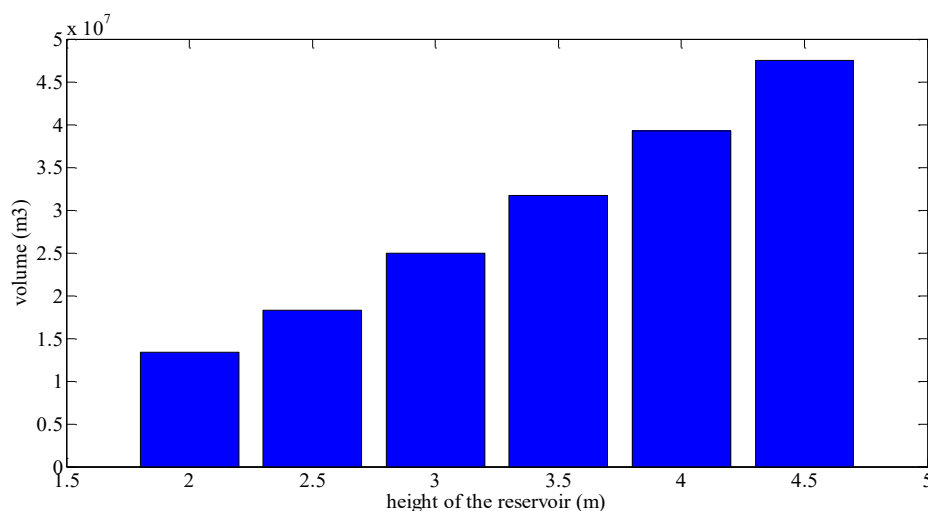
در این رابطه $H_{TD}(t)$ ارتفاع جزرومد در زمان t ، ω_k فرکانس مربوط به هارمونیک k ام بر حسب سیکل در ساعت، H_k ارتفاع یا دامنه مربوط به هارمونیک k ام جزرومد بر حسب متر، θ_k فاز مربوط به هارمونیک k ام بر حسب درجه و H_0 دامنه مولفه DC جزرومد می‌باشد. با ثبت داده‌های مربوط به ارتفاع آب ناشی از جزرومد در منطقه باکانگا در طول یک سال (سال ۲۰۲۰) به

صورت ساعت به ساعت و سری فوریه گرفتن از این تغییرات سری زمانی مربوطه و مولفه‌های هارمونیک این تغییرات بدست می‌آید که در شکل (۳) ارتفاع آب دریا که مربوط به بروز جزرومد در منطقه باکانگای برزیل است نشان داده شده است.



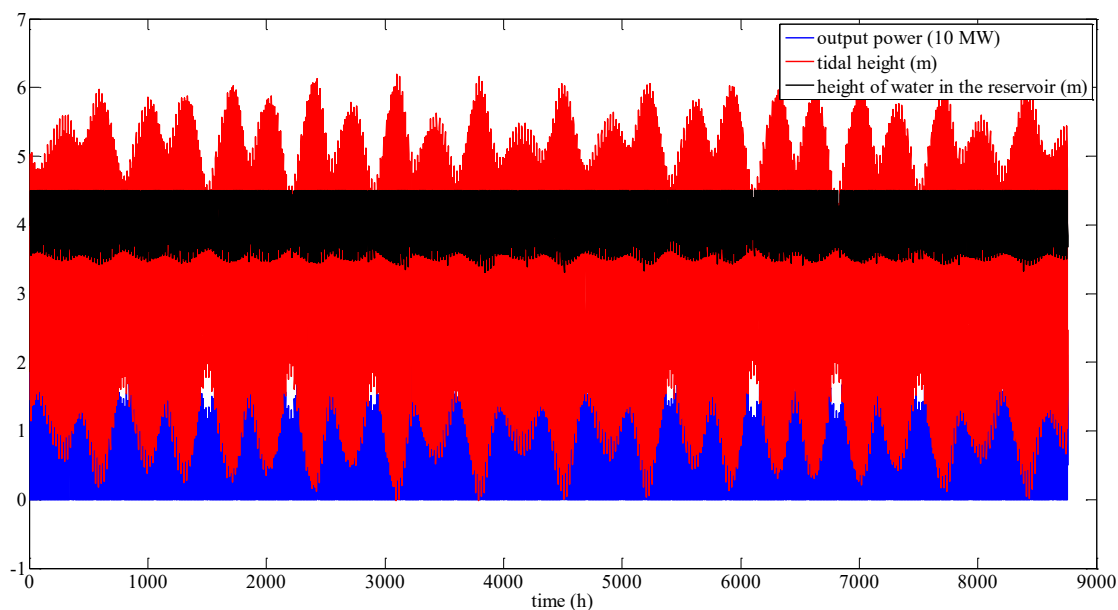
شکل (۳): ارتفاع آب دریا در هنگام بروز جزرومد در رودخانه باکانگا در سال ۲۰۲۰

در نیروگاه جزرومدی مخزنی مورد مطالعه به دلیل محدودیت‌های مربوط به مخزن ذخیره آب و با توجه به استفاده‌های دیگری که از آب ذخیره شده در مخزن صورت می‌گیرد اینگونه فرض شده است که ارتفاع آب درون مخزن باید از ۲/۵ متر کمتر و از ۴/۵ متر بیشتر نشود. به عنوان مثال کم شدن ارتفاع آب به مقدار کمتر از ۲/۵ متر سبب آسیب رسیدن به زندگی آبزیان موجود در مخزن (ماهی‌ها و ...) شده و ظرفیت مخزن نیز به گونه‌ای است که سطح آب بالاتر از ۴/۵ متر برای مخزن مشکلاتی ایجاد می‌کند. رابطه بین حجم آب ذخیره شده در مخزن و ارتفاع آب در آن از روابط باتیمتریک تعیین می‌شود که با توجه به مخزن باکانگا رابطه بین حجم و ارتفاع مخزن ذخیره به صورت نشان داده شده در شکل (۴) خواهد بود.

