

The impact of component aging on the reliability of barrage type tidal power plant**Mohammad Amin Nikkhah¹, Ramin Eslami²**¹ Head of GIS Laboratory, Affiliated to Nirou Trans Company, Shiraz, Iran
nikkhah@niroutrans.com² Managing Director Sarv Nirou Shiraz Company, Affiliated to Nirou Trans Company, Shiraz, Iran
r.eslami@niroutrans.com**Received:** 22 June 2024**Revised:** 20 July 2024**Accepted:** 23 July 2024**Abstract:**

Due to the problems related to fossil fuels that cause environmental pollution, renewable power plants such as wind, solar, wave, tidal and hydro power plants have been developed to provide clean and stable electricity. Tidal power plants have been created in two forms, flow and reservoir power plants, so that they can produce electricity from tidal energy. In barrage type tidal power plants, a dam is created between the water storage tank and the ocean, and it is possible to transfer water between the ocean and the water storage tank through the dam wall. A turbine is placed in the valves located in the dam wall and electricity is generated. In this article, the reliability model of the reservoir type tidal power plant is obtained by considering the failure of its components, and then the effect of the aging of the equipment of this power plant on its reliability is examined. The graph of the equipment failure rate over time is usually in the form of a bathtub, and accordingly, the equipment failure rate increases with the passage of time and aging of the equipment. In this article, the effect of increasing equipment failure rate with the passage of time on the reliability of reservoir type tidal power plants is studied.

Keywords: failure rate, bathtub curve, components aging, reliability, reservoir type tidal power plant.**Corresponding Author:** Mohammad Amin Nikkhah**Corresponding Author Address:** Sarv Nirou Shiraz Company, Affiliated to Nirou Trans Company, Shiraz, Iran

تأثیر پیری تجهیزات بر قابلیت اطمینان نیروگاه جزر و مدی مخزنی

محمد امین نیک خواه^۱، رامین اسلامی^۲

۱- مسئول آزمایشگاه GIS شرکت سرو نیرو شیراز، وابسته به شرکت نیرو ترانس، شیراز، ایران

nikkhah@niroutrans.com

۲- مدیر عامل شرکت سرو نیرو شیراز، شرکت سرو نیرو شیراز، وابسته به شرکت نیرو ترانس، شیراز، ایران

r.eslami@niroutrans.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

چکیده:

به دلیل مشکلات مربوط به سوخت‌های فسیلی که سبب آلودگی محیط زیست می‌شود، نیروگاه‌های تجدیدپذیر به مانند نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، امواج، جزرومدی و آبی برای تامین برق پاک و پایدار توسعه پیدا کرده‌اند. نیروگاه‌های جزرومدی به دو صورت نیروگاه‌های جریان‌ی و مخزنی ایجاد شده‌اند تا بتوانند از انرژی جزرومد برق تولید کنند. در نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی یک سد بین مخزن ذخیره آب و اقیانوس ایجاد می‌شود و امکان انتقال آب بین اقیانوس و مخزن ذخیره آب از طریق دیواره سد وجود دارد. در دریچه‌های واقع در دیواره سد نیز توربین قرار گرفته و برق تولید می‌شود. در این مقاله مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی با در نظر گرفتن خرابی اجزای تشکیل دهنده آن به دست آورده شده و سپس تأثیر پیر شدن تجهیزات این نیروگاه بر قابلیت اطمینان آن بررسی می‌شود. نمودار نرخ خرابی تجهیزات در طول زمان معمولاً به صورت وانی شکل بوده و بر این اساس نرخ خرابی تجهیزات با گذشت زمان و پیر شدن تجهیزات افزایش می‌یابد. در این مقاله اثر زیاد شدن نرخ خرابی تجهیزات با گذشت زمان بر قابلیت اطمینان نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: نرخ خرابی، منحنی وانی شکل، پیر شدن تجهیزات، قابلیت اطمینان، نیروگاه جزرومدی مخزنی

نام نویسنده‌ی مسئول: محمد امین نیک خواه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: شرکت سرو نیرو شیراز، وابسته به شرکت نیرو ترانس، شیراز، ایران

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر نیروگاه‌های تجدیدپذیر به مانند نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، امواج، آبی و جزرومدی توسعه زیادی پیدا کرده‌اند تا بتوانند برق پاک و پایدار تولید نموده و بار مورد نیاز را تامین کنند. نیروگاه‌هایی که از سوخت‌های فسیلی استفاده کرده و با سوزاندن این سوخت‌ها گرمای لازم جهت بخار نمودن آب در نیروگاه‌های بخار و یا ایجاد انفجار در نیروگاه‌های گازی را سبب می‌شدند به دلیل مشکلات مربوط آلودگی محیط زیست محدود شده‌اند و بر همین اساس نیروگاه‌های تجدیدپذیر رشد خوبی در این سال‌ها داشته‌اند. مشکل مربوط به نیروگاه‌های تجدیدپذیر از جمله نیروگاه‌های جزرومدی این است که توان تولیدی آن‌ها در طول زمان تغییر می‌کند و نمی‌توان با دقت ۱۰۰ درصد توان تولیدی این نیروگاه‌ها را پیش‌بینی نمود. متغیر بودن توان تولیدی نیروگاه‌های تجدیدپذیر بر جنبه‌های مختلف سیستم قدرت از جمله قابلیت اطمینان تاثیر می‌گذارد. با توجه به اهمیت مطالعه قابلیت اطمینان نیروگاه‌های تجدیدپذیر تاکنون کارهای زیادی در این زمینه انجام شده است. در [۱] آنالیز قابلیت اطمینان، تحلیل اقتصادی و بررسی زیست محیطی یک ریزشبه که در آن از منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تولید توان الکتریکی استفاده شده است صورت گرفته است. در [۲] تاثیر منابع انرژی تجدیدپذیر متغیر بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله بیان شده است که نیروگاه‌های تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت می‌باشند و توان تولیدی آن‌ها در طول زمان متغیر می‌باشد. در [۳] بازآرایی سیستم توزیع انرژی الکتریکی با حضور منابع تولید تجدیدپذیر به منظور بهبود قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود انجام شده است. مقاله [۴] تاثیر تغییرات منابع انرژی تجدیدپذیر شامل باد، خورشید و جزرومد بر قابلیت اطمینان یک ریزشبه که در آن نیروگاه‌های بادی، جزرومدی جریانی و سیستم فتوولتاییک وجود دارد مطالعه شده است. در [۵] ارزیابی قابلیت اطمینان و مدیریت پرشدگی سیستم قدرت که در آن سیستم ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است تا بتواند عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر را کاهش دهد صورت گرفته است. در [۶] آنالیز قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی نیروگاه‌های موجود در یک ریزشبه مستقل از شبکه که در آن منابع انرژی تجدیدپذیر وجود دارد صورت گرفته است. در این ریزشبه همچنین تاثیر برنامه پاسخگویی بار بر این مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. در [۷] مروری جامع بر روش‌های بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت با در نظر گرفتن اثر منابع انرژی تجدیدپذیر صورت گرفته است. در [۸] تحلیل قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع مدرن صورت گرفته است. در این مقاله اثر نیروگاه‌های تجدیدپذیر و تولیدات پراکنده بر قابلیت اطمینان این شبکه‌های توزیع مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۹] ارزیابی قابلیت اطمینان دینامیکی نیروگاه‌های تجدیدپذیر صورت گرفته است. بر همین اساس این مقاله یک مدل دقیق برای نیروگاه‌های تجدیدپذیر جهت آنالیز قابلیت اطمینان دینامیکی آن‌ها ارائه نموده است. مقاله [۱۰] با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو که یک روش عددی می‌باشد قابلیت اطمینان یک ریزشبه که در آن منابع انرژی تجدیدپذیر سهم قابل توجهی در تامین بار دارند را مطالعه نموده است. در این مقاله اثر دسترس‌پذیری منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین دسترس‌پذیری اجزای تشکیل دهنده ریزشبه در نظر گرفته شده است. در [۱۱] بهره‌برداری بهینه از یک ریزشبه تجدیدپذیر که در آن نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی وجود دارد صورت گرفته است. در این مقاله به کمک الگوریتم توده ذرات تعداد توربین‌ها، دریچه‌ها و هیدروپمپ‌ها در هر لحظه از زمان به گونه‌ای تعیین شده است تا تابع هدف که هزینه بهره‌برداری ریزشبه می‌باشد بهینه شود. در [۱۲] برنامه‌ریزی بهینه از یک ریزشبه تجدیدپذیر که در آن نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مجهز به هیدروپمپ وجود دارد صورت گرفته است. در این مقاله، بهینه‌سازی در دو مرحله انجام شده است و هزینه مربوط به نیروگاه‌های مختلف در طول عمر مفید ریزشبه با استفاده از الگوریتم توده ذرات بهینه شده است. در [۱۳] برنامه‌ریزی بهینه از نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی با استفاده از الگوریتم توده ذرات انجام شده است. در این مقاله مقدار پارامترهای برنامه‌ریزی نیروگاه که شامل تعداد توربین، تعداد دریچه، تعداد هیدروپمپ، عرض دریچه، قطر هاب و تیپ توربین می‌باشد به گونه‌ای تعیین شده است تا انرژی تولیدی نیروگاه در طول عمر مفید آن بهینه گردد.

