

Suitable strategy selection for power generation in the barrage type tidal power plant

Younes Mansouri, *MSc*

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

Received: 25 May 2024

Revised: 15 June 2024

Accepted: 02 September 2024

Abstract:

Due to the problem of environmental pollution, one of the causes of which is the burning of fossil fuels such as coal, oil, natural gas, and diesel in traditional power plants such as gas, steam, and combined cycle power plants. In recent years, renewable power plants have enjoyed a great growth to produce electricity in the power grid. Among the different types of renewable power plants, wind power plants, photovoltaic power plants, geothermal power plants, sea wave power plants, flow-type hydropower plants and reservoir-type hydropower plants with large capacity have been put into operation and can be used to produce clean electricity in the power grid. Reservoir-type tidal power plants can be used to generate electricity through the construction of a dam on the sea and the possibility of storing water in a reservoir. Through the valves embedded in the dam wall, water can move between the sea and the reservoir during high tide and generate electricity by passing through the turbines placed in the valves. In order to produce electricity in a tidal power plant, there are three strategies, which are production in ebb, production in flood and two-way production. In this article, these three strategies are examined and the equations related to each of these strategies are determined. Then, a simulation based on tidal height data and the characteristics of a typical reservoir tidal power plant in a site with suitable tidal potential was carried out in order to select the most suitable strategy for electricity generation in the desired area.

Keywords: reservoir-type tidal power plant, operation strategy, ebb-generation mode, flood-generation mode, two-way generation mode.

Corresponding Author: Younes Mansouri

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

انتخاب استراتژی مناسب تولید توان در نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی

یونس منصوری، کارشناسی ارشد

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

چکیده: به دلیل مشکل آلودگی محیط زیست که یکی از دلایل آن سوزاندن سوخت‌های فسیلی نظیر زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و گازوئیل در نیروگاه‌های تولید برق سنتی نظیر نیروگاه‌های گازی، بخار و سیکل ترکیبی بوده است، در سال‌های اخیر نیروگاه‌های تجدیدپذیر از رشد زیادی جهت تولید برق در شبکه قدرت برخوردار بوده‌اند. در بین انواع مختلف نیروگاه‌های تجدیدپذیر، نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک، زمین گرمایی، امواج دریا، جزرومدی نوع جریانی و جزرومدی نوع مخزنی با ظرفیت زیاد به بهره‌برداری رسیده و می‌توانند جهت تولید برق پاک در شبکه قدرت استفاده شوند. نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی از طریق ساخت یک سد بر روی دریا و امکان ذخیره آب در یک مخزن می‌توانند جهت تولید برق استفاده شوند. از طریق دریچه‌های تعبیه شده در دیواره سد، آب می‌تواند در هنگام بروز جزرومد بین دریا و مخزن جابه‌جا شود و با عبور از طریق توربین‌های قرار گرفته در دریچه‌ها برق تولید کند. به منظور تولید برق در نیروگاه جزرومدی مخزنی سه استراتژی وجود دارد که عبارتند از تولید در جزر، تولید در مد و تولید دو طرفه. در این مقاله، این سه استراتژی مورد بررسی قرار گرفته و روابط مربوط به هر کدام از این استراتژی‌ها مشخص می‌گردد. سپس یک شبیه‌سازی بر اساس داده‌های ارتفاع جزرومد و مشخصات یک نیروگاه جزرومدی مخزنی نمونه در یک سایت با پتانسیل جزرومد مناسب صورت گرفته تا مناسبترین استراتژی جهت تولید برق در منطقه مورد نظر انتخاب گردد.

کلمات کلیدی: نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی، استراتژی بهره‌برداری، استراتژی تولید در جزر، استراتژی تولید در مد، استراتژی تولید دو طرفه.