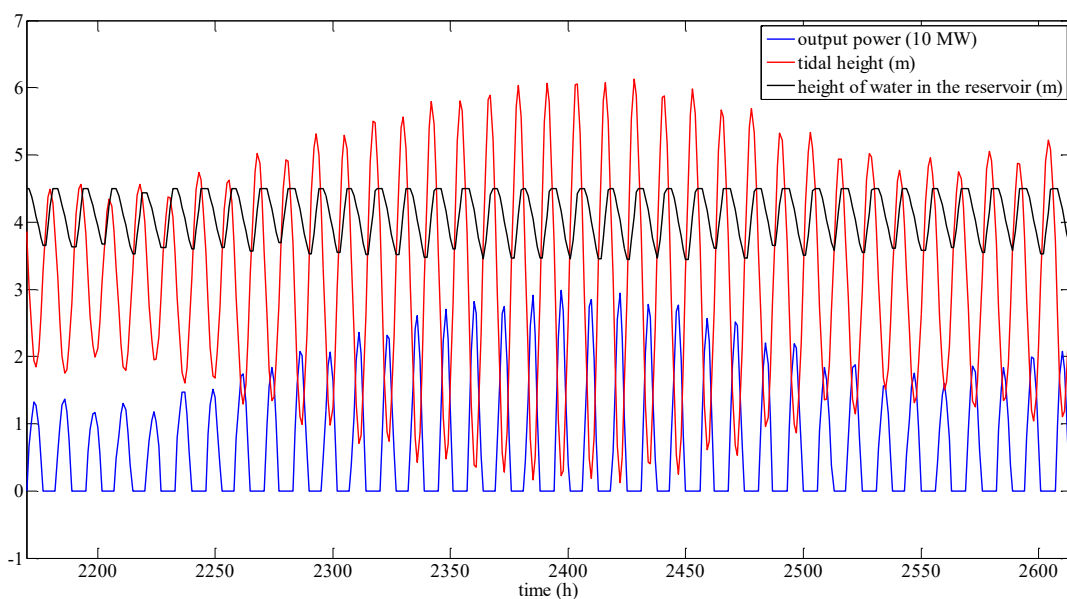


شکل (۴): رابطه بین حجم و ارتفاع آب در مخزن ذخیره

در این قسمت استراتژی تولید در جزر، در نظر گرفته شده و میزان توان تولیدی نیروگاه جزرومدی در این استراتژی در طول یک سال بر اساس روابط بیان شده تعیین شده و در شکل زیر رسم شده است. در هنگام تعیین تولید توان باید توجه داشت که در صورتی که اختلاف ارتفاع آب بین مخزن و جزرومد از ۱ متر بیشتر شود نیروگاه می‌تواند برق تولید کند. همچنین کمترین ارتفاع آب در مخزن ۲/۵ متر و بیشترین ارتفاع آب مخزن ۴/۵ متر در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب در شرایطی که در حالت مد آب در حال بالا آمدن است و می‌خواهد مخزن را پر کند ارتفاع آب درون مخزن نمی‌تواند از ۴/۵ متر بیشتر شود. در شرایطی که ارتفاع مخزن به ۴/۵ متر رسیده و آب دریا هنوز در حال مد و بالا آمدن است دریچه‌ها بسته و سطح آب مخزن در مقدار ۴/۵ متر ثابت نگه داشته می‌شود. بازده ژنراتور نیز ۹۰ درصد فرض شده است.



(الف)

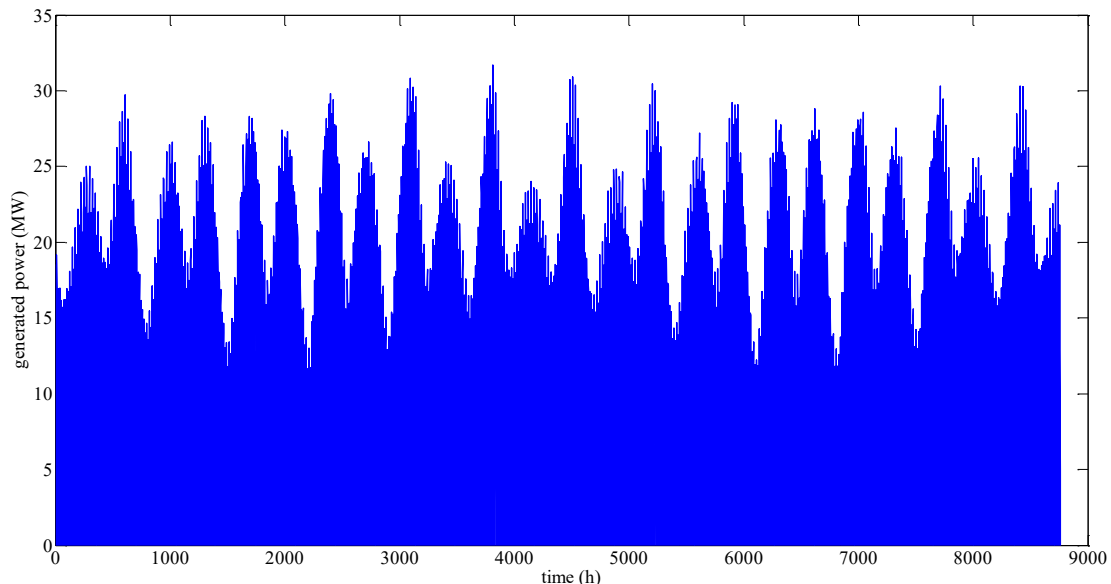


(ب)

شکل (۵): (الف) ارتفاع جزرومد، ارتفاع آب درون مخزن و (ب) توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی در حالت تولید در جزر

