

## Reliability evaluation of Salter Duck

Ali Asghar Beigi, *MSc*

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran  
amirmohammad13616692@gmail.com

Received: 05 May 2025

Revised: 24 June 2025

Accepted: 29 June 2025

### Abstract:

Oil, natural gas, coal, etc. are among the fossil fuels that cause environmental pollution when burned. In addition, these fuels will run out one day and alternative fuels must be sought. These problems have caused many countries in the world to use alternative energies, especially renewable energies. Energies such as wind, sun, ocean and geothermal are among the renewable energies that have been used worldwide to generate electricity. Ocean energy also has different types, including tidal energy, sea waves, ocean thermal energy and seawater salinity gradient. So far, various power plants have been built that use the energy of sea waves to generate electricity. The Salter duck power plant is one of the power plants that uses the kinetic energy of sea waves to generate electricity. This power plant has one drawback, which is that the power it produces changes over time, because its power depends on the height and periodicity of the waves. Because the height and period of waves change over time, their generated power also changes. The change in the generated power of the Salter duck power plant affects the problem of power grid reliability. In this paper, the reliability of the power grid with the presence of the Salter duck power plant is studied.

**Keywords:** Wave power plant, Salter duck power plant, reliability, renewable power plant, ocean energy

**Corresponding Author:** Ali Asghar Beigi

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

## آنالیز قابلیت اطمینان اردک سلتر

علی اصغر بیگی

دانشکده مهندسی برق، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران  
amirmohammad13616692@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۳

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

**چکیده:** نفت، گاز طبیعی، زغال سنگ و ... از جمله سوخت‌های فسیلی هستند که با سوزانده شدن سبب آلودگی محیط زیست می‌شوند. به علاوه این سوخت‌ها روزی تمام می‌شوند و باید به دنبال سوخت‌های جایگزین بود. این مشکلات سبب شده است کشورهای زیادی در جهان از انرژی‌های جایگزین به ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده کنند. انرژی‌هایی به مانند باد، خورشید، اقیانوس و زمین‌گرایی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر هستند که در سطح جهان به منظور تولید برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. انرژی اقیانوس نیز انواع مختلفی دارد که شامل انرژی‌های جزرومد، امواج دریا، انرژی حرارتی اقیانوس و گرادیان شوری آب دریا می‌باشد. تاکنون نیروگاه‌های مختلفی ساخته شده است که از انرژی امواج دریا جهت تولید برق استفاده می‌کند. نیروگاه اردک سلتر یکی از نیروگاه‌هایی است که از انرژی جنبشی امواج دریا برای تولید برق استفاده می‌کند. این نیروگاه دارای یک ایراد است و آن این است که توانی که تولید می‌کند در طول زمان با تغییر همراه است، چرا که توان آن به ارتفاع و دوره تناوب امواج وابسته است. چون ارتفاع و دوره تناوب امواج در طول زمان با تغییر همراه است توان تولیدی آن نیز تغییر می‌کند. تغییر توان تولیدی نیروگاه اردک سلتر بر مسئله پایایی شبکه قدرت تاثیر می‌گذارد. در این مقاله پایایی شبکه قدرت با حضور نیروگاه اردک سلتر مطالعه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** نیروگاه امواج، نیروگاه اردک سلتر، پایایی، نیروگاه تجدیدپذیر، انرژی اقیانوس

نام نویسنده‌ی مسئول: علی اصغر بیگی

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

## ۱- مقدمه

نیروگاه سلتر یکی از انواع نیروگاه‌های امواج است. این نیروگاه تجدیدپذیر بوده و در آینده شاهد این خواهیم بود که نیروگاه‌های تجدیدپذیر نقش مهمی در تامین بار شبکه قدرت داشته باشند. بنابراین بررسی این نیروگاه‌ها مهم است. از طرف دیگر یکی از مسائل مهم در شبکه قدرت مسئله پایایی است تا بتوان احتمال از دست دادن بار شبکه را کمتر نمود. در این مقاله به دلیل اهمیت نیروگاه‌های اردک سلتر و همچنین پایایی شبکه قدرت، قابلیت اطمینان نیروگاه اردک سلتر در شبکه قدرت مطالعه می‌شود. به دلیل اهمیت نیروگاه‌های اردک سلتر تاکنون مطالعات مختلفی بر روی این نوع نیروگاه‌ها انجام شده است.

در [۱] چگونگی طراحی و تست نمودن سیستم مکانیکی یکی از انواع نیروگاه‌های امواج پیچشی انجام شده است. اردک سلتر در این مقاله به عنوان یکی از نیروگاه‌های امواج ارزیابی شده است. این نیروگاه می‌تواند انرژی موج را با راندمان بالا تا ۹۰ درصد به انرژی مکانیکی تبدیل کند. محدودیت‌ها و چالش‌های استفاده از اردک سلتر برای تولید انرژی شامل جلوگیری از خطر نشت روغن هیدرولیک در سیستم هیدرولیک و برداشتن براکت‌های پیچیده و عظیم ثابت است. این مقاله طراحی مفهومی و یک بررسی تجربی یک سیستم مکانیکی قدرت برخاستن برای اردک سلتر شناور را ارائه می‌کند. در [۲] ارزیابی عددی و تجربی رفتار خطی نیروگاه اردک سلتر در تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریکی انجام شده است. در میان انواع سیستم‌های قدرت امواج، اردک سلتر (روتور) یکی از موثرترین جاذب امواج برای استخراج انرژی امواج است. شکل روتور به گونه‌ای طراحی شده است که قسمت جلویی آن رو به جهت موج فرودی است که به دلیل حرکت ذرات آب ناشی از موج، آن را مجبور به بالا و پایین کردن می‌کند، در حالی که قسمت عقب که عمده‌تاً دایره‌ای شکل است، هیچ امواجی را منعکس نمی‌کند. شکل هندسی نامتقارن اردک باعث می‌شود انرژی را به طور موثر جذب کند. در این مقاله، روتور با استفاده از برنامه‌ای مبتنی بر تئوری جریان پتانسیل خطی در آنالیزهای پراش/تابش سه بعدی در حوزه فرکانس بررسی و با استفاده از برنامه طراحی و تحلیل سیستم دریایی در حوزه زمان تأیید شده است.

در [۳] چگونگی تولید برق از انرژی اقیانوس و دریا با استفاده از نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی اردک سلتر مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه تولید نیروی موج در سال‌های اخیر بیش از پیش در علم و فناوری مدرن برای انرژی‌های تجدیدپذیر جدید رواج یافته است. طراحی دستگاه‌های تولید برق موج با راندمان تبدیل و پایداری بالا و بهبود سطح فنی برای تجاری‌سازی هم از نظر علمی جالب و هم بالقوه مفید است. در اینجا با ایجاد یک سیستم تبدیل انرژی اردک در یک مخزن موج، به پایداری تجهیزات تولید موج دست یافته است. مجهز به سنسور فاصله اولتراسونیک، ترکیب اسلاید پیچ و موتور پله‌ای به عنوان سیستم بازخورد خود تنظیم پیش‌نویس، این دستگاه تحت سیستم اندازه‌گیری خودکار میکرو کامپیوتر تک تراشه همیشه بهترین عملکرد را دارد.