نام نویسنده‌ی مسئول: یونس منصوری

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

۱- مقدمه

امروزه به دلیل مسائل زیست محیطی کشورهای مختلف دنیا به منظور تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر باد، خورشید، جزرومد، امواج، زیست توده و انرژی زمین گرمایی استفاده می‌کنند. انرژی جزرومد یک نمونه از انرژی اقیانوس بوده که به دلیل نیروی جاذبه گرانشی بین ماه و زمین و تا حدی نیروی گرانشی بین خورشید و زمین ایجاد می‌شود. به منظور استفاده از این انرژی جهت تولید برق دو روش وجود دارد. یکی استفاده از توربین‌های جزرومدی نوع جریان است. در این روش به مانند توربین‌های بادی که از توده هوای متحرک برق تولید می‌کنند، توربین‌های جزرومدی جریانی نیز در اعماق اقیانوس در مکان‌هایی که جریان‌های جزرومدی وجود دارند نصب می‌شوند. وجود جریان‌های جزرومدی سبب چرخش این توربین‌ها شده و برق تولید می‌گردد. روش دوم در نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی استفاده می‌شود. در این نیروگاه‌ها یک سد بین دریا و مخزن ذخیره آب احداث می‌شود. در دیواره این سد، دریچه‌هایی وجود دارد که سبب می‌شوند آب بتواند بین دریا و مخزن در هنگام جزرومد جابجا شود. جابجایی آب بین دریا و مخزن از طریق دریچه‌های مجهز به توربین سبب چرخش توربین و تولید برق می‌گردد. با توجه به رشد استفاده از این نیروگاه‌ها در سیستم قدرت مطالعه جنبه‌های مختلف آن‌ها اهمیت دارد. در [1] چگونگی بهبود توان الکتریکی تولیدی این نیروگاه‌ها به روش‌های مختلف بیان شده است. یکی از این روش‌ها بهینه‌سازی مشخصات نیروگاه جزرومدی در فاز طراحی و تعیین مقادیر بهینه تعداد توربین‌ها، تعداد دریچه‌ها، عرض دریچه‌ها و قطر توربین‌ها می‌باشد. روش دیگر تعیین تعداد توربین‌ها و دریچه‌ها در هنگام بهره‌برداری نیروگاه می‌باشد. استفاده از پمپ نیز به منظور افزایش هد آب عبوری از توربین از دیگر روشی است که در این مقاله جهت بهبود توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی پیشنهاد شده است. در [2] ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی در بخش کفایت صورت گرفته است. در این مقاله از روش تحلیلی استفاده شده و یک مدل قابلیت اطمینان که هم خرابی تجهیزات تشکیل دهنده و هم تغییرات توان الکتریکی ناشی از تغییرات ارتفاع جزرومد را در نظر می‌گیرد برای این نیروگاه‌ها به دست آمده است. مقاله [3] تاثیر تغییرات ارتفاع جزرومد را بر نرخ خرابی تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه جزرومدی مخزنی در نظر می‌گیرد و بر این اساس شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه قدرت با حضور این نیروگاه‌ها را محاسبه می‌نماید. تجهیزات اصلی تشکیل دهنده نیروگاه که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته‌اند عبارتند از: ساختار اصلی نیروگاه، دریچه‌ها، توربین، ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، ترانسفورماتور و کابل. در [4] مطالعه نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به این نیروگاه‌ها انجام شده است. در این مقاله توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی با در نظر گرفتن محدودیت‌های شامل مینیمم ارتفاع آب درون مخزن، ماکزیمم ارتفاع آب درون مخزن، مینیمم هد آب مورد نیاز جهت تولید برق در توربین و بازده تجهیزات تشکیل دهنده محاسبه شده است. در [5] تاثیرات زیست محیطی مربوط به نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی مورد مطالعه قرار گرفته است. نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی به دلیل اینکه از سوخت‌های فسیلی استفاده نمی‌کنند آلودگی مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای را به دنبال ندارند اما به دلیل تغییر زیستگاه موجودات دریایی تاثیر بسیار کمی بر این موجودات دریایی دارند. مقاله [6] میزان انرژی سالانه یک نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی که در کشور انگلستان احداث خواهد شد را تخمین زده است. در این مقاله به کمک دو روش، یکی روش تحلیلی مبتنی بر روابط هیدرودینامیکی و دوم روش عددی مبتنی بر مدل دویعدی این نیروگاه‌ها، انرژی تولیدی سالانه این نیروگاه‌ها محاسبه شده است. در [7] میزان توان تولیدی نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی بر اساس روابط توان این نیروگاه‌ها به دست آمده است. در این نیروگاه‌ها به دلیل اینکه هد آب عبوری از توربین‌ها نیروگاه کم است، توربین‌های به کار رفته در نیروگاه باید بتوانند در هدهای پایین آب، برق تولید کنند. در [8] آنالیز اقتصادی نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی که در کشور چین نصب می‌گردد صورت گرفته است. به منظور انجام مطالعه امکان‌سنجی استفاده از نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی باید تحلیل اقتصادی این نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن میزان توان و انرژی تولیدی آن‌ها انجام شود. مقاله [9] چگونگی توسعه نیروگاه‌های جزرومدی را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله اساس نیروگاه جزرومدی مخزنی بررسی شده و نیروگاه‌های جزرومدی لارنس فرانسه که ظرفیت تولید ۲۴۰ مگاوات توان الکتریکی و همچنین نیروگاه سیهوا واقع در کره جنوبی که توان نامی ۲۵۴ مگاوات را تولید می‌کند مورد مطالعه قرار گرفته است. در [10] بزرگترین نیروگاه جزرومدی مخزنی جهان که بر روی رودخانه سیهوا کره

جنوبی نصب شده است مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات این نیروگاه، استراتژی تولید برق در آن و میزان توان تولیدی آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

در [11] با استفاده از روش عددی پتانسیل انرژی جزرومدی در برزیل به دست آمده است. در این مقاله مشخص شده است که ارتفاع جزرومد بین ۴ و ۵ متر دارای فرکانس رخداد بیش از ۲۰ تا ۳۰ درصد می‌باشد. همچنین توان تولیدی سالانه نیروگاه-های مخزنی پیشنهادی بیشتر از نیروگاه لارنس فرانسه به دست آمده است. در [12] روش‌های مختلف بهبود توان تولیدی نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله روش‌هایی به مانند پمپ نمودن آب در هنگام پر شدن مخزن ذخیره آب و افزایش ارتفاع آب درون مخزن و استفاده از لاگون‌های جزرومدی مورد مطالعه قرار گرفته است. در [13] مدلسازی و تحلیل ساختار افقی فنس‌های جزرومدی مورد استفاده در نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی صورت گرفته است. برای این منظور از جریان عبوری از دریچه‌ها و توربین بای پس شده است. با توجه به مقالات مرور شده، مطالعه نیروگاه-های جزرومدی نوع مخزنی و تعیین توان تولیدی آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. به منظور تولید برق از این نیروگاه‌ها سه استراتژی تولید بر مد، تولید در جزر و تولید دو طرفه وجود دارد. در این مقاله میزان توان و انرژی تولیدی این سه استراتژی برای یک نیروگاه جزرومدی مخزنی به دست آورده می‌شود. بنابراین نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

- به دست آوردن توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی در استراتژی‌های مختلف تولید توان شامل تولید در جزر، تولید در مد و تولید دو طرفه.