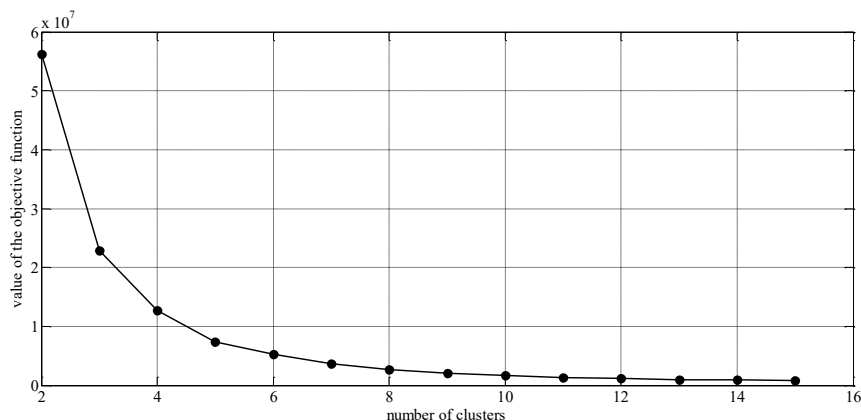
۲-۴- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی

توان تولیدی نیروگاه به صورت ساعت به ساعت بر اساس مشخصات نیروگاه و ارتفاع جزرومد در بخش قبل به دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است توان تولیدی نیروگاه دارای تغییرات زیاد بوده و باید به کمک روش خوشه‌بندی فازی تعداد حالت‌های توان کاهش یابد.



شکل (۶): توان خروجی نیروگاه جزرومدی مخزنی ۳۰ مگاواتی

در این قسمت به کمک روش خوشه‌بندی فازی تعداد حالت‌های مربوط به توان خروجی این نیروگاه کاهش داده می‌شوند. در شکل (۷) نمودار تابع هدف خوشه‌بندی بر حسب تعداد کلاسترها رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است با زیاد شدن تعداد کلاسترها مقدار تابع هدف که باید مینیمم شود کمتر می‌شود اما به ازای تعداد کلاستر ۶ روند کاهشی تابع هدف کند شده و بنابراین با تقریب خوبی تعداد ۶ کلاستر می‌تواند به خوبی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی نمونه را مدل نماید. در جدول (۱) مقادیر مرکز کلاسترها و احتمال مربوط به هر کدام از این حالت‌های ۶ گانه نشان داده شده است.



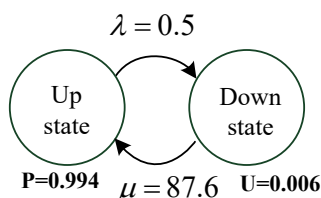
شکل (۷): نمودار تابع هدف خوشه‌بندی بر حسب تعداد خوشه‌ها برای نیروگاه جزرومدی مخزنی نمونه

جدول (۱): نتایج خوشه‌بندی توان خروجی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی ۳۰ مگاواتی

توان (مگاوات)	احتمال
۰	۰/۲۱۲۳
۶/۶	۰/۲۱۴۳
۱۱/۷	۰/۲۳۹۲
۱۸/۹	۰/۱۶۲۸
۲۴/۳	۰/۱۱۵۶
۳۰	۰/۰۵۵۸

۳-۴- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری وانادیوم ریداکس

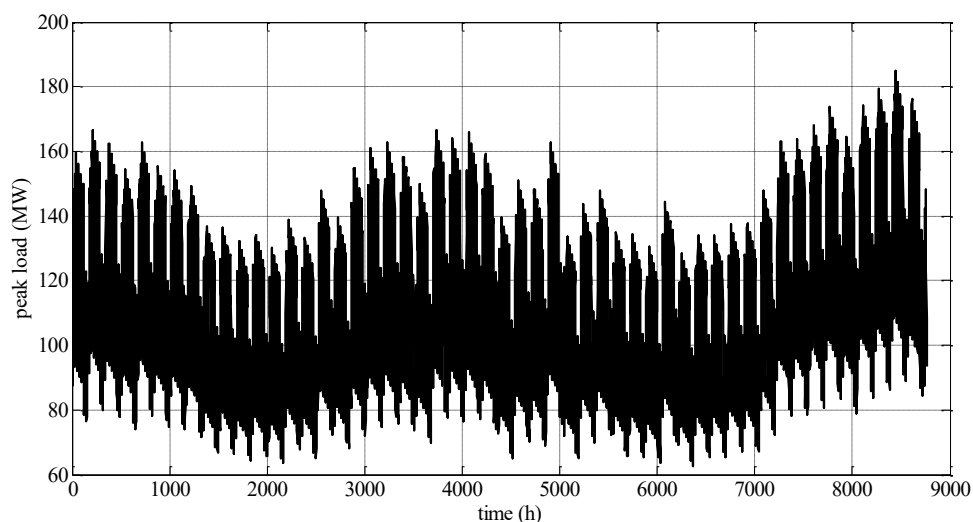
به منظور مطالعه مدل پیشنهادی، یک مجموعه باتری ۵ مگاواتی وانادیوم ریداکس با قابلیت ذخیره انرژی ۱۰ مگاوات ساعت که از ۵۰۰ باتری ۱۰ کیلوواتی با بازدهی شارژ و دشارژ ۷۵ درصد (با احتساب تلفات مبدل‌ها) تشکیل شده است در نظر گرفته می‌شود. مدت زمان کارکرد تا خرابی این باتری ۱۲۳۵ روز تعیین شده و بنابراین نرخ خرابی آن ۰/۳ خرابی در سال می‌باشد. مدت زمان تعمیر آن نیز ۱۰۰ ساعت در نظر گرفته می‌شود. خرابی این تجهیز می‌تواند به دلیل خراب شدن پمپ‌های گردش الکترولیت، خرابی سیم‌های اصل، غشای مجزا کننده و سایر تجهیزات مربوطه اتفاق بیفتد. این باتری‌ها باید به یک کنترل-کننده شارژ و دشارژ و همچنین یک مبدل DC به AC متصل شوند. برای سیستم کنترل نرخ خرابی ۰/۱ و تعمیر ۸۷/۶ بار در سال و برای مبدل DC به AC نرخ خرابی ۰/۲ و نرخ تعمیر ۸۷/۶ بار در سال در نظر گرفته می‌شود. تلفات مبدل‌ها نیز با تلفات باتری‌ها یکجا فرض شده است. همان‌گونه که در قبل گفته شد مجموعه باتری‌ها، کنترل کننده و مبدل DC به AC از نقطه نظر قابلیت اطمینان با هم سری بوده و لذا مدل قابلیت اطمینان سیستم ذخیره انرژی به صورت نشان داده شده در شکل (۸) خواهد بود. حال این باتری در کنار نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مورد مطالعه قرار گرفته و قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل منابع تجدیدپذیر با حضور این باتری مطالعه می‌شود.