در [۴] پروژه احداث نیروگاه اردک سلتر به عنوان یکی از نیروگاه‌های امواج که در کشور انگلیس نصب می‌گردد مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مقاله به تشریح آنچه برای تحقیق در مورد یک فناوری جدید و غیرمتعارف انرژی افتاد که می‌توانست با استخراج انرژی از امواج در دریا به جایگزینی روش‌های سنتی تامین انرژی کمک کند، توضیح می‌دهد. در [۵] چگونگی تولید برق از آرایه‌های نیروگاهی شامل چندین اردک سلتر که در کنار توربین‌های بادی شناور در دریا قرار گرفته‌اند بررسی شده است. این سیستم در واقع یک سیستم هیبرید است که از انرژی امواج و باد جهت تولید برق استفاده می‌کند. ادغام یک توربین بادی دریایی شناور و مجموعه‌ای از مبدل‌های انرژی موج را می‌توان به عنوان یک مفهوم ترکیبی جدید مناسب با هدف برداشت بیشتر انرژی و هزینه کل انرژی کمتر پیشنهاد کرد. این مقاله ترکیب جدیدی از یک پلتفرم نیمه شناور بدون مهاربند و مجموعه‌ای از مبدل‌های انرژی امواج از نوع اردک سلتر را پیشنهاد می‌کند. در [۶]، یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی برای پیش‌بینی عملکرد هیدرودینامیکی مبدل انرژی امواج از نوع اردک انفرادی در امواج منظم در محدوده وسیعی از شیب موج تا زمانی که اردک واژگون شود، توسعه داده شده است. مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای تأیید صحت مدل ارائه شده، طراحی شده است. شبیه سازی روش المان مرزی نیز برای مقایسه انجام می‌شود. نتایج به دست آمده در این مقاله، به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد و تفاوت اصلی ناشی از اصطکاک در سیستم انتقال مکانیکی است. در [۷] با ایجاد یک سیستم تبدیل انرژی اردک سلتر در یک مخزن موج، به پایداری تجهیزات تولید موج دست یافته است. این سیستم مجهز به سنسور

فاصله اولتراسونیک، ترکیب اسلاید پیچ و موتور پله‌ای به عنوان سیستم بازخورد خود تنظیم پیش‌نویس می‌باشد. مرجع [۸] مطالعه فصلی از کتاب ویرایش شده توسط جوائو کروز با عنوان انرژی موج اقیانوس: وضعیت فعلی و چشم‌اندازهای آینده، وضعیت انواع مختلف انرژی اقیانوس از جمله انرژی امواج دریا را مطالعه می‌کند.

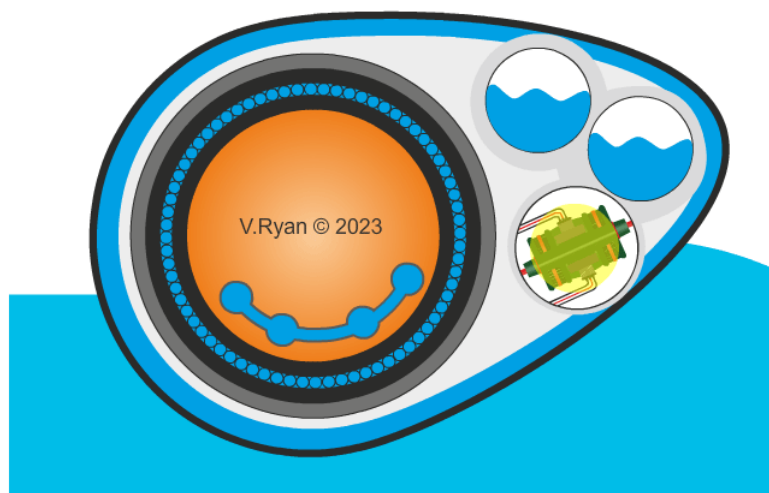
با توجه به اینکه نیروگاه اردک سلتز یکی از نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر است که توان خروجی آن تغییر می‌کند می‌توان از مقالاتی که قابلیت اطمینان انواع مختلف نیروگاه‌های تجدیدپذیر را بررسی نموده‌اند ایده گرفت. در [۹] قابلیت اطمینان نیروگاه حرارتی خورشید مبتنی بر دریافت کننده مرکزی بررسی شده است. در این مقاله اثر تغییرات توان خروجی که ناشی از تغییر شدت تابش خورشید است در نظر گرفته شده است. در مراجع [۱۰-۱۱] قابلیت اطمینان نیروگاه‌های امواج بررسی شده است. در [۱۰] قابلیت اطمینان انواع مختلف نیروگاه‌های امواج دریا شامل نیروگاه اژدهای موج، نیروگاه بایو، نیروگاه شیار مخروطی دریا و پلامیس ارزیابی شده است. در [۱۲] اثر خرابی اجزا و تغییرات توان خروجی نیروگاه امواج مبتنی بر پلامیس که ناشی از تغییر ارتفاع امواج و دروه تناوب آن‌ها می‌باشد بررسی شده است. با توجه به اینکه تاکنون قابلیت اطمینان نیروگاه اردک سلتز ارزیابی نشده است نوآوری این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

- ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه اردک سلتز به عنوان یکی از نیروگاه‌های مبتنی بر امواج دریا برای اولین بار در این مقاله ارزیابی قابلیت اطمینان اردک سلتز به عنوان یکی از نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی امواج دریا صورت می‌گیرد. بر همین اساس ساختار این مقاله به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم نیروگاه اردک سلتز معرفی می‌شود و در بخش سوم روش بررسی قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها شرح داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی که در محیط نرم‌افزار متلب صورت گرفته است در بخش چهارم آمده و در بخش پنجم نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌شود.

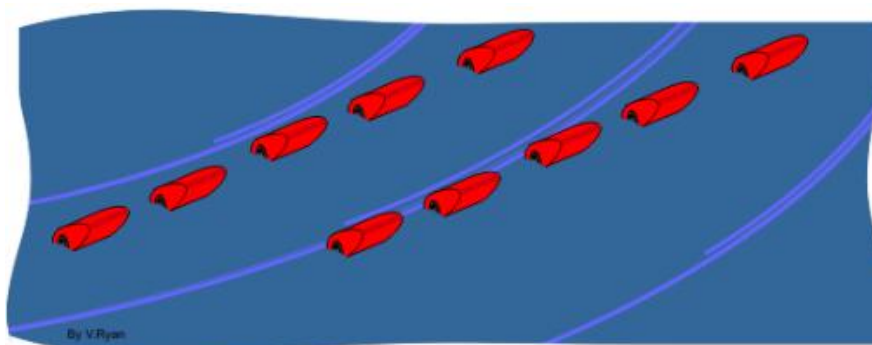
## ۲- نیروگاه اردک سلتز

چندین دستگاه برای مهار انرژی از امواج طراحی شده است. "اردک سلتز" نمونه‌ای است که در دهه ۱۹۷۰ توسط استفان سالتر از دانشگاه ادینبورگ ساخته شد (اختراع ۱۹۷۴ - نمونه اولیه آزمایش شده در ۱۹۷۶). احتمالاً این اولین تلاش بریتانیا برای تولید برق از انرژی امواج بوده است. در زمان توسعه، قیمت نفت به دلیل تحریم نفتی اعراب به بالاترین حد خود رسیده بود و روش‌های جایگزین تولید انرژی را در اولویت قرار می‌داد. اردک سلتز روی امواج بالا و پایین می‌زند و یک سری توربین‌های ژيروسکوپ داخلی خاص، این حرکت را به برق تبدیل می‌کند. اردک سالتر به بزرگی یک اتوبوس دو طبقه است که بسیاری از آن‌ها در الگوهای مشخصی در دریا چیده شده‌اند تا از شکل‌گیری امواج استفاده کنند. در دهه ۱۹۸۰، قیمت نفت به سطح سابق بازگشت و دولت بریتانیا، بودجه پروژه را برداشت. این علیرغم کارایی ۹۰ درصدی آن بود. استفان سالتر معتقد بود که دولت بیش از حد متعهد به سرمایه‌گذاری در انرژی هسته‌ای است. او همچنین معتقد بود که مقامات دولتی/حسابرسان عمداً هزینه توسعه و تولید اردک‌های سلتز را تخمین زده‌اند. به بیان ساده، دولت دیگر به دنبال جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی و انرژی هسته‌ای نبود. در شکل ۱ ساختار نیروگاه اردک سلتز به همراه تجهیزات تشکیل دهنده آن نشان داده شده است. هنگامی که امواج از زیر "اردک سلتز" عبور می‌کنند، باعث ایجاد یک حرکت "بویی" می‌شوند. اردک انرژی امواج را جذب می‌کند و آب صافی را در "پیش" خود باقی می‌گذارد. محاسبه شده است که هر اردک تقریباً دو مگاوات انرژی تولید می‌کند (تامین برق برای ۲۰۰۰ خانه معمولی). این بدان معناست که برای تامین یک شهر به یک سری اردک نیاز است.

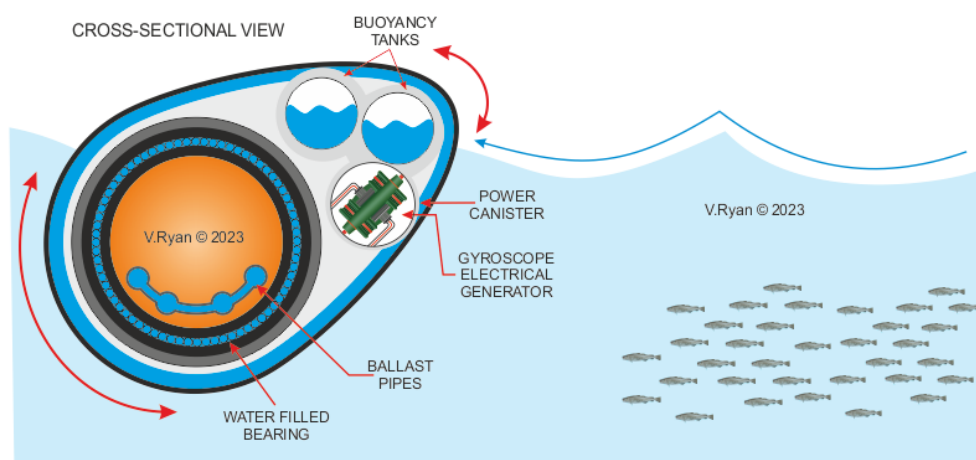
اردک سلتز در اثر انرژی امواج به سمت بالا و پایین حرکت می‌کند. تولید برق توسط موتور الکتریکی ژيروسکوپ صورت می‌گیرد. برای تولید انرژی الکتریکی، حرکت نوسانی ژيروسکوپ (که توسط موج ایجاد می‌شود) موتوری را به حرکت در می‌آورد که الکتریسیته تولید می‌کند. اردک سالتر برای ترکیب چهار ژنراتور الکتریکی ژيروسکوپ طراحی شده است که در یک قوطی برق چیده شده‌اند و دو مگاوات برق تولید می‌کنند. قوطی برق حاوی چهار موتور الکتریکی ژيروسکوپ است که برق تولید می‌کنند. قوطی یک لوله مهر و موم شده است که در نوک اردک سلتز قرار دارد. اجزای اصلی تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلتز عبارتند از: سیستم نگهدارنده، پلتفرم تعادل، بیرینگ، لوله‌های بالاست، قوطی توان، ژنراتور الکتریکی ژيروسکوپ و مخازن بایو. همچنین به منظور اتصال توان تولیدی نیروگاه اردک سلتز به مبدل الکترونیک قدرت و ترانسفورماتور نیاز است.



الف) ساختار یک اردک سلتر که بر روی آب در اثر برخورد امواج حرکت می‌کند

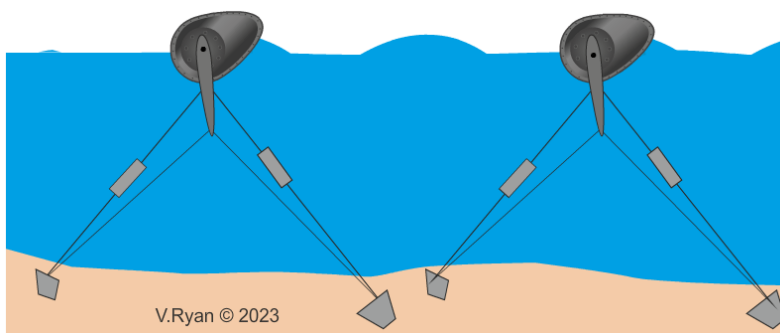


ب) ساختار شامل دو آرایه که هر آرایه شامل چندین اردک سلتر است که در یک راستا قرار گرفته‌اند