با توجه به مقالات مرور شده تاکنون کار خاصی در زمینه مطالعه قابلیت اطمینان نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی با در نظر گرفتن اثر پیری تجهیزات تشکیل دهنده این نیروگاه‌ها انجام نشده است. لذا نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

- ارائه مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی

- بررسی تاثیر عمر تجهیزات به کار رفته در نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل این نیروگاه‌ها

- بررسی تاثیر هیدروپمپ بر قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی مخزنی

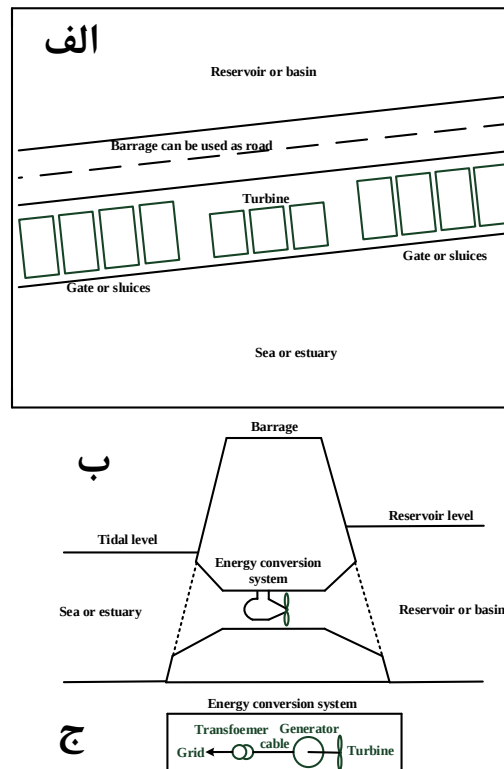
بر همین اساس در این مقاله اثر پیری تجهیزات بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی مخزنی مطالعه می‌شود. با توجه به اهدافی که این مقاله دنبال می‌کند ساختار آن به صورت زیر است: در بخش دوم نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی و در بخش سوم مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها بیان می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب در بخش چهارم و نتیجه‌گیری تحقیق نیز در بخش پنجم آورده خواهد شد.

۲- نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی

انرژی جزرومد به دلیل نیروی جاذبه بین ماه و زمین و تا حدی نیروی جاذبه خورشید و زمین به وجود می‌آید. به دلیل این نیروی جاذبه آب‌های واقع بر سطح دریاها ازاد در طول شبانه‌روز بالا و پایین می‌روند. به منظور تولید برق از انرژی جزرومد دو روش وجود دارد: در روش اول که نیروگاه‌های جزرومدی نوع جریانی از آن استفاده می‌کنند توربین‌های جزرومدی جریانی در اعماق اقیانوس‌ها در جاهایی که جریان‌های جزرومدی وجود دارد نصب می‌شوند. به دلیل سرعت جریان‌های جزرومدی، این توربین‌ها به چرخش درآمده و در نتیجه برق تولید می‌شود. در روش دوم که در نیروگاه‌های جزرومدی نوع جریانی مورد استفاده قرار می‌گیرد یک سد بین اقیانوس و مخزن ذخیره آب نصب می‌گردد. در دیواره این سد نیز دریچه‌هایی قرار می‌گیرد و امکان حرکت آب بین دریا و مخزن ذخیره آب از طریق این دریچه‌ها فراهم می‌شود. توربین‌هایی نیز در این دریچه‌ها قرار می‌گیرد و با عبور آب از این دریچه‌ها، این توربین‌ها به چرخش درآمده و برق تولید می‌شود. در شکل (۱) ساختار نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است یک سد بین مخزن ذخیره آب و اقیانوس احداث می‌شود. به منظور کاهش هزینه‌های احداث این نیروگاه‌ها می‌توان از روی دیواره سد به عنوان جاده استفاده کرد تا بتوان این نیروگاه را چند منظوره نموده و هزینه‌های آن را کاهش داد. در دیواره این سد تعدادی دریچه قرار می‌گیرد. می‌توان همه دریچه‌ها را مجهز به توربین نمود که در این صورت در هر زمان که آب از دریچه‌ها عبور می‌کند از توربین نیز عبور کرده و برق تولید می‌شود. همچنین می‌توان تنها در برخی دریچه‌ها توربین قرار داد. در این حالت بسته به نوع کارکرد نیروگاه به منظور پر شدن مخزن ذخیره آب، آب از دریچه‌های فاقد توربین عبور کرده و برق تولید نمی‌شود. در زمانی که مخزن بخواهد تخلیه شود آب از دریچه‌های شامل توربین عبور کرده و با چرخاندن توربین‌ها برق تولید می‌کند. البته می‌توان کارکرد نیروگاه را برعکس نمود. به این معنا که در هنگام پر شدن مخزن ذخیره آب، آب از دریچه‌های شامل توربین عبور کرده که هم مخزن را پر می‌کند و هم برق تولید می‌کند. در این وضعیت، در زمانی که مخزن بخواهد تخلیه شود آب از دریچه‌های فاقد توربین عبور می‌کند. به این سه حالت کارکرد نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی حالت تولید دو طرفه، حالت تولید در جزر و حالت تولید در مد گفته می‌شود. چرا که مخزن ذخیره آب در هنگام مد که آب دریا در حال بالا آمدن است پر شده و در حالت جزر که آب دریا در حال پایین آمدن است تخلیه می‌گردد. همانطور که در شکل (۱) دیده می‌شود اجزای اصلی یک نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی عبارتند از: سد و دیواره سد، مخزن ذخیره آب، دریچه‌ها، توربین‌ها، ژنراتورها، مبدل الکترونیک قدرت یا همان مبدل پشت به پشت (back to back)، ترانسفورماتورها و کابل‌ها.