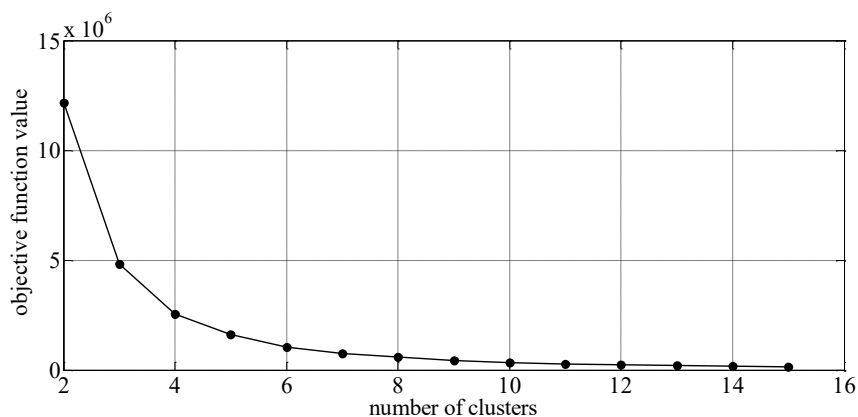
شکل (۸): مدل قابلیت اطمینان سیستم ذخیره انرژی با در نظر گرفتن خرابی اجزا

در این قسمت فرض می‌شود به سیستم تست روی بیلینتون یک نیروگاه جزرومدی مخزنی ۳۰ مگاواتی با مشخصات بیان شده در قبل متصل به یک باتری وانادیوم ریداکس ۵ مگاواتی با مشخصات گفته شده اضافه می‌شود. مقدار بار ساعت به ساعت سیستم روی بیلینتون تعیین شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. البته در مدل استاندارد سیستم روی بیلینتون همانگونه که در شکل مشخص است مقدار پیک بار ۱۸۵ مگاوات می‌باشد. به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان سیستم شامل نیروگاه جزرومدی مخزنی و باتری ذخیره انرژی، با توجه به داده‌های ارتفاع ساعت به ساعت جزرومد و بر اساس مشخصات نیروگاه جزرومدی مورد مطالعه، توان خروجی نیروگاه جزرومدی مخزنی در طول سال و به صورت ساعت به ساعت تعیین می‌شود. با تولید اعداد تصادفی برای هر کدام از تجهیزات نیروگاه جزرومدی مخزنی در هر ساعت، می‌توان وضعیت سالم و یا خراب بودن اجزا و در نتیجه توان کل تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی را به دست آورد. همچنین با تولید اعداد تصادفی برای اجزای تشکیل دهنده باتری نیز وضعیت سالم یا خراب بودن آن مشخص می‌شود. میزان بار اعمالی به سیستم شامل نیروگاه جزرومدی مخزنی ۳۰ مگاواتی و باتری وانادیوم ریداکس نیز به مانند الگوی بار شکل ۹ با مقدار پیک ۳۰ مگاوات در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن بازده باتری و محدودیت‌های شارژ و دشارژ آن و همچنین ماکزیمم ظرفیت و انرژی قابل ذخیره ۵

مگاوات و ۱۰ مگاوات ساعت یک شبیه‌سازی مونت کارلو با تکرار ۱۰۰ سال انجام شده و توان خروجی مجموعه نیروگاه جزرومدی مخزنی و باتری وانادیوم ریداکس به دست آمده است. اگر تولید کل از بار بیشتر و نیروگاه جزرومدی مخزنی توان تولیدی غیر صفر داشته باشد مازاد توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی با توجه به ظرفیت باتری، به باتری تزریق شده و در آن ذخیره می‌شود. همچنین در صورتی که توان تولیدی کل از بار کمتر باشد باتری با توجه به مقدار توان ذخیره شده‌ای که دارد ممکن است بتواند بخشی از بار را تأمین نماید. محدودیت‌هایی که در این شبیه‌سازی برای باتری در نظر گرفته شده است این است که اولاً ظرفیت ماکزیمم باتری ۵ مگاوات بوده و با شارژ و دشارژ شدن تنها قادر است ۷۵ درصد این توان را برگرداند. ماکزیمم انرژی ذخیره شده در باتری ۱۰ مگاوات ساعت بوده و در هر ساعت تنها باتری می‌تواند ۵ مگاوات ساعت را ذخیره نماید و یا به بار بدهد. ظرفیت مینیمم باتری محدودیت نداشته و باتری می‌تواند بطور کامل دشارژ گردد. با انجام شبیه‌سازی توان تولیدی مجموعه نیروگاه جزرومدی مخزنی و باتری در طول ۱۰۰ سال به صورت ساعت به ساعت بدست می‌آید. توان تولیدی مجموعه دارای تنوع بسیار زیادی بوده که برای انجام مطالعات تحلیلی قابلیت اطمینان مناسب نیست و لذا به کمک روش خوشه‌بندی فازی تعداد مناسب کلاسترها، مراکز آن‌ها، محدوده توان‌ها و احتمال مربوط به هر کلاستر بدست می‌آید. در شکل ۱۰ روند کاهش مقدار تابع هدف فرایند خوشه‌بندی با زیاد شدن تعداد کلاسترها نشان داده شده است. البته در صورتی که برای یک نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی داده‌های توان خروجی کل سیستم به صورت ساعت به ساعت در دسترس باشد می‌توان از این داده‌ها استفاده نمود و احتیاج به شبیه‌سازی نیست.