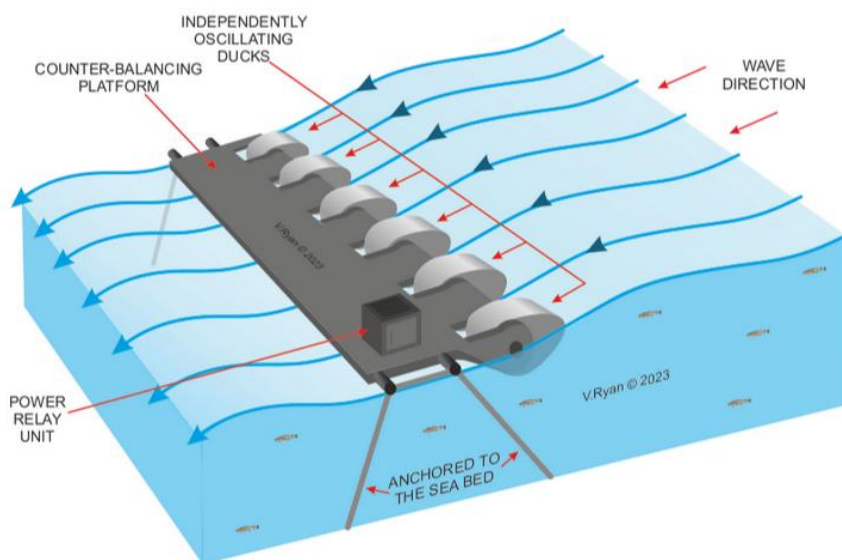


ج) اجزای تشکیل دهنده اردک سلتر که شامل پیبرینگ میدان آب، لوله‌های بالاست، ژنراتورهای الکتریکی ژيروسکوپ، محفظه توان و

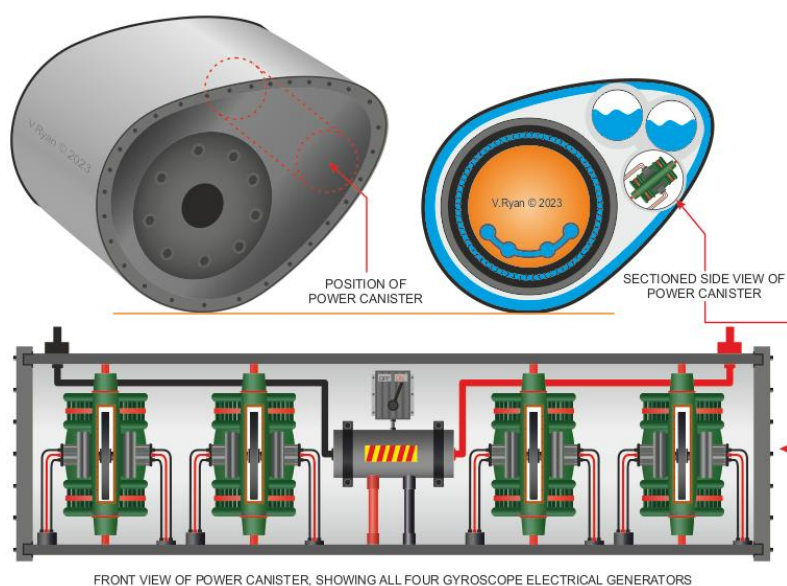
مخازن بایونسی می‌باشد



د) سیستم نگهدارنده دو مجموعه اردک سلتر که به کف دریا محکم شده‌اند

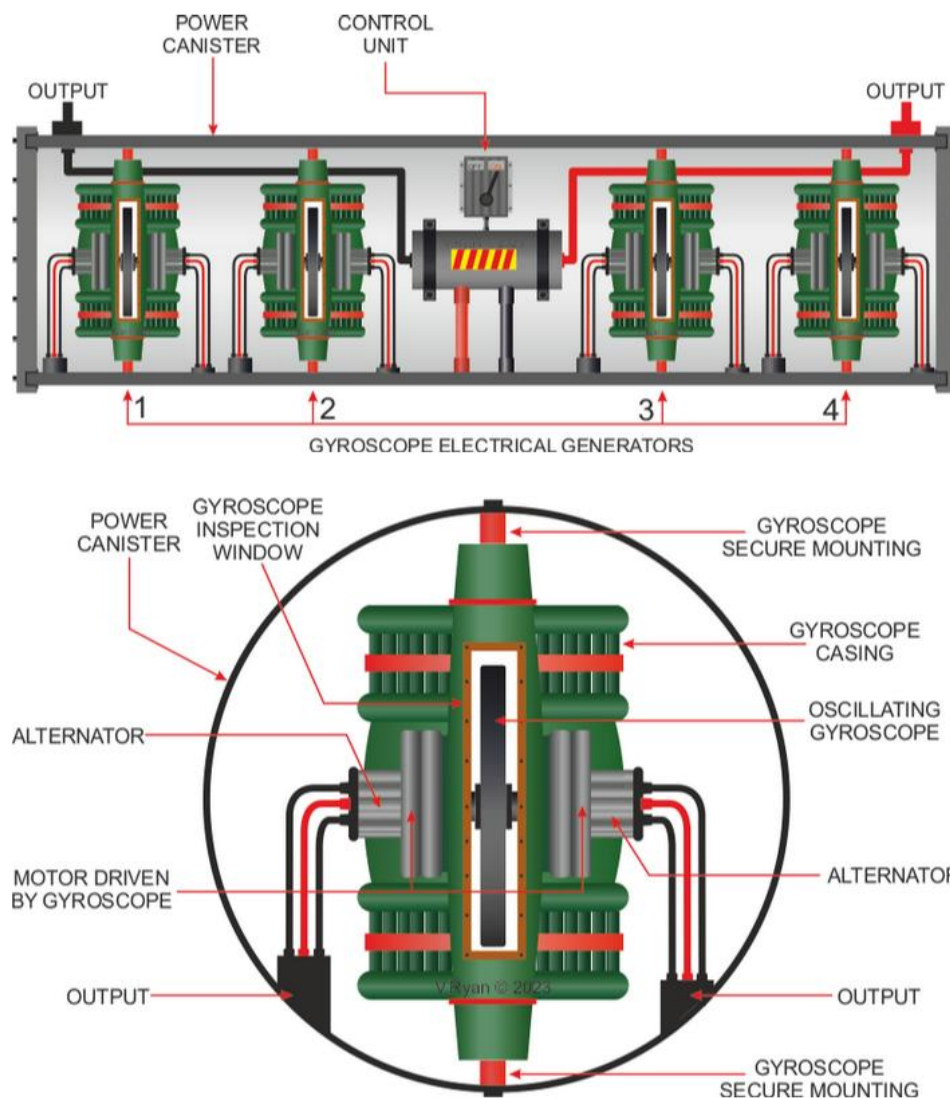


ه) ساختار شامل یک آرایه اردک سلتر که چگونگی حرکت آن‌ها در اثر امواج نشان داده شده است