۳- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی

همه اجزا نیروگاه مخزنی شامل مخزن یا حوضچه، دریچه، توربین، ژنراتور، مبدل back to back، کابل و ترانسفورماتور در شکل (۱) نشان داده شده است. همه اجزا با توجه به مدل مارکوف، با دو حالت سالم یا خراب در نظر گرفته می‌شود و تاثیر خرابی اجزا بر روی کل سیستم بررسی می‌شود. خرابی مخزن یا سد منجر به توقف تولید نیروگاه می‌شود. اما خرابی مخزن و سد تحت تاثیر عوامل نادری همچون زلزله یا سونامی رخ می‌دهد بنابراین نرخ خرابی سد و مخزن در مقایسه با سایر تجهیزات ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

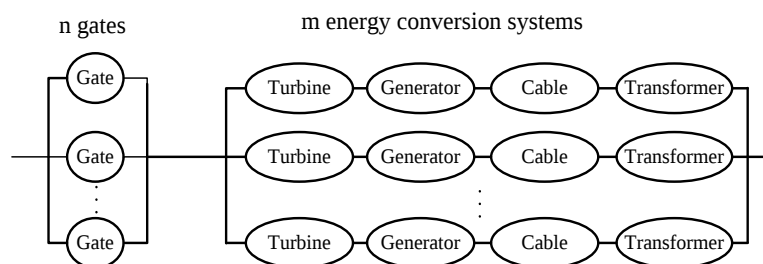


شکل (۱): اجزا نیروگاه جزر و مدی مخزنی؛ الف) شماتیک کلی نیروگاه، ب) سطح مقطع سد یا دیواره مخزن، ج) مبدل انرژی

در حالت تولید در جزر آب از طریق دریچه‌ها از دریا وارد مخزن شده و در حالت تولید در مد آب از طریق دریچه‌ها از مخزن به دریا می‌ریزد. خرابی یک یا چند دریچه باعث کاهش توان تولیدی می‌شود. بنابراین در یک نیروگاه جزر و مدی دارای n دریچه، باید توان خروجی نیروگاه را با وجود تعداد مختلف دریچه‌های سالم بدست آورد. خرابی هر کدام از اجزا مبدل انرژی نیروگاه جزر و مدی شامل توربین، ژنراتور، مبدل back to back، ترانسفورماتور و کابل منجر به خرابی مبدل انرژی می‌گردد. بنابراین از نظر قابلیت اطمینان اجزا مبدل انرژی بصورت سری با یکدیگر قرار دارند و نرخ خرابی معادل و نرخ تعمیر معادل برای اجزا مبدل انرژی بصورت زیر می‌باشد.

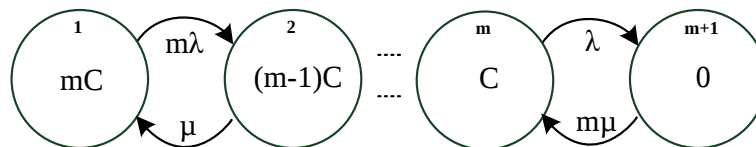
$$\lambda_{eq} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, r_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\lambda_{eq}}, \mu_{eq} = \frac{1}{r_{eq}} \quad (1)$$

λ_i نرخ خرابی تجهیز i -ام، λ_{eq} نرخ خرابی معادل کل سیستم، r_i زمان تعمیر تجهیز i -ام، μ_{eq} نرخ تعمیر معادل کل سیستم و r_{eq} زمان تعمیر معادل کل سیستم می‌باشد. در شکل (۲) تاثیر خرابی اجزا روی مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزر و مدی مخزنی با m مبدل انرژی و n دریچه نشان داده شده است.



شکل (۲): اتصالات سری موازی اجزا نیروگاه جزر و مدی مخزنی با n دریچه و m مبدل انرژی

همانطور که در شکل دیده می‌شود هریک از مبدل‌های انرژی $1/m$ توان تولیدی کل نیروگاه را تولید می‌کند و خرابی هر یک از اجزا یک مبدل انرژی، باعث می‌شود که توان تولیدی آن مبدل انرژی صفر شده و توان نیروگاه توسط بقیه مبدل‌های انرژی بصورت مستقل تولید شود. همچنین مدل قابلیت اطمینان برای m سیستم مبدل انرژی که هر سیستم دارای ظرفیت معادل C و دسترس پذیری A می‌باشد بصورت شکل (۳) می‌باشد.



شکل (۳): مدل قابلیت اطمینان مبدل انرژی نیروگاه جزر و مدی مخزنی

ظرفیت و احتمال حالت‌های مختلف بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Cap. = k \times C \text{ MW}, k : \text{no. of up energy conversion systems}$$

$$probability = \binom{m}{k} A^k (1-A)^{m-k} \quad (2)$$

خرابی یکی از اجزا مبدل انرژی منجر به کاهش $1/m$ توان تولیدی می‌شود اما خرابی یک دریچه منجر به کاهش $1/n$ توان تولیدی نیروگاه نمی‌شود. بلکه برای تاثیر خرابی دریچه‌ها می‌بایست با توجه به مشخصات ارتفاع جزر و مد و پارامترهای نیروگاه، شبیه سازی انجام داد و تاثیر خرابی دریچه‌ها بر روی توان تولیدی نیروگاه را بدست آورد. تغییرات ارتفاع جزر و مد منجر به تغییرات توان خروجی نیروگاه جزر و مدی می‌شود. بر خلاف سرعت باد و تابش خورشید، ارتفاع جزر و مد با دقت خیلی خوبی قابل پیش بینی است. ارتفاع جزر و مد متغیر با زمان است و این تغییرات می‌تواند با سری زمانی زیر مدل شود [۱۴].

$$H_{TD}(t) = H_0 + \sum_{k=1}^n H_k \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (3)$$

در رابطه فوق، امگا، H و t به ترتیب دوره تناوب (سیکل-ساعت)، ارتفاع جزر و مد (متر) و اختلاف فاز (درجه) مربوط به k امین هارمونیک جزر و مد می‌باشد. وجود تعداد حالت‌های زیاد توان خروجی واحد جزر و مدی برای انجام مطالعات قابلیت اطمینان مناسب نیست و باید به کمک تکنیک خوشه‌بندی تعداد حالت‌ها را کاهش داد. با انتخاب روش مناسب خوشه‌بندی، می‌توان تعداد مناسب حالت‌ها و همچنین مرکز خوشه‌ها که به عنوان ظرفیت هر حالت استفاده می‌شوند را تعیین نمود. روش‌های خوشه‌بندی متفاوتی وجود دارد که در این مقاله از روش خوشه‌بندی فازی (FCM) بعنوان روشی مناسب استفاده شده است. به منظور خوشه‌بندی توان‌های خروجی نیروگاه جزر و مدی به تعداد حالت‌های کمتر، تابع زیر با استفاده از روش مناسب بهینه-سازی می‌گردد.