شکل (۹): مشخصه بار ساعت به ساعت سیستم تست روی بیلینتون



شکل (۱۰): نمودار مقدار تابع هدف بر حسب تعداد کلاسترها برای نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری

همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود تعداد ۷ کلاستر می‌تواند به خوبی مجموعه شامل نیروگاه جزرومدی مخزنی و باتری را مدل نماید. در جدول (۲) مرکز این کلاسترها و احتمال مربوط به هرکدام از این کلاسترها آورده شده است. بنابراین مدل قابلیت اطمینان مجموعه شامل نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی به صورت نشان داده شده در این جدول خواهد بود. بنابراین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ۷ حالتی می‌باشد.

جدول (۲): نتایج خوشه‌بندی مجموعه شامل نیروگاه جزرومدی مخزنی و باتری ذخیره انرژی

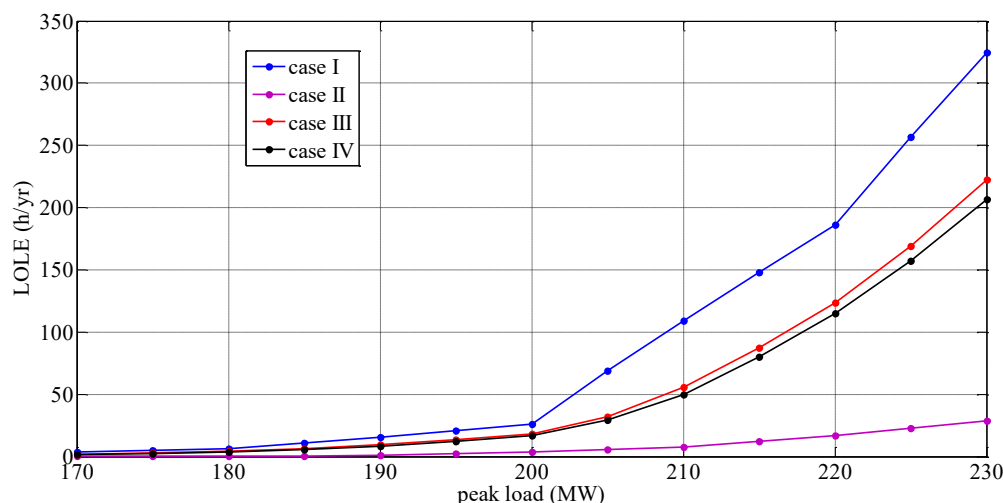
شماره کلاسترها	توان کلاستر (مگاوات)	احتمال
۱	۳۳/۶	۰/۳۳۵۷
۲	۲۸/۷	۰/۰۵۹۷
۳	۲۲/۶	۰/۰۵۵۸
۴	۱۶	۰/۰۵۲۸
۵	۹/۷	۰/۰۸۰۶
۶	۵/۷	۰/۱۱۵۹
۷	۳/۶	۰/۲۹۹۵

۴-۴- کفایت سیستم تست روی بیلینتون

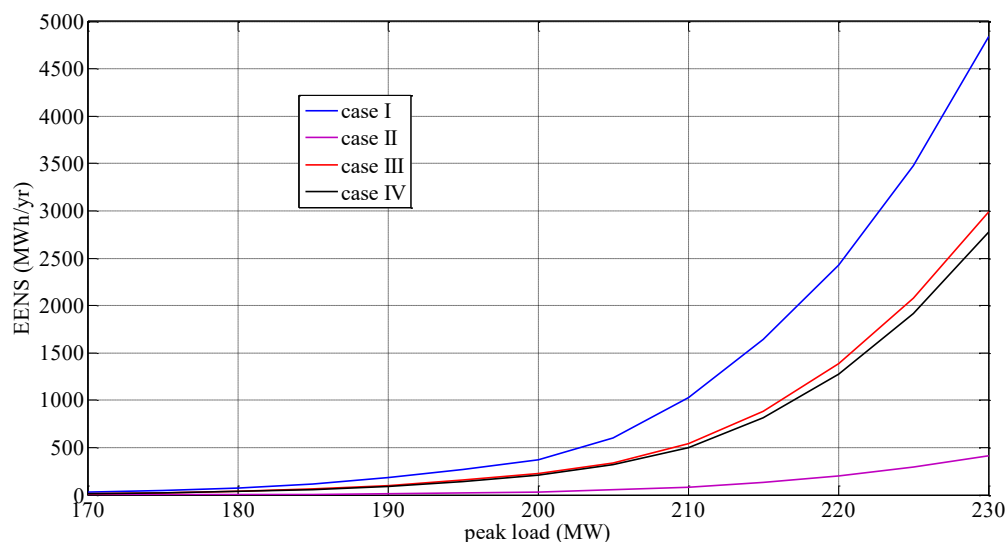
در این بخش مطالعه قابلیت اطمینان سیستم تست روی بیلینتون با حضور نیروگاه جزرومدی مخزنی و باتری وانادیوم ریداکس که در بخش قبل مدل شده است صورت می‌گیرد. سیستم تست روی بیلینتون دارای ۲۴۰ مگاوات واحد نصب شده شامل ۲ واحد ۵ مگاواتی، یک واحد ۱۰ مگاواتی، ۵ واحد ۲۰ مگاواتی و ۳ واحد ۴۰ مگاواتی با پیک بار سالانه ۱۸۵ مگاوات می‌باشد [۱۲]. مدل بار به صورت یک خط مستقیم بوده که از ۱۰۰ تا ۶۰ درصد پیک بار ماکزیمم تداوم دارد. به منظور انجام مقایسه بین واحدهای متعارف، نیروگاه جزرومدی مخزنی و سیستم شامل نیروگاه جزرومدی مخزنی و باتری در مطالعات قابلیت اطمینان ۴ حالت به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