FRONT VIEW OF POWER CANISTER, SHOWING ALL FOUR GYROSCOPE ELECTRICAL GENERATORS

و) موقعیت ژنراتورهای الکتریکی ژيروسکوپي در محفظه توان



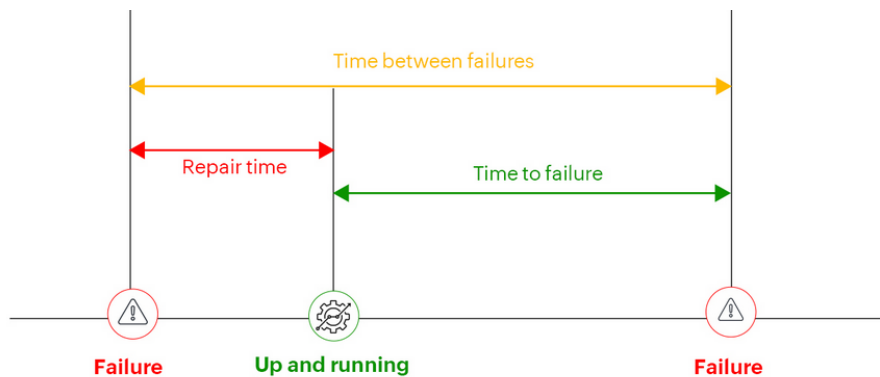
ز) ساختار ژنراتورهای الکتریکی ژيروسکوپ

شکل (۱): الف) نیروگاه اردک سلتر و ب) تا ز) اجزای تشکیل دهنده آن

### ۳- قابلیت اطمینان اردک سلتر

در این مقاله ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه اردک سلتر انجام می‌شود. مطالعه قابلیت اطمینان صورت گرفته در این مقاله در دسته کفایت انجام شده و مربوط به قابلیت اطمینان سیستم تولید یعنی مطالعات سطح اول قابلیت اطمینان می‌باشد. در این بخش از تحقیق شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح تولید و بخش کفایت معرفی می‌گردند. این شاخص‌های عبارتند از متوسط زمان تا خرابی، متوسط انرژی تامین نشده، تجهیزات تشکیل دهنده سیستم پذیر، دسترس ناپذیری، احتمال قطع بار، متوسط زمان قطع بار و متوسط انرژی تامین نشده. تجهیزات تشکیل دهنده سیستم قدرت را می‌توان در دو حالت در نظر گرفت. این تجهیزات یا سالم هستند و وظیفه مربوط به خود را انجام می‌دهند و یا اینکه خراب هستند و باید تعمیر شوند. در ابتدا یک تجهیز سالم می‌باشد و پس از گذشت یک مدت زمانی تجهیز خراب می‌شود. مدت زمانی که تجهیز سالم است تا اینکه خراب شود را مدت زمان تا بروز خرابی می‌نامند. پس از اینکه تجهیز خراب شد، باید تعمیر گردد. مدت زمانی که نیاز است تا تجهیز تعمیر شود نیز مدت زمان تعمیر نام دارد. باز زمانی که تجهیز سالم شد باید

یک مدت زمانی بگذرد تا دوباره تجهیز خراب شود که این روند در حال تکرار می‌باشد. مسلماً مدت زمان تا بروز خرابی و همچنین مدت زمان تعمیر نیز برای یک تجهیز در هر بار خراب شدن متفاوت است. بنابراین در طول یک مدت زمان مشخص که مدت زمان مطالعه نام دارد از مدت زمان تا بروز خرابی و همچنین مدت زمان تعمیر متوسط گرفته می‌شود. بنابراین متوسط زمان تا خرابی و همچنین متوسط زمان تعمیر محاسبه می‌گردد. در شکل ۲ متوسط زمان تا خرابی (mean time to failure - MTTF) و متوسط زمان تعمیر (mean time to repair - MTTR) نشان داده شده است. در این شکل همچنین متوسط زمان بین دو خرابی (mean time between failure - MTBF) نشان داده شده است.



شکل (۲): زمان‌های تا خرابی و تعمیر یک تجهیز

به منظور محاسبه متوسط زمان تا خرابی و متوسط زمان تا تعمیر یک تجهیز باید در یک دوره زمانی مشخص بر روی زمان‌های تا خرابی و زمان‌های تعمیر به صورت بیان شده در روابط زیر متوسط گرفته شود.

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n t_{up_i}}{n} \quad (1)$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n t_{down_i}}{n} \quad (2)$$

در روابط فوق فرض شده است  $n$  بار خرابی تجهیز اتفاق افتاده و در هر بار مدت زمان تا بروز خرابی  $t_{up_i}$  و مدت زمان تعمیر  $t_{down_i}$  بوده است. متوسط زمان بین دو خرابی نیز می‌تواند از متوسط گیری روی زمان‌های بین خرابی‌ها محاسبه گردد و یا اینکه متوسط زمان تا خرابی و متوسط زمان تا تعمیر را به صورت رابطه زیر جمع نمود.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (3)$$

نرخ خرابی یک تجهیز به معنای این است که آن تجهیز در طول مدت زمان مشخص چند بار خراب می‌شود. زمانی که در مدت زمان مورد مطالعه، متوسط زمان تا خرابی وجود داشته باشد، می‌توان نرخ خرابی تجهیز را از رابطه زیر به دست آورد.

$$\lambda = \frac{\text{studytime}}{MTTF} \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $\lambda$  نرخ خرابی تجهیز بر حسب تعداد خرابی در طول مدت زمان مطالعه، study time نیز مدت زمان مطالعه می‌باشد. نرخ تعمیر یک تجهیز نیز به این معنا است که آن تجهیز در طول مدت زمان مشخص چند بار می‌تواند تعمیر شود. برای محاسبه این نرخ کافی است مدت زمان مطالعه را بر متوسط زمان تعمیر تقسیم نمود.

$$\mu = \frac{\text{studytime}}{MTTR} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $\mu$  نرخ تعمیر تجهیز بر حسب تعداد تعمیر در طول زمان مطالعه می‌باشد. دسترس‌پذیری یک تجهیز به معنای این است که احتمال سالم بودن تجهیز چقدر است. در صورتی که مدت زمان مطالعه طولانی باشد، دسترس‌پذیری تجهیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A = \frac{MTTF}{MTBF} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (6)$$

در رابطه فوق  $A$  دسترس‌پذیری تجهیز می‌باشد. دسترس‌ناپذیری تجهیز نیز به معنای احتمال خراب بودن تجهیز است و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$U = 1 - A = \frac{MTTR}{MTBF} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (7)$$