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m |x_k - v_i| \quad (4)$$

در رابطه فوق x_k داده‌های ارتفاع جزر و مد در ساعت k ام و v_i مرکز کلاستر i ام می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است در این الگوریتم باید تعداد کلاسترها در ابتدای الگوریتم به عنوان ورودی وارد شود. در این مقاله به دنبال روشی هستیم که تعداد بهینه کلاسترها نیز تعیین شود. بدین منظور به ازای تعداد کلاسترها از ۲ تا یک مقدار دلخواه مناسب مقدار تابع هدف رابطه (۴) محاسبه می‌شود. مسلماً هر چه تعداد کلاسترها بیشتر شود مقدار تابع هدف کمتر می‌شود به گونه‌ای که اگر تعداد کلاسترها با تعداد داده‌ها برابر شود مقدار تابع هدف صفر می‌شود. برای تعیین تعداد بهینه کلاسترها، شاخص‌های مختلفی

همچون SE, PC, PE, FS, XB, DI و PCAES ارائه شده است. در این مقاله برای تعیین تعداد بهینه کلاسترها از شاخص XB استفاده می‌کنیم. این شاخص بصورت رابطه (۵) تعریف می‌شود و هنگامی که شاخص XB مینیمم شود تعداد بهینه کلاسترها تعیین می‌شود.

$$XB = \frac{J_m(U, v)}{n \times \min_{i \neq j} (|v_i - v_j|^2)} \quad (5)$$

با استفاده از داده‌های مربوط به توان تولیدی نیروگاه جزر و مدی و اعمال داده‌ها به خوشه‌بندی فازی، تعداد بهینه و احتمال کلاسترها تعیین می‌شود. برای حل مسئله بهینه‌سازی در تکنیک خوشه‌بندی می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرد. مراحل این الگوریتم بصورت زیر می‌باشد.

۱. وارد کردن تعداد کلاسترها و داده‌های مربوطه (این داده‌ها می‌تواند توان خروجی نیروگاه جزر و مدی، یا ارتفاع جزر و مد باشد) و حدس اولیه مرکز کلاسترها (V_k)

۲. شروع تکرار و تنظیم $t=1$

۳. محاسبه تابع عضویت U_{ik}

۴. محاسبه XB , $J_m(u, v)$

۵. اگر شرایط توقف برآورده نشده است $t=t+1$ قرار داده سپس مرکز کلاسترها محاسبه شود و به مرحله ۴ برو.

برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان، داده‌های جزر و مدی حداقل برای یکسال نیاز است. چنانچه داده‌های بیشتر از یک سال داشته باشیم مدل ارائه شده و نتایج آن دقیق‌تر است. یک مدل جامع و دقیق زمانی می‌تواند ارائه شود که داده‌های مربوط به یک دوره ساروسی شامل ۲۲۳ ماه و ۱۱ روز و ۸ ساعت داشته باشیم. دوره ساروسی مدت زمانی است که ماه، خورشید و زمین به حالت اولیه خود باز می‌گردند. در این قسمت، مدل کامل قابلیت اطمینان نیروگاه جزر و مدی مخزنی با در نظر گرفتن نرخ خرابی اجزا و تغییرات توان خروجی ناشی از تغییرات ارتفاع جزر و مد ارائه می‌شود. مدل کامل قابلیت اطمینان نیروگاه جزر و مدی مخزنی دارای P پمپ، m مبدل انرژی، n دریچه و h کلاستر بصورت شکل (۴) می‌باشد. در این مدل زیرنویس $ijklf$ ظرفیت مربوط به f امین کلاستر، i پمپ سالم، j دریچه سالم و k مبدل انرژی سالم می‌باشد. احتمال حالت $ijklf$ بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{ijklf} = \binom{P}{i} A_p^i U_p^{P-i} \binom{m}{j} A_{ecs}^j U_{ecs}^{m-j} \binom{n}{k} A_s^k U_s^{n-k} P_f \quad (6)$$

که A_p , A_{ecs} و A_s بترتیب دسترس‌پذیری پمپ، مبدل انرژی و دریچه می‌باشند. U_p , U_{ecs} و U_s عدم دسترس‌پذیری پمپ، مبدل انرژی و دریچه می‌باشند و P_f احتمال مربوط به کلاستر f می‌باشد.

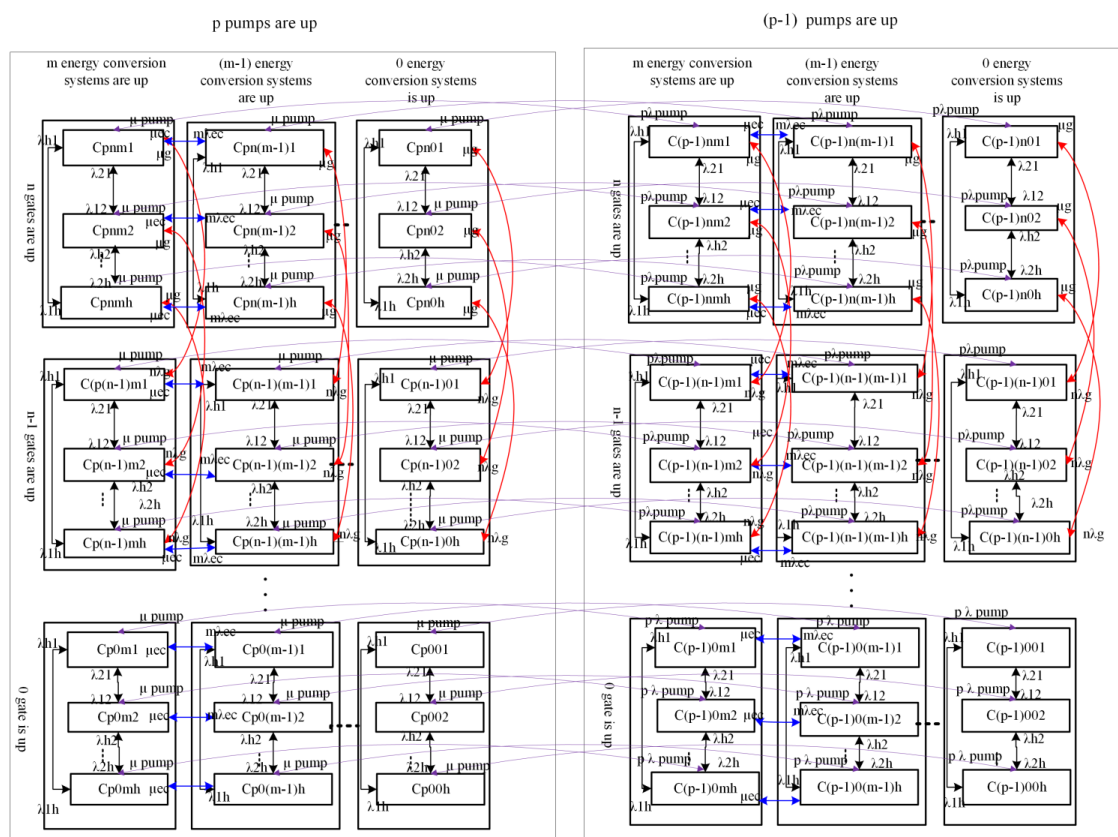
در مدل ارائه شده یکی از چهار حالت زیر رخ می‌دهد:

۱- تغییرات توان تولیدی ناشی از تغییرات ارتفاع آب دریا

۲- خرابی یک دریچه که نرخ گذر از k دریچه سالم به $k-1$ دریچه سالم برابر است با $k\lambda_g$ که $k\lambda_g$ نرخ خرابی دریچه می‌باشد و نرخ گذر از $k-1$ دریچه سالم به k دریچه سالم برابر است با $(n-k)\mu_g$ که μ_g نرخ تعمیر دریچه است.