- حالت اول: سیستم تست روی بیلینتون بدون اضافه نمودن واحد جدید
- حالت دوم: به سیستم تست روی بیلینتون یک واحد متعارف ۳۰ مگاواتی با نرخ خروج اضطراری ۰/۰۲ اضافه می‌شود.
- حالت سوم: یک نیروگاه جزرومدی مخزنی ۳۰ مگاواتی با مشخصات گفته شده در بخش قبل به سیستم تست روی بیلینتون اضافه می‌شود.
- حالت چهارم: یک نیروگاه جزرومدی مخزنی ۳۰ مگاواتی متصل به باتری وانادیوم ریداکس با مشخصات گفته شده به سیستم تست روی بیلینتون اضافه می‌شود.

در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) شاخص‌های مقدار متوسط بار قطع شده و متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار به ازای حالت‌های بیان شده در فوق آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش پیک بار شاخص‌های مقدار متوسط بار قطع شده و انرژی تأمین نشده افزایش یافته و قابلیت اطمینان سیستم بدتر می‌شود. همچنین از این دو شکل مربوط به نمودار متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار نتیجه می‌شود که نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی با ظرفیت برابر نیروگاه‌های متعارف تأثیر کمتری در بهبود قابلیت اطمینان دارد. این امر به دلیل عدم قطعیت موجود در ارتفاع جزرومد می‌باشد که سبب می‌شود توان خروجی نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی در بیشتر اوقات کمتر از توان نامی باشد. به علاوه همان‌گونه که مشخص است اضافه شدن باتری وانادیوم ریداکس در کنار نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی سبب شده است این نیروگاه‌ها بتوانند شاخص‌های قابلیت اطمینان را بهتر بهبود دهند چرا که نوسانات توان خروجی این نیروگاه‌ها کمتر شده است.



شکل (۱۱): نمودار متوسط زمان قطع بار بر حسب پیک بار



شکل (۱۲): نمودار متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار

همچنین میزان پیک بار قابل تغذیه در ۴ حالت بیان شده به شرطی که متوسط انرژی تأمین نشده از ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مگاوات ساعت در سال تجاوز نکند محاسبه شده و در جدول (۳) آورده شده است:

جدول (۳): میزان پیک بار قابل تغذیه بر حسب مگاوات

حالت‌ها	۱۰۰ مگاوات ساعت در سال	۲۰۰ مگاوات ساعت در سال	۳۰۰ مگاوات ساعت در سال
حالت اول	۱۸۳	۱۹۲	۱۹۷
حالت دوم	۲۱۲	۲۱۹	۲۲۵
حالت سوم	۱۹۴	۱۹۸	۲۰۲
حالت چهارم	۱۹۵	۲۰۰	۲۰۴

در جدول (۴) نیز میزان افزایش در پیک بار به شرطی که مقدار انرژی تأمین نشده از ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مگاوات در سال تجاوز نکند در شرایط اضافه نمودن واحد متعارف (حالت دوم)، نیروگاه جزرومدی مخزنی (حالت سوم) و نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری وانادیوم ریداکس (حالت چهارم) محاسبه شده و آورده شده است.

جدول (۴): میزان افزایش پیک بار

حالت‌ها	۱۰۰ مگاوات ساعت در سال	۲۰۰ مگاوات ساعت در سال	۳۰۰ مگاوات ساعت در سال
حالت دوم	۲۹	۲۷	۲۸
حالت سوم	۱۱	۶	۵
حالت چهارم	۱۲	۸	۷

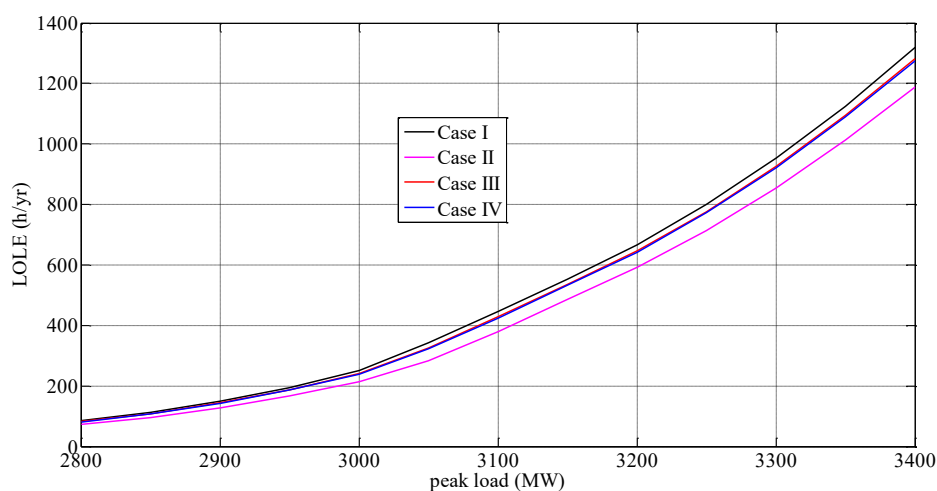
همانگونه که در جداول فوق نیز مشخص است اضافه شدن نیروگاه جزرومدی مخزنی به سیستم قدرت سبب بهبود شاخص‌های کفایت سیستم قدرت می‌شود اما تأثیر آن نسبت به واحدهای متعارف سنتی که توان خروجی آن‌ها ثابت است کمتر می‌باشد. اما در شرایطی که این نیروگاه‌ها به باتری ذخیره انرژی متصل باشند نوسانات توان خروجی آن‌ها کمتر شده و تأثیر بیشتری در بهبود شاخص‌های کفایت سیستم قدرت خواهند داشت.