در رابطه فوق  $U$  دسترس‌ناپذیری تجهیز می‌باشد. در سیستم قدرت هدف تامین بار مشترکین می‌باشد. بنابراین شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت بر اساس احتمال و زمان قطعی بار و همچنین میزان انرژی قطع شده تعریف شده است. احتمال قطعی بار به این معنا است که با چه احتمالی بار سیستم قطع می‌گردد. زمانی که میزان توان تولیدی نیروگاه‌ها از بار سیستم کمتر شود، بخشی از بار سیستم یا تمام بار قطع می‌گردد. در روش تحلیلی یک جدول برای سیستم تولید که شامل نیروگاه-های مختلف هستند به دست می‌آید که این جدول به جدول احتمال ظرفیت‌ها معروف است. در این جدول حالت‌های مختلفی که برای نیروگاه‌ها وجود دارد به همراه توان تولیدی هر حالت و احتمال مربوط به آن آورده می‌شود. یک نیروگاه متعارف یا سالم است یا خراب. بنابراین جدول احتمال ظرفیت‌های آن دو حالت است. حالت اول مربوط به زمان سالم بودن نیروگاه است که توان نامی را تولید می‌کند و حالت دوم مربوط به زمان خراب بودن نیروگاه است که توان تولیدی آن صفر است. احتمال مربوط به حالت اول همان دسترس‌پذیری است و احتمال مربوط به حالت دوم دسترس‌ناپذیری نیروگاه است. زمانی که سیستم تولید از چند نیروگاه تشکیل شده است باید احتمال مربوط به حالت‌های مختلف را در نظر گرفت. حالت‌های مختلف مربوط به سیستم تولید شامل  $N$  نیروگاه دارای  $2^N$  حالت می‌باشد. چرا که هر کدام از نیروگاه‌ها دارای دو حالت سالم و خراب هستند. جدول احتمال ظرفیت‌های این سیستم نیز دارای  $2^N$  حالت بوده که در هر حالت توان مربوطه و احتمال مربوط به آن باید محاسبه گردد. پس از به دست آوردن جدول احتمال ظرفیت‌های مربوط به نیروگاه‌ها که همان مدل سیستم تولید است باید مدل بار به دست آورده شود. ساده‌ترین مدل بار، در نظر گرفتن مقدار بار ثابت است. در این حالت احتمال قطع بار (loss of load probability) از مجموع احتمال حالت‌هایی از جدول احتمال ظرفیت‌ها که توان آن‌ها از بار کمتر است به صورت رابطه زیر به دست می‌آید.

$$LOLP = \sum_{i=1}^k P_i \quad (C_i < L) \quad (8)$$

در رابطه فوق  $LOLP$  احتمال قطعی بار و  $P_i$  احتمال حالت‌هایی است که توان آن‌ها ( $C_i$ ) از بار سیستم ( $L$ ) کمتر است. از تعداد کل حالت‌های جدول احتمال ظرفیت‌ها، در  $k$  حالت میزان تولید از بار کمتر بوده است. شاخص دیگر قابلیت اطمینان سیستم قدرت، متوسط زمان قطعی بار است. برای محاسبه این شاخص نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$LOLE = \sum_{i=1}^k P_i T \quad (9)$$

در رابطه فوق  $LOLE$  متوسط زمان قطعی بار (loss of load expectation) و  $T$  مدت زمان مطالعه است. در شاخص احتمال قطع بار و متوسط زمان قطع بار زمانی که تولید از بار کمتر باشد قطعی بار در نظر گرفته شده و بر این اساس شاخص‌ها محاسبه می‌گردد. عیب این شاخص‌ها این است که حالت‌هایی که با کمبود توان مواجه هستند چه همه بار قطع شود و چه مقدار خیلی کمی از بار قطع شود همه این حالت‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین شاخص کاملتری برای این منظور تعریف شده است که متوسط انرژی قطع شده نام دارد. مقدار این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$EENS = \sum_{i=1}^k (L - P_i) T \quad C_i < L \quad (10)$$

در رابطه فوق EENS متوسط انرژی تامین نشده (expected energy not supplied) می‌باشد. روش تحلیلی که در این قسمت بیان شد برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان در شرایطی که نیروگاه‌ها دارای توان ثابتی هستند و تغییرات بار نیز کم باشد مناسب است. در شرایطی که نیروگاه اردک سلت‌ر که به دلیل تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج مرتباً توان تولیدی‌اش در حال تغییر است به شبکه قدرت اضافه شده باشد، استفاده از روش‌های عددی مناسب‌تر است. روشی که در این مقاله پیشنهاد شده است روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد که در این قسمت از تحقیق توضیح داده می‌شود. در این روش، ابتدا باید مشخص نمود که خرابی تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلت‌ر چه تاثیری بر عملکرد نیروگاه دارد و در مرحله بعد چگونگی تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه اردک سلت‌ر را بیان نمود. در تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان باید تغییرات توان تولیدی نیروگاه و بار شبکه را نیز در نظر گرفت. توان تولیدی نیروگاه اردک سلت‌ر به دلیل تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج در طول زمان تغییر می‌کند. در صورتی که هر کدام از تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلت‌ر خراب شود در عملکرد نیروگاه اختلال پیش آمده و تولید توان الکتریکی نیروگاه متوقف می‌گردد. خرابی بر خسی از این تجهیزات مستقیماً منجر به خرابی کل نیروگاه و صفر شدن توان خروجی آن می‌شود. خرابی سایر تجهیزات نیز الزاماً به خرابی کل نیروگاه و صفر شدن توان خروجی منجر نمی‌شود. اما به منظور جلوگیری از وارد آمدن خسارت جدی به نیروگاه، بهره‌بردار عملکرد نیروگاه اردک سلت‌ر را متوقف نموده و توان خروجی نیروگاه در این حالت نیز صفر می‌شود. بنابراین از نظر قابلیت اطمینان این تجهیزات به صورت سری در مدل قابلیت اطمینان نیروگاه اردک سلت‌ر قرار می‌گیرند. برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه اردک سلت‌ر باید گام‌های زیر را برداشت:

گام اول- در هر ساعت از سال، برای هر کدام از تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلت‌ر یک عدد تصادفی در بازه ۰ تا ۱ تولید می‌گردد.

گام دوم- در صورتی که هر کدام از این عددهای تولید شده بین ۰ تا دسترس‌پذیری تجهیزات مربوطه قرار بگیرد آن تجهیز سالم در نظر گرفته می‌شود. اما در صورتی که عدد تصادفی تولیدی بین دسترس‌پذیری تجهیز و ۱ باشد، آن تجهیز خراب در نظر گرفته می‌شود. بنابراین وضعیت سالم یا خراب بودن این تجهیزات در آن ساعت، مشخص می‌گردد. البته به منظور مشخص نمودن سالم یا خراب بودن تجهیزات می‌توان به گونه دیگری نیز عمل نمود. می‌توان عدد تصادفی را که تولید کردیم اینگونه بررسی کنیم. اگر عدد تولیدی بین ۰ تا دسترس‌ناپذیری تجهیز باشد آن تجهیز خراب و اگر بین دسترس‌ناپذیری و ۱ باشد آن تجهیز سالم در نظر گرفته شود.