- تعیین استراتژی مناسب تولید توان الکتریکی در نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی

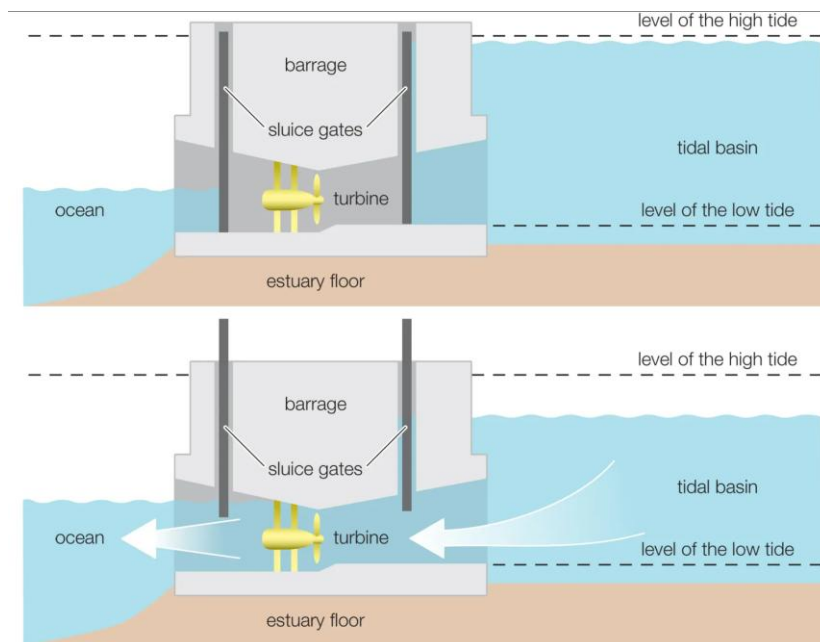
بر همین اساس سازماندهی این مقاله به صورت زیر است. در بخش دوم نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی و استراتژی‌های تولید برق در آن‌ها بیان می‌گردد. بخش سوم روابط مربوط به توان تولیدی نیروگاه را بیان نموده و شبیه‌سازی یک نیروگاه جزرومدی مخزنی نمونه در بخش چهارم آورده می‌شود. نتیجه‌گیری مقاله نیز در بخش پنجم بیان می‌گردد.

۲- نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی

در شکل ۱ ساختار یک نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی نشان داده شده است [14]. در نیروگاه جزرومدی مخزنی یک سد بین دریا و مخزن ذخیره آب احداث می‌گردد و در دیواره این سد تعدادی دریچه که امکان عبور آب از درون آن‌ها وجود داشته باشد تعبیه می‌گردد. در شرایط بروز جزر و مد آب می‌تواند از طریق این دریچه‌ها بین دریا و مخزن ذخیره آب جابه‌جا گردد. در برخی از این دریچه‌ها توربین‌هایی قرار داده می‌شود که در زمان عبور آب از آن‌ها به چرخش درمی‌آیند. محور این توربین‌ها به محور ژنراتور کوپل شده و با چرخش توربین و ژنراتور برق تولید می‌شود. برق تولیدی نیروگاه برای اینکه بتواند به شبکه قدرت منتقل شود باید ولتاژ و فرکانسش به مقدار مناسب شبکه تبدیل شود. بنابراین در ساختار نیروگاه جزرومدی مخزنی نیاز به مبدل الکترونیک قدرت و ترانسفورماتور می‌باشد. به منظور انتقال برق تولیدی نیروگاه به شبکه قدرت نیز معمولاً از کابل استفاده می‌شود.

یک نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی می‌تواند در سه استراتژی برق تولید کند [15]: استراتژی تولید در جزر، استراتژی تولید در مد و استراتژی تولید دو طرفه که هم در جزر و هم در مد برق تولید می‌کند. در استراتژی تولید در جزر کارکرد نیروگاه به صورت زیر است: در هنگام بروز مد که آب دریا در حال بالا آمدن است دریچه‌های واقع در دیواره سد که فاقد توربین هستند باز شده و آب از دریا به سمت مخزن حرکت می‌کند و آن را پر می‌کند. پس از پایان مد دریچه‌ها بسته شده و امکان خروج آب از مخزن تا بسته بودن دریچه‌ها وجود ندارد. زمانی که جزر اتفاق می‌افتد و آب دریا در حال پایین آمدن است پس از اینکه اختلاف ارتفاع آب درون مخزن و آب دریا از یک مقدار مشخص بیشتر شد دریچه‌هایی که مجهز به توربین هستند باز شده و آب می‌تواند از مخزن به سمت دریا از طریق دریچه‌های دارای توربین عبور کند. بنابراین در این شرایط ضمن تخلیه شدن مخزن ذخیره آب، برق نیز تولید می‌شود. پس از پایان جزر و تخلیه مخزن ذخیره این دریچه‌ها نیز بسته شده و به همین صورت به صورت متناوب در هنگام مد مخزن پر و در هنگام جزر خالی شدن مخزن برق تولید می‌گردد. در استراتژی دوم که تولید در مد می‌باشد نیروگاه به صورت زیر کار می‌کند: در هنگام مد که آب دریا در حال بالا آمدن است زمانی که اختلاف آب دریا و آب درون مخزن از یک مقدار مشخص بیشتر می‌شود دریچه‌های دارای توربین باز می‌شوند. بنابراین آب

ضمن عبور از این دریچه‌ها و پر کردن مخزن ذخیره، با عبور از توربین برق تولید می‌کند. پس از پایان یافتن مد دریچه‌های دارای توربین بسته می‌شوند. در هنگام بروز جزر نیز دریچه‌های فاقد توربین باز می‌شوند و با عبور آب از طریق این دریچه‌ها مخزن تخلیه می‌شود. این روند نیز به طور متناوب تکرار می‌گردد. در استراتژی سوم که استراتژی تولید دو طرفه نام دارد در تمام دریچه‌ها توربین قرار دارد. زمانی که مد اتفاق می‌افتد و اختلاف آب دریا و ارتفاع آب درون مخزن از یک مقدار مشخص بیشتر می‌شود دریچه‌های دارای توربین باز شده و آب ضمن عبور از این دریچه‌ها هم مخزن را پر می‌کند و هم برق تولید می‌شود. در هنگام جزر نیز زمانی که اختلاف ارتفاع آب درون مخزن و آب دریا از یک مقدار مشخص بیشتر باشد باز دریچه‌های دارای توربین باز شده و آب ضمن عبور از این دریچه‌ها و تخلیه مخزن، برق تولید می‌کند.