۳- خرابی یک مبدل انرژی که نرخ گذر از k مبدل انرژی سالم به $k-1$ مبدل انرژی سالم برابر است با $k\lambda_{ec}$ که $k\lambda_{ec}$ نرخ خرابی مبدل انرژی است و نرخ گذر از $k-1$ مبدل انرژی سالم به k مبدل انرژی سالم برابر است با $(m-k)\mu_{ec}$ که μ_{ec} نرخ تعمیر مبدل انرژی است.

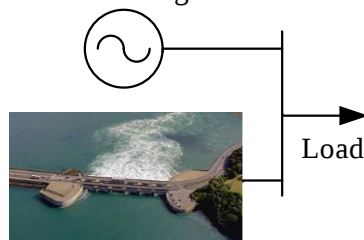
۴- خرابی یک پمپ که نرخ گذر از k پمپ سالم به $k-1$ پمپ سالم برابر با $k\lambda_p$ است که λ_p نرخ خرابی پمپ است و نرخ گذر از $k-1$ پمپ سالم به k پمپ سالم برابر با $\mu_p(p-k)$ است که μ_p نرخ تعمیر پمپ است.



شکل (۴): مدل کامل نیروگاه جزر و مدی مخزنی

در این قسمت، مطالعه قابلیت اطمینان شبکه قدرت شامل نیروگاه جزر و مدی مخزنی به صورت نشان داده شده در شکل (۵) صورت می‌گیرد. سیستم تولید شامل منابع تولید متعارف و نیروگاه جزر و مدی مخزنی با ظرفیت‌های بالا و قابل وصل به شبکه انتقال می‌باشد. به منظور تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان می‌بایست جدول COPT برای واحدهای متعارف تشکیل شود. همان‌گونه که در مدل ارائه شده مشاهده شد واحدهای جزر و مدی را به صورت واحدهای متعارف چند حالتی در نظر می‌گیریم. بنابراین به آسانی جدول COPT مربوط به این واحدها تعیین شده و به جدول ظرفیت واحدهای متعارف اضافه شده و COPT کلی سیستم بدست می‌آید. با ترکیب جدول COPT با مدل بار، شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم محاسبه می‌شود.

Conventional generation



Tidal power plant
equipped to the barrage

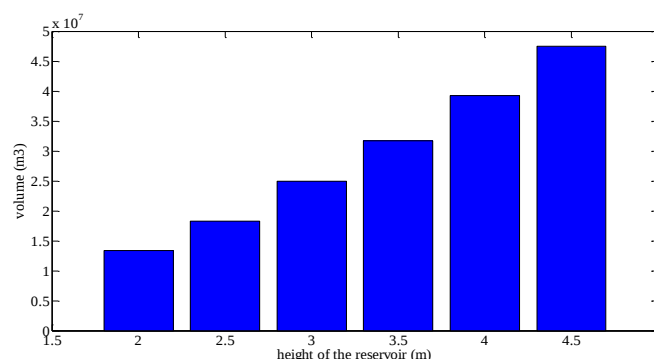
شکل (۵): ارزیابی کفایت قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل نیروگاه جزر و مدی مخزنی

۴- نتایج شبیه سازی

برای مطالعات کفایت سیستم RBTS، در حضور نیروگاه جزر و مدی از یک نیروگاه مخزنی ۱۰ مگاواتی که در باکانگا نصب شده است استفاده می‌کنیم. این نیروگاه شامل ۳ مبدل انرژی، ۲ دریچه و ۱ پمپ با راندمان ۹۰ درصد و دبی ۱۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. با توجه به اینکه مخزن نیروگاه، زیست‌گاه ماهی‌ها و آبیان دریایی است سطح آب درون مخزن نباید کمتر از ۲/۵ متر شود و همچنین با توجه به مسائل اقتصادی، در شرایطی که اختلاف ارتفاع آب مخزن و دریا کمتر از یک متر است تولید توان متوقف می‌شود. پارامترهای قابلیت اطمینان نیروگاه جزر و مدی مخزنی تحت مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. با در نظر گرفتن خرابی اجزا، ۲۴ حالت بدست می‌آید که ۱۲ حالت آن دارای ظرفیت صفر می‌باشد که ۱۳ حالت برای مدل قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود. شکل (۶) رابطه ارتفاع و حجم آب درون مخزن نیروگاه باکانگا می‌باشد.

جدول (۱): پارامترهای قابلیت اطمینان نیروگاه جزر و مدی مخزنی

اجزا	زمان لازم برای تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه (ساعت)	مدت زمان تعمیر (ساعت)
توربین	۲۴۰	۷۲
ژنراتور	۲۴۰	۴۸
مبدل back to back	۲۰	۸
کابل	۷۲ برای هر مایل	۴۸
ترانسفورمر	۱۲۰	۴۸
پمپ	۷۲	۲۴
دریچه	۲۴۰	۴۸



شکل (۶): رابطه بین ارتفاع و حجم آب درون مخزن نیروگاه جزر و مدی مخزنی

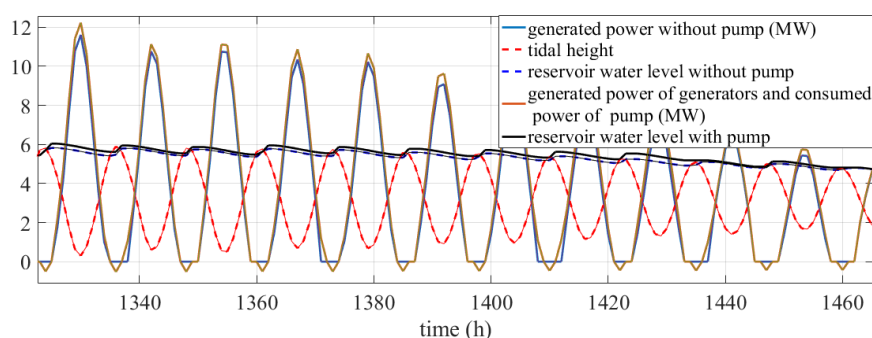
برای بدست آوردن ارتفاع جزر و مد می‌توان از رابطه (۳) استفاده کرد. مشخصات هارمونیک‌های تشکیل دهنده جزر و مد باکانگا در سال ۲۰۱۲ در جدول (۲) ارائه شده است.

ارتفاع جزر و مد و آب درون مخزن و توان تولیدی نیروگاه جزر و مدی با ۳ توربین، ۲ دریچه در حالت عملکرد با ۱ پمپ و بدون پمپ در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود توان تولیدی مقادیر مختلفی دارد که باید با استفاده از روش خوشه بندی فازی آن‌ها را به چند کلاستر کاهش داد. برای کاهش تعداد حالت‌ها، خوشه بندی فازی را می‌توان به ارتفاع جزر و مد یا به توان تولیدی اعمال کرد. اما اعمال خوشه بندی فازی به داده‌های توان خروجی نسبت به داده‌های ارتفاع جزر و مد مناسب‌تر است زیرا توان تولیدی نیروگاه وابسته به اختلاف ارتفاع آب مخزن و دریا است نه ارتفاع جزر و مد. شکل (۸) شاخص XB مربوط به داده‌های ارتفاع جزر و مد را نشان داده است. همانطور که دیده می‌شود شاخص XB برای ۷ کلاستر مینیمم مقدار را دارد بنابراین تعداد کلاسترهای بهینه برای مدل سازی داده‌ها، ۷ کلاستر می‌باشد. شکل (۹) تابع