گام سوم- با مشخص شدن سالم یا خراب بودن تجهیزات در ساعت مورد مطالعه، حال باید مشخص شود که کل نیروگاه اردک سلت‌ر سالم یا خراب است. در صورتی که هر کدام از تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلت‌ر خراب باشد، کل نیروگاه نیز خراب بوده و توان آن صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تنها در شرایطی نیروگاه سالم است که همه تجهیزات نیروگاه سالم باشند.

گام چهارم- برای ساعت مورد مطالعه، در صورت خراب بودن نیروگاه، توان آن صفر در نظر گرفته شده و در صورت سالم بودن نیروگاه باید توان تولیدی آن محاسبه گردد. برای این کار در ساعت مورد نظر، بر اساس داده‌هایی که جمع‌آوری شده است ارتفاع و دوره تناوب امواج در آن ساعت مشخص است. با داشتن ماتریس توان نیروگاه اردک سلت‌ر، و با داشتن ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان تولیدی نیروگاه اردک سلت‌ر در آن ساعت محاسبه می‌گردد.

گام پنجم- برای بقیه نیروگاه‌های موجود در سیستم قدرت نیز اعداد تصادفی تولید می‌گردد. در این مرحله نیز در صورتی که عدد تصادفی تولیدی متناظر با یک نیروگاه بین ۰ و دسترس‌پذیری باشد آن نیروگاه سالم و توان آن برابر با توان نامی نیروگاه در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که عدد تصادفی تولیدی بین دسترس‌پذیری و ۱ باشد نیز نیروگاه خراب در نظر گرفته شده و توان تولیدی آن صفر خواهد بود.

گام ششم- با مشخص شدن توان تولیدی نیروگاه اردک سلت‌ر و سایر نیروگاه‌های موجود در سیستم قدرت، برای ساعت مورد مطالعه توان کل سیستم مشخص می‌گردد.

گام هفتم- با داشتن داده‌های بار شبکه، بار سیستم برای ساعت مورد نظر مشخص بوده و با مقایسه میزان توان تولیدی کل سیستم و بار سیستم مشخص می‌گردد که در آن ساعت مورد مطالعه، بار سیستم قطع می‌شود یا نه. در صورتی که بار سیستم قطع گردد میزان قطعی بار مربوط به ساعت مورد نظر نیز مشخص می‌شود.

گام هشتم- هفت مرحله قبل برای تمام ساعت‌های سال تکرار می‌گردد تا در طول یک سال مشخص گردد چه ساعتی از سال، بار سیستم دچار قطعی شده و میزان بار قطع شده چقدر بوده است.

گام نهم- می‌توان برای هر کدام از سال‌ها مقدار شاخص‌های زیر را محاسبه نمود. باید دقت داشت که این شاخص‌ها مربوط به همان سال شبیه‌سازی شده می‌باشد:

$$loIp_y = \frac{h_y}{8760} \quad (11)$$

$$loLe_y = h_y \quad (12)$$

$$eens_y = \sum_{k=1}^{h_y} (L_k - C_k) \quad (13)$$

در روابط فوق،  $loIp_y$  و  $loLe_y$  و  $eens_y$  شاخص‌های احتمال قطع بار، متوسط زمان قطعی بار و متوسط انرژی تامین نشده مربوط به سال  $y$  از کل سال‌های شبیه‌سازی شده می‌باشد. در این روابط همچنین  $h_y$  تعداد ساعتی از کل سال (کل سال ۸۷۶۰ ساعت است) می‌باشد که توان کل سیستم تولید از بار سیستم در آن ساعت‌ها کمتر می‌باشد. به علاوه  $L_k$  و  $C_k$  بار سیستم و توان تولیدی سیستم مربوط ساعت  $k$ ام می‌باشد که توان تولیدی کل سیستم در آن ساعت با تولید اعداد تصادفی و مشخص نمودن وضعیت هر نیروگاه و نیروگاه اردک سلتر مشخص می‌گردد.

گام دهم- گام اول تا نهم برای تعداد مشخصی سال تکرار می‌شود تا دقت محاسبات قابل قبول باشد. معمولاً شبیه‌سازی مونت کارلو برای چندصد یا چند هزار سال تکرار می‌شود تا بتوان به دقت خوبی دست یافت.

گام یازدهم- مقدار متوسط شاخص‌های قابلیت اطمینان برای کل سال‌های شبیه‌سازی شده بر اساس روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$LOLP = \frac{\sum_{y=1}^n loIp_y}{n} \quad (14)$$

$$LOLE = \frac{\sum_{y=1}^n loLe_y}{n} \quad (15)$$

$$EENS = \frac{\sum_{y=1}^n eens_y}{n} \quad (16)$$

در روابط فوق  $n$  تعداد سال‌های شبیه‌سازی شده می‌باشد. در بخش بعد نتایج شبیه‌سازی یک سیستم تست که نیروگاه اردک سلتر در آن قرار دارد انجام می‌شود تا تاثیر این نیروگاه‌ها بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت بررسی گردد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تست قابلیت اطمینان روی بیلینتون با در نظر گرفتن اثر نیروگاه اردک سلتر انجام می‌شود. به همین منظور ابتدا مشخصات نیروگاه اردک سلتر مورد مطالعه بیان می‌گردد و سپس شاخص‌های قابلیت اطمینان این سیستم تست محاسبه می‌گردد. در این بخش از تحقیق، یک نیروگاه اردک سلتر با توان نامی ۲۹۱ کیلووات مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ماتریس توان این نیروگاه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): ماتریس توان نیروگاه اردک سلتر مورد مطالعه با توان نامی ۲۹۱ کیلووات

| $H_s$<br>(m) | $T_e$ (s) |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | 5         | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  |
| 0.5          | 0         | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 3   | 3   |
| 1.0          | 20        | 30  | 38  | 42  | 44  | 44  | 45  | 47  | 45  |
| 1.5          | 80        | 85  | 92  | 97  | 102 | 103 | 104 | 100 | 104 |
| 2.0          | 140       | 147 | 152 | 158 | 155 | 155 | 160 | 161 | 156 |
| 2.5          | 192       | 197 | 208 | 202 | 203 | 209 | 211 | 201 | 204 |
| 3.0          | 241       | 237 | 237 | 241 | 243 | 230 | 236 | 231 | 235 |
| 3.5          | 0         | 271 | 272 | 269 | 268 | 267 | 270 | 260 | 260 |
| 4.0          | 0         | 291 | 290 | 290 | 280 | 287 | 276 | 278 | 277 |
| 4.5          | 0         | 291 | 290 | 290 | 280 | 287 | 276 | 278 | 277 |
| 5.0          | 0         | 0   | 290 | 290 | 280 | 287 | 276 | 278 | 277 |
| 5.5          | 0         | 0   | 290 | 290 | 280 | 287 | 276 | 278 | 277 |
| 6.0          | 0         | 0   | 290 | 290 | 280 | 287 | 276 | 278 | 277 |

در جدول ۲ نیز نرخ خرابی و متوسط زمان تعمیر تجهیزات اصلی تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلتر مورد مطالعه آورده شده است. با توجه به مقادیر آورده شده در این جدول، دسترس پذیری و دسترس ناپذیری این تجهیزات محاسبه شده و در جدول ۳ آورده شده است.