شکل (۱): ساختار نیروگاه جزرومدی مخزنی

۳- روابط توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی

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 (معمولا 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. همانگونه که گفته شد 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.

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

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 پایان‌نامه ۶۸ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود، پارامترهای $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ بدون بعد بوده و به ترتیب برای توربین کاپلان در نظر گرفته شده در پایان‌نامه ۰/۹۰۵، ۶، ۱/۳۳۳ و ۳/۵ می‌باشند. نرخ انتقال آب از طریق توربین نیز توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$q_T = \frac{\pi}{4} (D_{tip}^2 - D_{hub}^2) v_f \quad (۳)$$

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 پایان‌نامه 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:

$$v_f = \sqrt{2g(H_R - H_{TD})} \quad (۴)$$

البته در رابطه فوق فرض شده است که نیروگاه جزومدی 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 افتاد و آب در حال بالا آمدن است می‌خواهد مخزن ذخیره را پر کند آورده شده است.

$$q_S = H_R W_S \sqrt{\frac{2g(H_{TD} - H_R)}{1 - \frac{H_R}{H_{TD}}}} \quad (۵)$$

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.

۴- نتایج شبیه‌سازی

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.

$$H_{TD}(t) = H_0 + \sum_{k=1}^n H_k \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (۶)$$

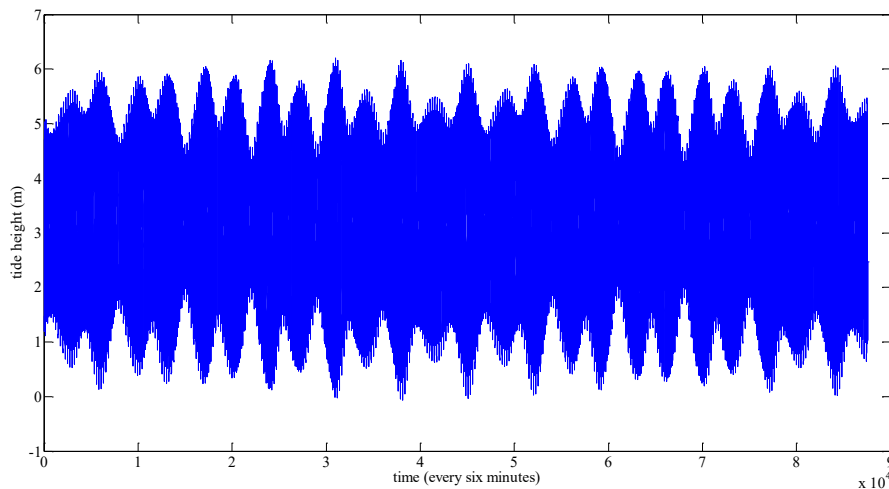
در رابطه ۶ $H_{TD}(t)$ ارتفاع آب هنگام جزرومد در زمان t ، ω_k فرکانس مربوط به هارمونیک k ام بر حسب سیکل در ساعت، H_k ارتفاع یا دامنه مربوط به هارمونیک k ام جزرومد بر حسب متر، θ_k فاز مربوط به هارمونیک k ام بر حسب درجه و H_0 دامنه مولفه DC جزرومد می‌باشد. با ثبت داده‌های مربوط به ارتفاع آب ناشی از جزرومد 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 هارمونیکی این تغییرات بدست می‌آید که در جدول ۱ مولفه‌های هارمونیکی، فرکانس مربوطه بر حسب سیکل در ساعت، ارتفاع بر حسب سانتیمتر و فاز آن‌ها بر حسب درجه آورده شده است [16].

جدول (۱): مولفه‌های هارمونیکی مربوط به ارتفاع جزرومد در منطقه باکانگا در سال ۲۰۲۰

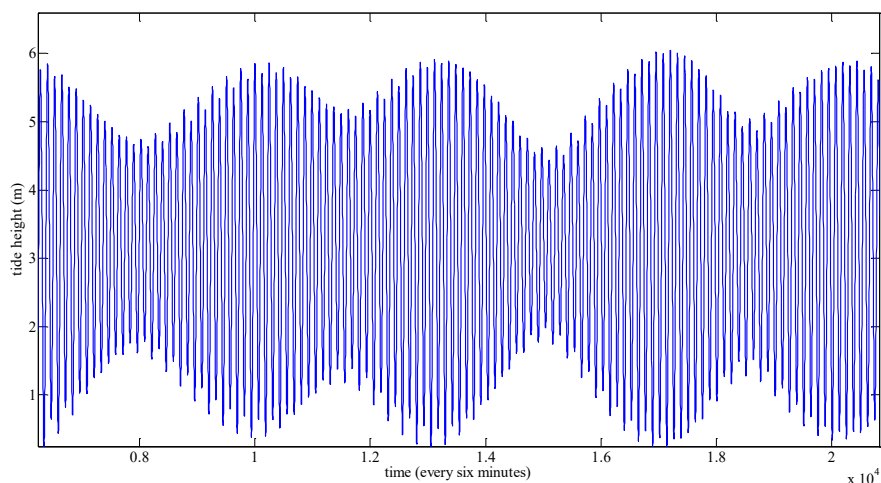
components	Frequency (cycle/h)	Height (cm)	Phase (degree)
H_0 (mean tide)	0	317.0	0.00
M2	0.08051	210.140	157.6
S2	0.08333	57.932	264.4
N2	0.07900	38.079	80.2
K2	0.08356	16.952	69.0
L2	0.08202	13.849	35.6
K1	0.04178	10.237	71.1
NU2	0.07920	10.149	131.9
O1	0.03873	9.825	343.1
MU2	0.07769	9.342	181.9
2N2	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

در شکل ۲ ارتفاع آب دریا که مربوط به بروز جزرومد در منطقه باکانگای برزیل است نشان داده شده است. البته به منظور وضوح بیشتر چندین شکل که بزرگنمایی شکل اولیه می‌باشد نیز آورده شده است. 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