۴-۵- مطالعه کفایت سیستم تست IEEE

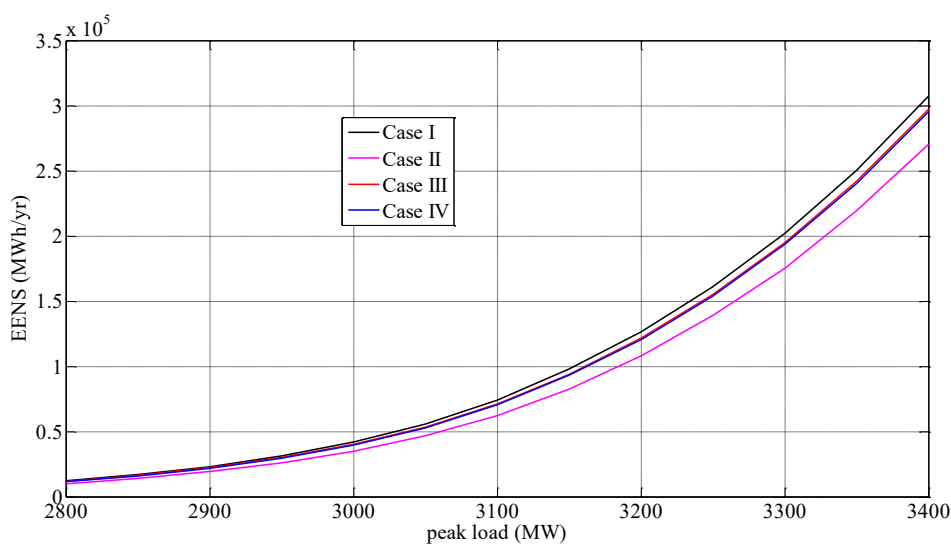
مشخصات سیستم تست IEEE در [۱۳] آورده شده است. بار نیز به صورت یک خط راست که از ۱۰۰ درصد تا ۶۰ درصد مقدار ماکزیمم پیک بار سالانه امتداد دارد مدل شده است. مقدار پیک بار سالانه ۲۸۵۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. در این قسمت نیروگاه جزرومدی مخزنی ۳۰ مگاواتی مدل شده در ابتدای این بخش، نیروگاه جزرومدی مخزنی ۳۰ مگاواتی متصل به باتری وانادیوم ریداکس و همچنین یک واحد متعارف ۳۰ مگاواتی با نرخ خروج اضطراری ۰/۰۲ را به این سیستم اضافه نموده و شاخص‌های قابلیت اطمینان میزان قطع بار، میزان انرژی تأمین نشده و قابلیت افزایش پیک بار قابل تغذیه برای این حالات محاسبه می‌شود. حالت‌های مختلفی که مورد مطالعه قرار می‌گیرند عبارتند از:

- حالت اول: سیستم تست IEEE بدون اضافه نمودن واحد جدید
- حالت دوم: به سیستم تست IEEE یک واحد متعارف ۳۰ مگاواتی با نرخ خروج اضطراری ۰/۰۲ اضافه می‌شود.
- حالت سوم: یک نیروگاه جزرومدی مخزنی ۳۰ مگاواتی با مشخصات بیان شده در قبل، به سیستم تست IEEE اضافه می‌شود.
- حالت چهارم: یک نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی با مشخصات بیان شده در قبل به سیستم تست IEEE اضافه می‌شود.

مقدار متوسط زمان قطع بار و همچنین متوسط انرژی تأمین نشده به ازای پیک بارهای مختلف محاسبه شده و به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) آورده شده است. همانگونه که مشخص است اضافه شدن نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی قابلیت اطمینان سیستم قدرت را بهبود می‌دهند اما تأثیر این نیروگاه‌ها در بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت در مقایسه با نیروگاه‌های متعارف کمتر می‌باشد. اما اضافه نمودن باتری ذخیره انرژی در کنار نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی سبب بهبود بیشتر در شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌شود چرا که توان خروجی نیروگاه جزرومدی مخزنی در کنار باتری ذخیره انرژی نوسانات کمتری خواهد داشت. همچنین میزان پیک بار قابل تغذیه در ۴ حالت بیان شده به شرطی که متوسط انرژی تأمین نشده از ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ گیگاوات ساعت در سال تجاوز نکند محاسبه شده و در جدول (۵) آورده شده است. در جدول (۶) نیز میزان افزایش در پیک بار به شرطی که مقدار انرژی تأمین نشده از ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ گیگاوات ساعت در سال تجاوز نکند در شرایط اضافه نمودن واحد متعارف (حالت دوم)، نیروگاه جزرومدی مخزنی (حالت سوم) و نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی (حالت چهارم) محاسبه شده و نشان داده شده است. در اینجا نیز از نتایج مشخص است که اضافه شدن نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی سبب بهبود قابلیت اطمینان و بهتر شدن شاخص‌های کفایت سیستم تولید می‌گردد اما از آنجا که این نیروگاه‌ها توان خروجی متغیر دارند و با عدم قطعیت همراه هستند تأثیر آن‌ها در بهبود قابلیت اطمینان کمتر از واحدهای متعارف می‌باشد. همچنین اضافه نمودن باتری ذخیره انرژی در کنار نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی عدم قطعیت این نیروگاه‌ها را کمتر کرده و سبب بهبود بیشتر شاخص‌های قابلیت اطمینان در سیستم قدرت شده است.