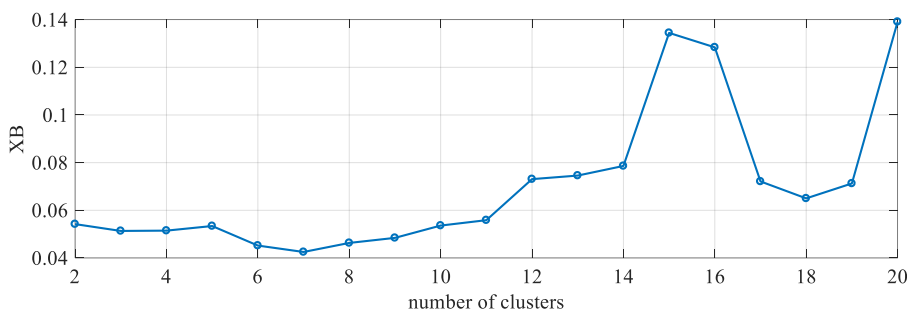
عضویت فازی داده‌های ارتفاع جزر و مد در ۷ کلاستر بدست آمده را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل می‌بینیم توزیع داده‌ها اطراف مرکز کلاستر مناسب بوده و داده پرتی وجود ندارد.

جدول (۲): هارمونیک‌های تشکیل دهنده ارتفاع جزر و مد

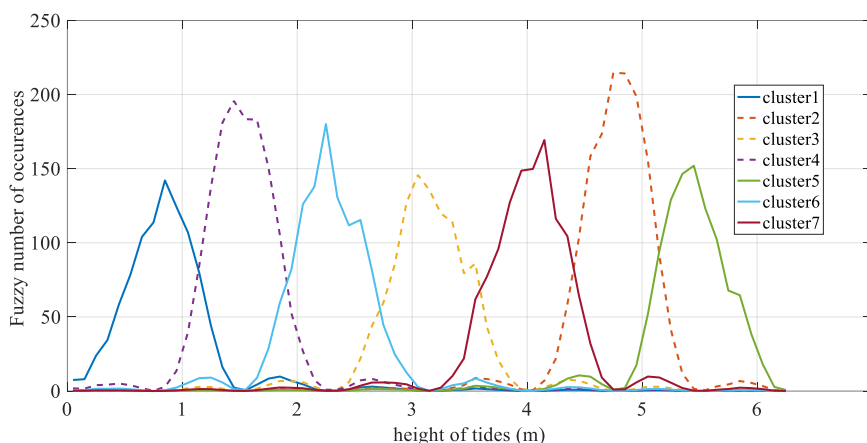
Components	Frequency (cycle/h)	Height (cm)	Phase (degree)
H_0 (mean tide)	0	317.0	0.00
M2	0.08051	210.140	157.6
S2	0.08333	57.932	264.4
N2	0.07900	38.079	80.2
K2	0.08356	16.952	69.0
L2	0.08202	13.849	35.6
K1	0.04178	10.237	71.1
NU2	0.07920	10.149	131.9
O1	0.03873	9.825	343.1
MU2	0.07769	9.342	181.9
2N2	0.07749	7.920	19.4
LDA2	0.08182	5.529	321.6
M4	0.16102	4.907	100.5
SSA	0.00023	4.079	249.1
MSN2	0.08485	3.233	115.7
M6	0.24153	3.188	161.1
EPS2	0.07618	3.121	76.0
2MS6	0.24436	3.101	258.3
P1	0.04155	3.042	73.3
MS4	0.16384	2.413	241.4
OQ2	0.07598	2.140	307.1
M3	0.12077	2.014	74.5
MF	0.00305	1.900	225.4
MKS2	0.08074	1.842	89.2
2MN6	0.24002	1.756	79.6
Q1	0.03722	1.687	264.6
MN4	0.15951	1.432	32.0
MO3	0.11924	1.344	52.5
NO1	0.04027	1.167	341.0
MM	0.00151	1.096	62.2
MSF	0.00282	1.049	305.6
2SM6	0.24718	1.029	356.8



شکل (۷): توان تولیدی نیروگاه جزر و مدی مخزنی، سطح آب درون مخزن و ارتفاع جزر و مد

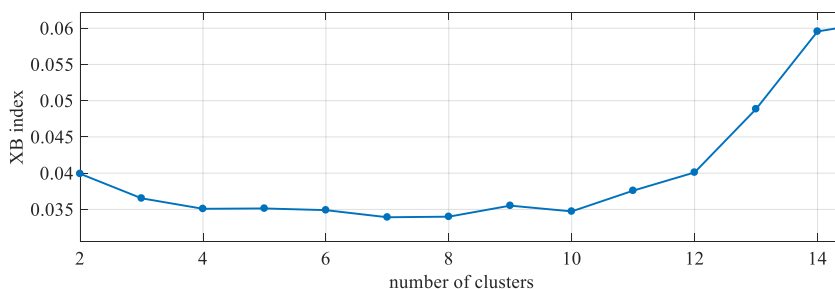


شکل (۸): شاخص XB مربوط به داده‌های ارتفاع جزر و مد بر حسب تعداد کلاسترها



شکل (۹): عضویت فازی داده‌های ارتفاع جزر و مد در کلاسترها

با اعمال خوشه بندی فازی به توان تولیدی نیروگاه جزر و مدی مجهز به پمپ و محاسبه شاخص XB همانطور که در شکل (۱۰) دیده می‌شود تعداد ۷ کلاستر حالت بهینه است بنابراین یک مدل ۷ حالتی ارائه می‌شود. جدول (۳) و (۴) مدل ۷ حالتی نیروگاه جزر و مدی مخزنی مجهز به پمپ و بدون پمپ را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): شاخص XB مربوط به توان تولیدی نیروگاه جزر و مدی مخزنی بر حسب تعداد کلاسترها

جدول (۳): مدل ۷ حالتی نیروگاه جزر و مدی مخزنی مجهز به ۱ پمپ با روش خوشه‌بندی فازی

Capacity (MW)	Probability
-0.1	0.3467
11.0	0.0537
3.3	0.1293

1.6	0.1438
5.0	0.1228
6.8	0.1140
8.7	0.0896

جدول (۴): مدل ۷ حالت نیروگاه جزر و مدی مخزنی بدون پمپ با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی

Capacity (MW)	Probability
1.7	0.1358
0	0.3726
4.9	0.1199
3.3	0.1261
8.5	0.0842
6.6	0.1107
10.8	0.0507

با ترکیب مدل ۷ حالت نیروگاه جزر و مدی بدست آمده از تغییرات توان خروجی با مدل قابلیت اطمینان ۱۳ حالت ناشی از خرابی اجزا مدل کامل نیروگاه جزر و مدی مخزنی با ۹۱ حالت بدست می‌آید. برای کاهش تعداد حالت‌ها، از حالت‌های با احتمال کم صرف نظر کم می‌شود. همچنین حالت‌های با ظرفیت مشابه (به خصوص حالت‌های با ظرفیت صفر) با یکدیگر ادغام می‌شوند. در این بخش مطالعه قابلیت اطمینان سیستم تست RBTS شامل نیروگاه جزر و مدی مخزنی ۱۰ مگاواتی که قبلاً مدل شد صورت می‌گیرد. شبکه RBTS دارای ۲۴۰ مگاوات واحد نصب شده با پیک بار سالیانه ۱۸۵ مگاوات می‌باشد. پارامترهای قابلیت اطمینان سیستم RBTS در جدول (۵) آورده شده است. مدل بار به صورت یک خط مستقیم از ۱۰۰ تا ۶۰ درصد پیک بار در نظر گرفته می‌شود. به منظور انجام مقایسه بین واحدهای متعارف و نیروگاه جزر و مدی مخزنی در مطالعات قابلیت اطمینان پنج حالت به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

حالت اول: سیستم تست RBTS بدون اضافه نمودن واحد جدید

حالت دوم: به سیستم تست RBTS یک واحد متعارف ۱۰ مگاواتی با دسترس پذیری ۰/۹۸ اضافه می‌شود.