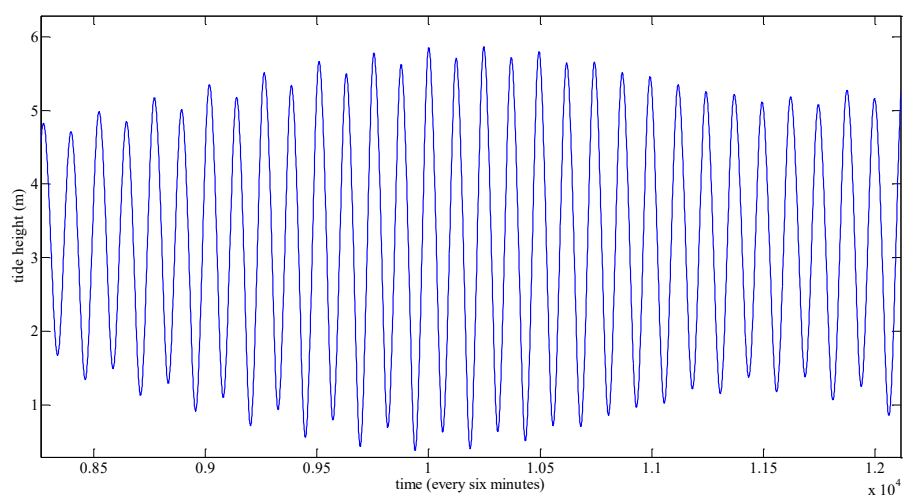
در مخزن و ارتفاع آب در آن از روابط باتیمتریک تعیین می‌شود که با توجه به مخزن باکانگا رابطه بین حجم و ارتفاع مخزن ذخیره به صورت نشان داده شده در شکل ۳ خواهد بود. در این قسمت سه استراتژی تولید در جزر، تولید در مد و تولید دوطرفه در نظر گرفته شده و میزان توان تولیدی نیروگاه جزرومدی در این سه استراتژی در طول یک سال بر اساس روابط بیان شده در بخش قبل تعیین 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 دریاچه‌ها بسته و سطح آب مخزن در مقدار ۴/۵ متر ثابت نگه داشته می‌شود. بازده ژنراتور نیز ۹۰ درصد فرض شده است. در شکل ۴ توان تولیدی مربوط به هر سه استراتژی نیروگاه جزرومدی شامل تولید در جزر، تولید در مد و تولید دوطرفه نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است دامنه توان تولیدی در استراتژی تولید در جزر از دو استراتژی دیگر بیشتر بوده و همچنین در استراتژی تولید در مد دامنه توان تولیدی از استراتژی تولید برق دو طرفه بیشتر می‌باشد. اما مدت زمانی که نیروگاه به تولید برق می‌پردازد در استراتژی تولید دوطرفه از دو استراتژی دیگر بیشتر می‌باشد.



(الف)

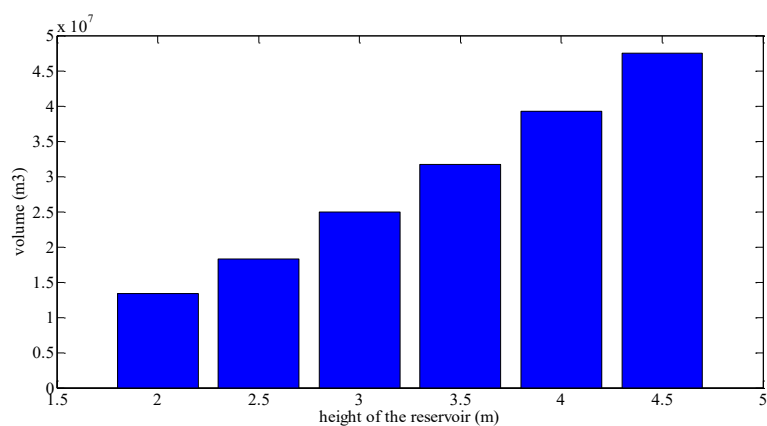


(ب)

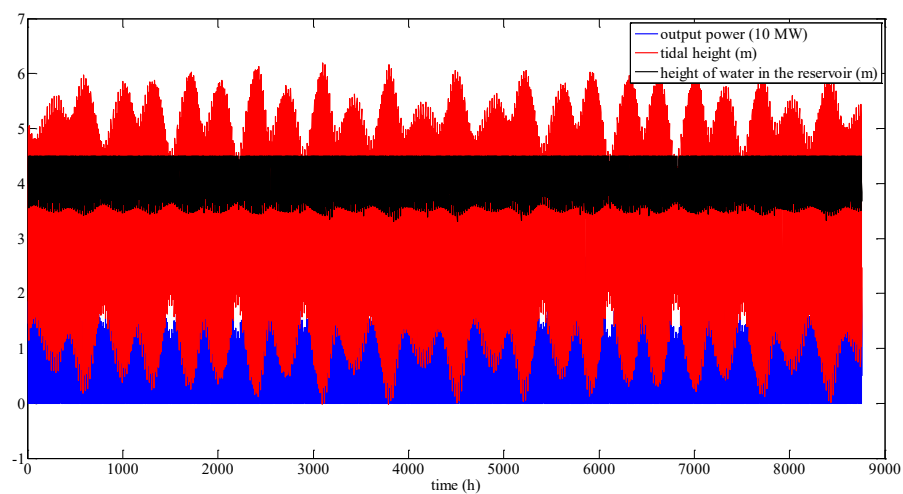


(ج)