شکل (۱۳): نمودار متوسط زمان قطع بار بر حسب پیک بار



شکل (۱۴): نمودار متوسط انرژی تأمین نشده بر حسب پیک بار

جدول (۵): میزان پیک بار قابل تغذیه بر حسب مگاوات

حالت‌ها	۲۰ گیگاوات ساعت در سال	۵۰ گیگاوات ساعت در سال	۱۰۰ گیگاوات ساعت در سال
حالت اول	۲۸۷۵	۳۰۳۵	۳۱۵۵
حالت دوم	۲۹۰۴	۳۰۶۰	۳۱۸۱
حالت سوم	۲۸۹۰	۳۰۴۶	۳۱۶۴
حالت چهارم	۲۸۹۳	۳۰۴۸	۳۱۶۶

جدول (۶): میزان افزایش پیک بار

حالت‌ها	۲۰ گیگاوات ساعت در سال	۵۰ گیگاوات ساعت در سال	۱۰۰ گیگاوات ساعت در سال
حالت دوم	۲۹	۲۵	۲۶
حالت سوم	۱۵	۱۱	۹
حالت چهارم	۱۸	۱۳	۱۱

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ارزیابی قابلیت اطمینان در سطح تولید برای سیستم‌های قدرت شامل نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی انجام شد. ابتدا انواع مختلف نیروگاه‌های جزرومدی که شامل نیروگاه نوع مخزنی و جریانی بود معرفی شد. سپس ساختار نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی، اجزای تشکیل دهنده این نیروگاه و روابط مربوط به توان تولیدی این نیروگاه‌ها بیان گردید. در ادامه باتری‌های ذخیره انرژی و به ویژه باتری وانادیوم ریداکس معرفی شد. قابلیت اطمینان سیستم قدرت در ادامه بیان گردید و مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی با در نظر گرفتن تغییرات توان خروجی که ناشی از تغییر ارتفاع جزرومد بود به دست آمد. در این مقاله به منظور کاهش تعداد حالات توان در مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی از روش خوشه‌بندی فازی C میانگین استفاده شد. سپس مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی متصل به باتری ذخیره انرژی به دست آورده شد. مدل‌های به دست آمده به منظور آنالیز قابلیت اطمینان شبکه‌های تست روی بیلینتون و IEEE با در نظر گرفتن اثر نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی و باتری ذخیره انرژی در محیط نرم‌افزار متلب مورد استفاده قرار گرفت و نتایج زیر از شبیه‌سازی صورت گرفته حاصل شد:

- با زیاد شدن پیک بار در یک سیستم قدرت شاخص‌های متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تامین نشده افزایش می‌یابد.
- اضافه شدن نیروگاه‌های جدید به سیستم قدرت سبب بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان در سیستم قدرت می‌گردد.
- نیروگاه‌های متعارف که توان ثابتی تولید می‌کنند نسبت به نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی که توان خروجی‌شان به دلیل تغییر ارتفاع جزرومد متغیر است تاثیر بیشتری در بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت دارند.
- باتری ذخیره انرژی توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی را صاف‌تر نموده و سبب بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی می‌شود.

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] A. Ghaedi, H. Gorginpour, "Generated power enhancement of the barrage type tidal power plants", *Ocean Engineering*, vol. 226, p. 108787, Apr. 2021.
- [2] J. Wang, Z. W. Wang, "A review on tidal power utilization and operation optimization", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 240, no. 5, IOP Publishing, 2019.
- [3] P. B. L. Neto, O. R. Saavedra, L. A. de Souza Ribeiro, "Analysis of a Tidal Power Plant in the Estuary of Bacanga in Brazil Taking Into Account the Current Conditions and Constraints", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1187–1194, Jul. 2017.
- [4] R. M. Ferreira, S. F. Estefen, "Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions", *Renewable Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1151–1157, Apr. 2009.
- [5] M. Mirzadeh, M. Simab, 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.
- [6] M. Mirzadeh, M. Simab, 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, Oct. 2019.
- [7] A. Ghaedi, 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, e12477, 2020.

-
- [8] D. Liu, Y. Song, L. Li, H. Liao, Y. Peng, "On-line life cycle health assessment for lithium-ion battery in electric vehicles", *Journal of Cleaner Production*, vol. 199, pp. 1050–1065, Oct. 2018.
- [9] M. Gjelij, S. Hashemi, C. Traeholt, P. B. Andersen, "Grid integration of DC fast-charging stations for EVs by using modular li-ion batteries", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 20, pp. 4368–4376, Nov. 2018.
- [10] A. Bakeer, A. Chub, Y. Shen, A. Sangwongwanich, "Reliability analysis of battery energy storage system for various stationary applications", *Journal of Energy Storage*, vol. 50, p. 104217, Jun. 2022.
- [11] S. Askari, "Fuzzy C-Means clustering algorithm for data with unequal cluster sizes and contaminated with noise and outliers: Review and development", *Expert Systems with Applications*, vol. 165, p. 113856, Mar. 2021.
- [12] Aditya Tiwary, Swati Tiwary, "Evaluation of Reliability Indices of Roy Billinton Test System (RBTS) Bus-2 Distribution System for Educational Purpose", *Reliability: Theory & Applications*, vol. 16, no. 1, pp. 54-61, 2021.
- [13] C. Barrows *et al.*, "The IEEE Reliability Test System: A Proposed 2019 Update", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 119-127, 2019.