حالت سوم: یک نیروگاه جزر و مدی مخزنی ۱۰ مگاواتی مجهز به پمپ به سیستم RBTS اضافه شود.

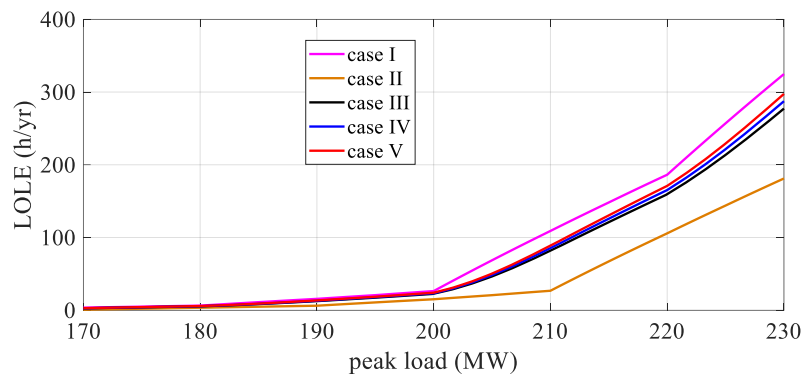
حالت چهارم: یک نیروگاه جزر و مدی مخزنی بدون پمپ ۱۰ مگاواتی به سیستم RBTS اضافه شود.

حالت پنجم: یک نیروگاه جزر و مدی مخزنی ۱۰ مگاواتی بدون پمپ به سیستم RBTS اضافه شود در حالتی که تاثیر خروج برنامه ریزی شده واحد بدلیل تعمیر و نگهداری پیشگیرانه لحاظ شود.

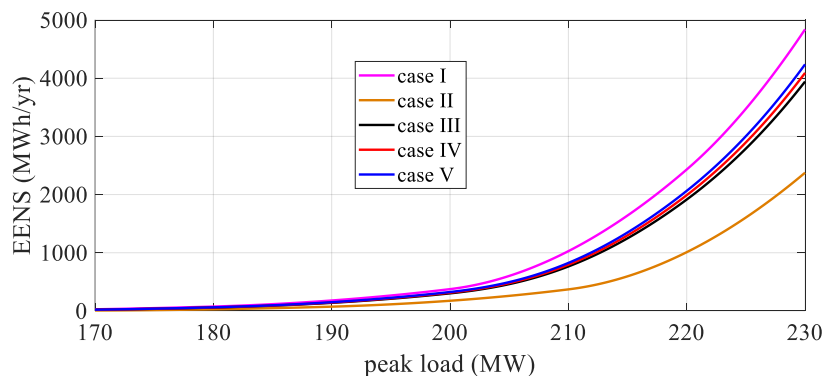
جدول (۵): پارامترهای قابلیت اطمینان سیستم RBTS

Capacity (MW)	Failure rate (occ./yr)	Repair time (h)
40	6	45
40	6	45
10	4	45
20	5	45
5	2	45
5	2	45
40	3	60
20	2.4	55
20	2.4	55
20	2.4	55
20	2.4	55

شاخص های مهم کفایت شامل LOLE و EENS با در نظر گرفتن حداکثر تغییرات پیک بار برای پنج مورد فوق، محاسبه شده و در شکل های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ها دیده می شود قابلیت اطمینان سیستم قدرت با افزایش پیک بار کاهش می یابد. اضافه شدن نیروگاه جزر و مدی مخزنی باعث بهبود شاخص های قابلیت اطمینان می شود اما تغییرات توان تولیدی بدلیل تغییرات ارتفاع جزر و مد موجب می شود این نیروگاه در مقایسه با نیروگاه های متعارف با ظرفیت مشابه، بهبود کمتری در شاخص های قابلیت اطمینان داشته باشد. همانطور که از نتایج حالت های سوم و چهارم مشخص است عملکرد پمپ نه تنها باعث افزایش توان تولیدی می شود بلکه شاخص های قابلیت اطمینان را نیز بهبود می دهد. همانطور که در جدول (۳) دیده می شود در مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزر و مدی مخزنی مرکز یکی از کلاسترها عدد منفی است که بدلیل مصرف توان پمپ الکتریکی در ماکزیمم نقطه مد جهت پمپاژ آب دریا درون مخزن است. با وجود مرکز کلاستر منفی، شاخص های قابلیت اطمینان سیستم RBTS در حضور نیروگاه جزر و مدی مخزنی مجهز به پمپ نسبت به نیروگاه جزر و مدی مخزنی بدون پمپ بهبود یافته است. همچنین در حالت پنجم خروج برنامه ریزی شده اجزا نیروگاه جزر و مدی مخزنی منجر به افزایش نرخ خروج معادل شده است بنابراین شاخص های قابلیت اطمینان سیستم قدرت در حالتیکه نرخ خروج تعمیرات و نگهداری در نظر گرفته می شود کاهش می یابد.



شکل (۱۱): شاخص LOLE سیستم RBTS بر حسب پیک بار برای ارزیابی نیروگاه جزر و مدی مخزنی

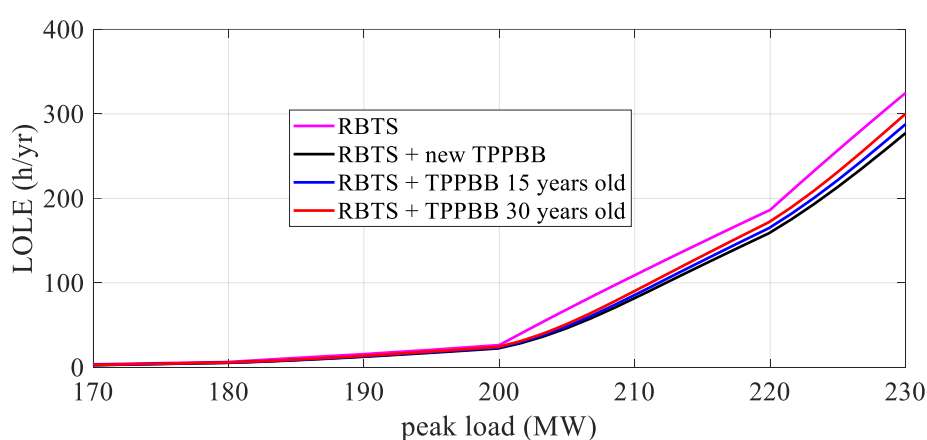


شکل (۱۲): شاخص EENS سیستم RBTS بر حسب پیک بار برای ارزیابی نیروگاه جزر و مدی مخزنی