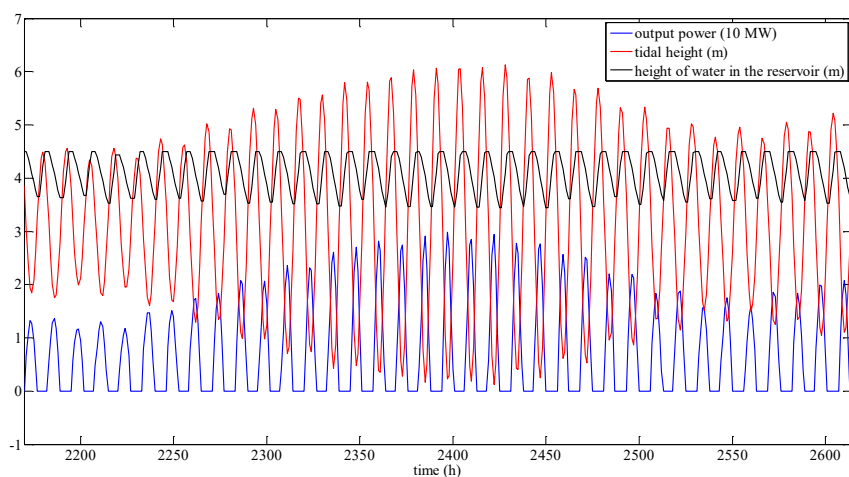
شکل (۲): الف) ارتفاع آب دریا در هنگام بروز جزرومد در رودخانه باکانگا در سال ۲۰۲۰ ب) و ج) بزرگنمایی شکل اولیه



شکل (۳): رابطه بین حجم و ارتفاع آب در مخزن ذخیره

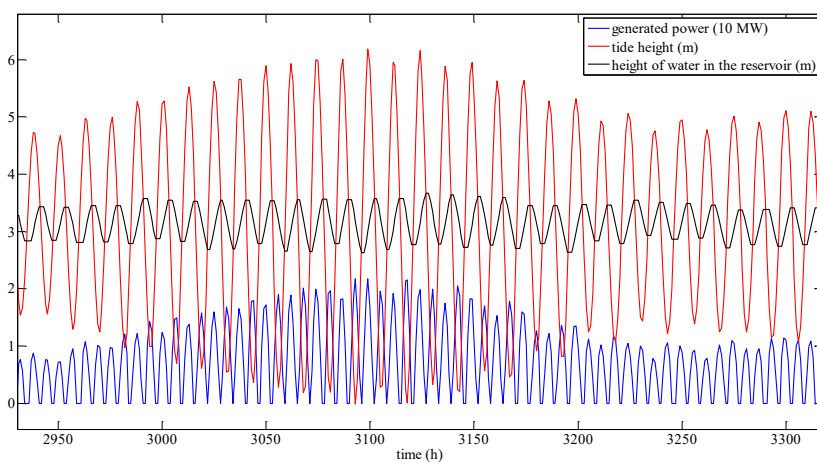
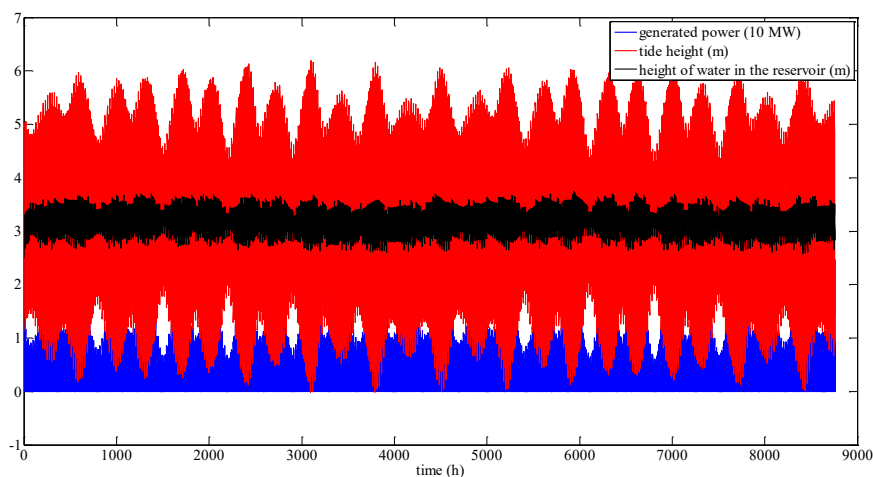


(الف)



(ب)

شکل (۴: الف و ب) ارتفاع جزرومد، ارتفاع آب درون مخزن و توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی در حالت تولید در جزر

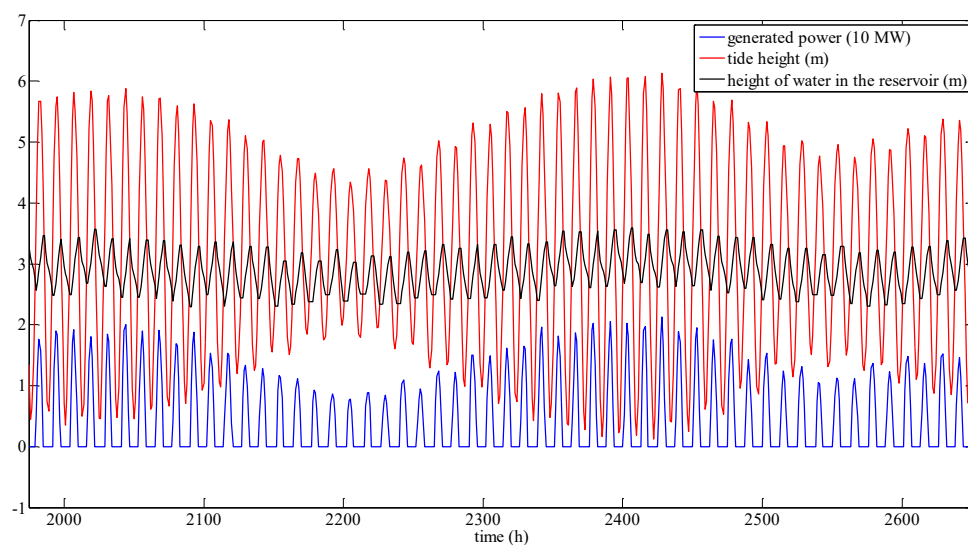
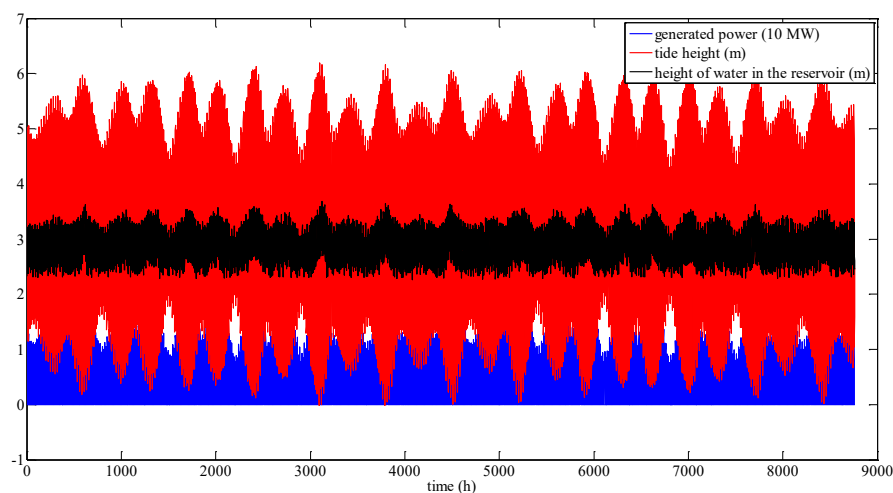


شکل (۵): ارتفاع جزرومد، ارتفاع آب درون مخزن و توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی در حالت تولید دو طرفه

به منظور مقایسه این سه استراتژی میزان انرژی تولیدی در طول سال و همچنین مدت زمان تولید توان نیروگاه برای سه استراتژی محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است. همانگونه که در این جدول مشخص است زمانی که نیروگاه در استراتژی تولید در جزر کار می‌کند میزان انرژی تولیدی در سال نسبت به دو حالت دیگر بیشتر می‌باشد. همچنین در استراتژی کارکرد نیروگاه به صورت تولید در جزر و مد انرژی تولیدی نسبت به حالت تولید در مد بیشتر است. بنابراین مقرون به صرفه‌تر این است که نیروگاه در استراتژی تولید در جزر کار کند و به همین دلیل است که بیشتر نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی به صورت تولید در جزر کار می‌کنند.

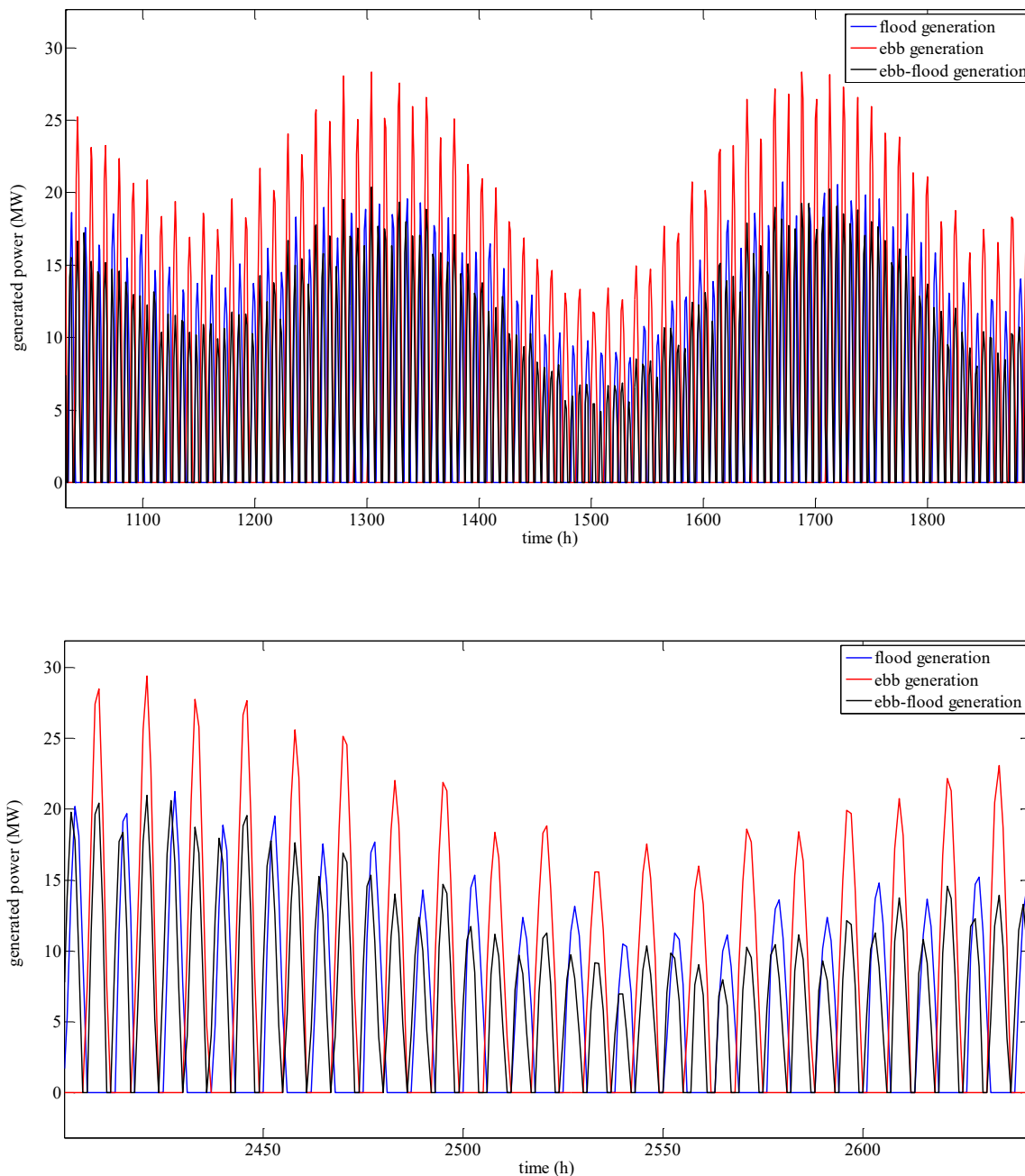
جدول (۲): انرژی تولیدی و مدت زمان تولید برق نیروگاه جزرومدی در سه استراتژی کاری نیروگاه