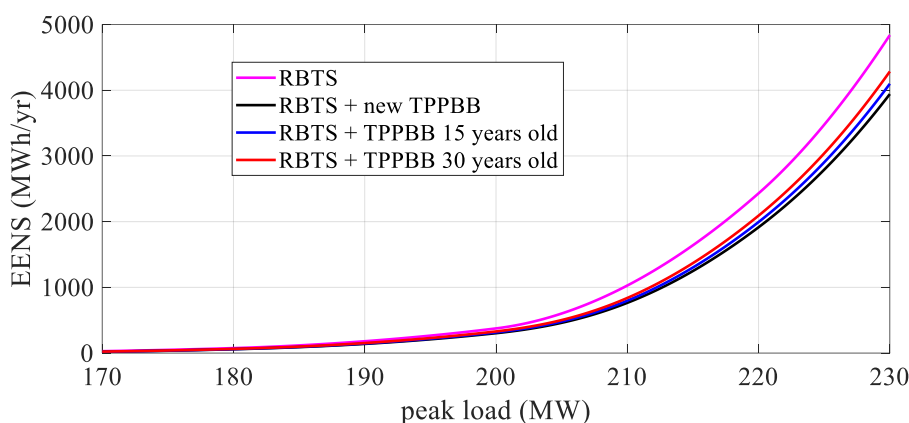
در این قسمت به تاثیر پیری تجهیزات بر روی شاخص های قابلیت اطمینان می پردازیم. با توجه به منحنی وانی شکل، در دوره عمر مفید نرخ خرابی اجزا نیروگاه جزر و مدی مخزنی پس از گذشتن چند سال افزایش می یابد. بنابراین با افزایش نرخ خرابی اجزا تشکیل دهنده نیروگاه جزر و مدی، شاخص های قابلیت اطمینان کاهش می یابد. نرخ خرابی اجزا مختلف نیروگاه جزر و مدی مخزنی پس از گذشت ۱۵ و ۳۰ سال در جدول (۶) ارائه شده است. در شکل های (۱۳) و (۱۴) شاخص های LOLE و EENS سیستم قدرت شامل نیروگاه جزر و مدی تحت مطالعه پس از گذشت ۱، ۱۵ و ۳۰ سال نشان داده شده است.

جدول (۶): نرخ خرابی اجزا مختلف نیروگاه جزر و مدی مخزنی پس از گذشت ۱۵ و ۳۰ سال

نرخ خرابی (تعداد خرابی در سال)		اجزا
۳۰ سال کارکرد	۱۵ سال کارکرد	
۱۳	۶	توربین
۱۰	۴	ژنراتور
۰.۱۲	۰.۰۱۶	مبدل back to back
۰.۰۹۷	۰.۰۱	کابل
۰.۰۱۷	۰.۰۰۸	ترانسفورماتور
۹	۵	پمپ
۱۵	۹	دریچه



شکل (۱۳): محاسبه LOLE با در نظر گرفتن نرخ پیری تجهیزات نیروگاه جزر و مدی مخزنی



شکل (۱۴): محاسبه EENS با در نظر گرفتن نرخ پیری تجهیزات نیروگاه جزر و مدی مخزنی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر پیری تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی بررسی شد. بر همین اساس ابتدا برای نیروگاه جزر و مدی نوع مخزنی یک مدل قابلیت اطمینان تحلیلی که هم نرخ خرابی اجزا تشکیل دهنده این نیروگاه‌ها و هم عدم قطعیت موجود در ارتفاع جزر و مد را در بر می‌گیرد ارائه شد. بر اساس مدل ارائه شده، این نیروگاه‌ها به صورت واحدهای تولید چند حالتی مدل شده و در مطالعات قابلیت

اطمینان استفاده می‌شوند. برای تعیین تعداد حالت‌های مناسب این نیروگاه‌ها، از روش خوشه‌بندی میانگین فازی و شاخص XB استفاده شد. باید دقت داشت که در بدست آوردن این مدل، از داده‌های گذشته ارتفاع جزر و مد استفاده شده است و تعداد حالت‌های مدل به این داده‌ها بستگی دارد. هر چه داده‌های مربوط به تعداد سال‌های بیشتری داشته باشیم مدل ارائه شده دقیق‌تر خواهد بود. مدل بدست آمده به منظور ارزیابی کفایت شبکه تست RBTS با داده‌های ارتفاع جزر و مد در منطقه باکانگا استفاده شد. این ارزیابی نشان داد که استفاده از منابع تجدیدپذیر جزر و مد در مطالعات کفایت شبکه قدرت، شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می‌دهد اما نسبت به واحدهای متعارف با ظرفیت برابر به دلیل عدم قطعیت توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر، تأثیر کمتری در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان دارند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد با سپری شدن زمان بیشتری از عمر تجهیزات تشکیل دهنده این نیروگاه‌ها، نرخ خرابی این تجهیزات بر اساس منحنی وانی شکل افزایش می‌یابد. با زیاد شدن نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه جزر و مدی نوع مخزنی، شاخص‌های متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تامین نشده افزایش یافتند که نشان می‌دهد قابلیت اطمینان سیستم قدرت بدتر می‌شود.

References

مراجع

- [1] T. Adefarati, R. Bansal, "Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources", *Applied Energy*, vol. 236, pp. 1089–1114, Feb. 2019.
- [2] A. J. Harker Steele, J. W. Burnett, J. C. Bergstrom, "The impact of variable renewable energy resources on power system reliability", *Energy Policy*, p. 111947, Feb. 2021.
- [3] K. Zou, Ghulam Mohy-ud-din, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, S. Perera, "Distribution System Restoration With Renewable Resources for Reliability Improvement Under System Uncertainties", *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 67, no. 10, pp. 8438–8449, Oct. 2020.
- [4] A. Nargeszar, A. Ghaedi, M. Nafar, M. Simab, "Reliability evaluation of the renewable energy-based microgrids considering resource variation", *IET Renewable Power Generation*, Oct. 2022.
- [5] V. K. Prajapati, V. Mahajan, "Reliability Assessment and Congestion Management of Power System with Energy Storage System and Uncertain Renewable Resources", *Energy*, p. 119134, Oct. 2020.
- [6] M. Vahedipour-Dahraie, A. Anvari-Moghaddam, J. M. Guerrero, "Evaluation of reliability in risk-constrained scheduling of autonomous microgrids with demand response and renewable resources", *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 6, pp. 657–667, Apr. 2018.
- [7] Emmanuel Hernández Mayoral *et al.*, "A Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources", *Sustainability*, vol. 15, no. 12, pp. 9847–9847, Jun. 2023.
- [8] L. Xiao, K. M. Muttaqi, A. P. Agalgaonkar, "Reliability assessment of modern distribution networks embedded with renewable and distributed resources", *Electric Power Systems Research*, vol. 212, p. 108374, Nov. 2022.
- [9] F. Chiacchio, D. D'Urso, F. Famoso, S. Brusca, J. I. Aizpurua, V. M. Catterson, "On the use of dynamic reliability for an accurate modelling of renewable power plants", *Energy*, vol. 151, pp. 605–621, May 2018.
- [10] N. Sakthivelnathan, A. Arefi, C. Lund, A. Mehrizi-Sani, S.M. Mueen, "Energy storage as a service to achieve a required reliability level for renewable-rich standalone microgrids", *Journal of energy storage*, vol. 77, pp. 109691–109691, Jan. 2024.
- [11] M. J. B. Kabeyi, O. A. Olanrewaju, "Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply", *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, no. 1, Mar. 2022.
- [12] Mohammad Reza Negahdari, Amir Ghaedi, Mehdi Nafar, Mohsen 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, Apr. 2023.
- [13] Mohammad Reza Negahdari, Amir Ghaedi, Mehdi Nafar, S. Mohsen, "Optimal planning of the barrage type tidal power plants equipped to the hydro-pumps", *Electric power systems research*, vol. 220, pp. 109347–109347, Jul. 2023.
- [14] 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.