استراتژی‌ها	انرژی (کیلووات ساعت در سال)	مدت زمان کارکرد (ساعت)	درصد زمان کارکرد
تولید در جزر	۶۰/۱۳۷	۴۱۹۱	۴۷/۹۱
تولید در مد	۳۷/۸۶۲	۳۴۸۰	۳۹/۷۳
تولید دو طرفه	۵۹/۰۱۶	۵۹۲۶	۶۷/۶۵



شکل (۶): ارتفاع جزرومد، ارتفاع آب درون مخزن و توان تولیدی نیروگاه جزرومدی مخزنی در حالت تولید در مد

در شکل ۷ نیز توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مورد مطالعه در هر سه استراتژی نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است دامنه توان تولیدی در استراتژی تولید در جزر از دو استراتژی دیگر بیشتر بوده و همچنین در استراتژی تولید در مد دامنه توان تولیدی از استراتژی تولید برق دو طرفه بیشتر می‌باشد. اما مدت زمانی که نیروگاه به تولید برق می‌پردازد در استراتژی تولید دوطرفه از دو استراتژی دیگر بیشتر می‌باشد.



شکل (۷): مقایسه توان تولیدی نیروگاه جزرومدی در سه استراتژی بیان شده

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله استراتژی‌های مختلفی که به منظور تولید برق در نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد بررسی گردید. ابتدا نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی، ساختار آن‌ها به همراه تجهیزات تشکیل دهنده و روابط توان تولیدی آن‌ها بررسی گردید. میزان توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی به هد آب عبوری از توربین بستگی دارد. به علاوه

نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی دارای محدودیت‌هایی می‌باشند که در هنگام تعیین توان باید به آن‌ها توجه داشت. این محدودیت‌ها عبارتند از: ارتفاع آب درون مخزن از یک مقدار مینیمم نباید کمتر شود، ارتفاع آب درون مخزن ذخیره آب از یک مقدار ماکزیمم نباید بیشتر شود، برای تولید برق در توربین باید هد آب از یک مقدار مینیمم بیشتر شود، تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه شامل توربین و ژنراتور دارای تلفات هستند و بازده آن‌ها از ۱۰۰ درصد کمتر است. در این مقاله شبیه‌سازی یک نیروگاه جزرومدی مخزنی نمونه با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها و در استراتژی‌های تولید در جزر، تولید در مد و تولید دو طرفه (هم در جزر و هم در مد) انجام و توان تولیدی نیروگاه محاسبه گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد دامنه توان تولیدی در استراتژی تولید در جزر از دو استراتژی دیگر بیشتر بوده و همچنین در استراتژی تولید در مد دامنه توان تولیدی از استراتژی تولید برق دو طرفه بیشتر می‌باشد. اما مدت زمانی که نیروگاه به تولید برق می‌پردازد در استراتژی تولید دوطرفه از دو استراتژی دیگر بیشتر می‌باشد.

۶-تشکر و قدردانی

نویسنده از آقای دکتر امیر قائدی، 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, 2021.
- [2] 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.
- [3] 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, p. e12477, 2020.
- [4] R. M. Ferreira and S. F. Estefen, "Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions", *Renewable Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1151-1157, 2009.
- [5] J. Wolf et al., "Environmental impacts of tidal power schemes", *Proc. Inst. Civ. Eng. - Maritime Engineering*, vol. 162, no. 4, pp. 165-177, 2009.
- [6] J. Xia et al., "Estimation of annual energy output from a tidal barrage using two different methods", *Applied Energy*, vol. 93, pp. 327-336, 2012.
- [7] S. M. Noman et al., "Tidal power plant exploration: Low head water turbine in barrage system", in *Proc. 13th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. (ICCCNT)*, 2022, pp. 1-6.
- [8] L. X. Zhang et al., "Integrated emergy and economic evaluation of a case tidal power plant in China", *J. Cleaner Prod.*, vol. 182, pp. 38-45, 2018.
- [9] A. Boretti, "Trends in tidal power development", *E3S Web Conf.*, vol. 173, p. 02004, 2020.
- [10] Y. H. Bae, K. O. Kim, B. H. Choi, "Lake Sihwa tidal power plant project", *Ocean Engineering*, vol. 37, no. 5-6, pp. 454-463, 2010.
- [11] A. L. Aguiar et al., "Numerical assessment of tidal potential energy in the Brazilian Equatorial Shelf", *Renewable Energy*, vol. 220, p. 119684, 2024.
- [12] D. Vandercruyssen et al., "Tidal range electricity generation into the twenty-second century", *Proc. Inst. Civ. Eng. - Energy*, pp. 1-9, 2023.
- [13] M. C. Verbeek et al., "Modelling and analysis of the horizontal configuration of tidal fences in barrages", *Renewable Energy*, vol. 222, p. 119929, 2024.
- [14] A. Etemadi et al., "Electricity generation by the tidal barrages", *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 928-935, 2011.
- [15] J. Xia, R. A. Falconer, B. Lin, "Impact of different operating modes for a Severn Barrage on the tidal power and flood inundation in the Severn Estuary, UK", *Applied Energy*, vol. 87, no. 7, pp. 2374-2391, 2010.
- [16] S. L. Lima et al., "Bacanga tidal plant project: Conception and perspectives (in Portuguese)", in *Proc. 5th Latin-Amer. Congr. Electr. Gener. Transm.*, 2003, pp. 1-6.