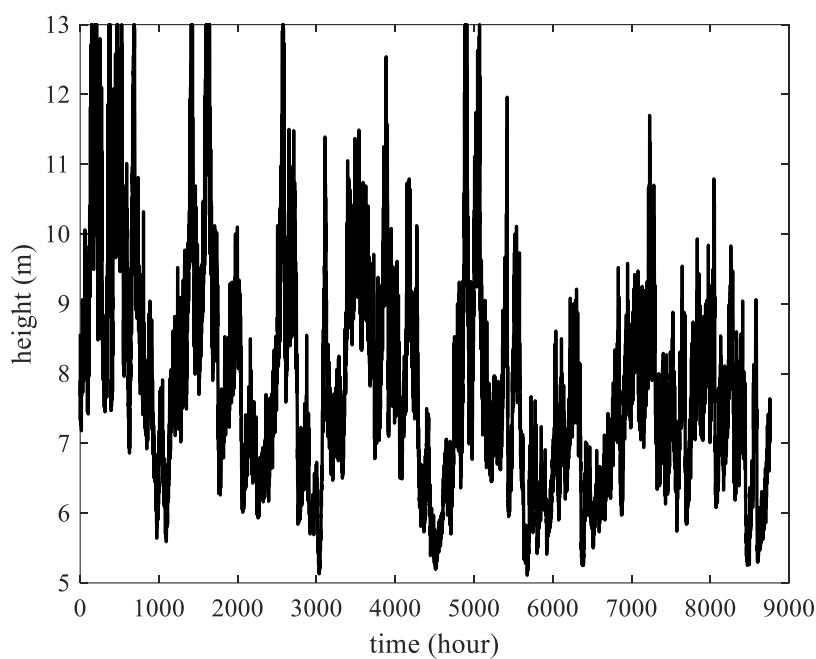
جدول (۲): نرخ خرابی و متوسط زمان تعمیر تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلتر

| تجهیزات نیروگاه           | نرخ خرابی بر حسب تعداد خرابی در سال | متوسط زمان تعمیر بر حسب ساعت |
|---------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| سیستم نگهدارنده           | ۰/۵                                 | ۱۰۰                          |
| پلتفرم تعادل              | ۲/۵                                 | ۱۰۰                          |
| بیرینگ                    | ۰/۵                                 | ۲۵۰                          |
| لوله‌های بالاست           | ۱                                   | ۲۰۰                          |
| ژنراتور الکتریکی ژيروسکوپ | ۱                                   | ۲۰۰                          |
| مخازن بایو                | ۱                                   | ۲۰۰                          |
| قوای توان                 | ۰/۵                                 | ۲۰۰                          |
| مبدل الکترونیک قدرت       | ۰/۵                                 | ۲۵۰                          |
| ترانسفورماتور             | ۰/۵                                 | ۲۵۰                          |

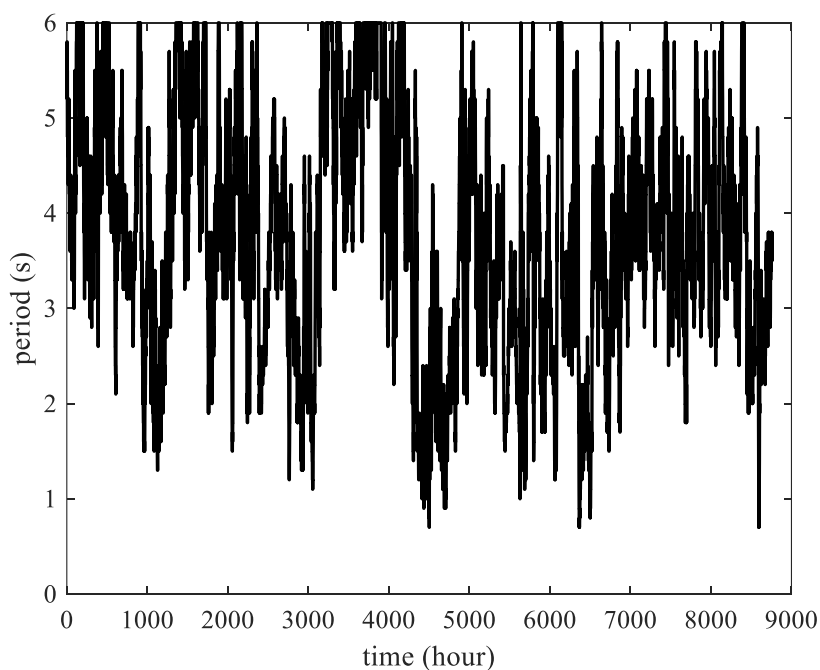
جدول (۳): دسترس پذیری و دسترس ناپذیری تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلتر

| تجهیزات نیروگاه           | دسترس پذیری | دسترس ناپذیری |
|---------------------------|-------------|---------------|
| سیستم نگهدارنده           | ۰/۹۹۴       | ۰/۰۰۶         |
| پلتفرم تعادل              | ۰/۹۷۲۳      | ۰/۰۲۷۷        |
| بیرینگ                    | ۰/۹۸۵۹      | ۰/۰۱۴۱        |
| لوله‌های بالاست           | ۰/۹۷۷۷      | ۰/۰۲۲۳        |
| ژنراتور الکتریکی ژيروسکوپ | ۰/۹۷۷۷      | ۰/۰۲۲۳        |
| مخازن بایو                | ۰/۹۷۷۷      | ۰/۰۲۲۳        |
| قوای توان                 | ۰/۹۸۸۷      | ۰/۰۱۱۳        |
| مبدل الکترونیک قدرت       | ۰/۹۸۵۹      | ۰/۰۱۴۱        |
| ترانسفورماتور             | ۰/۹۸۵۹      | ۰/۰۱۴۱        |

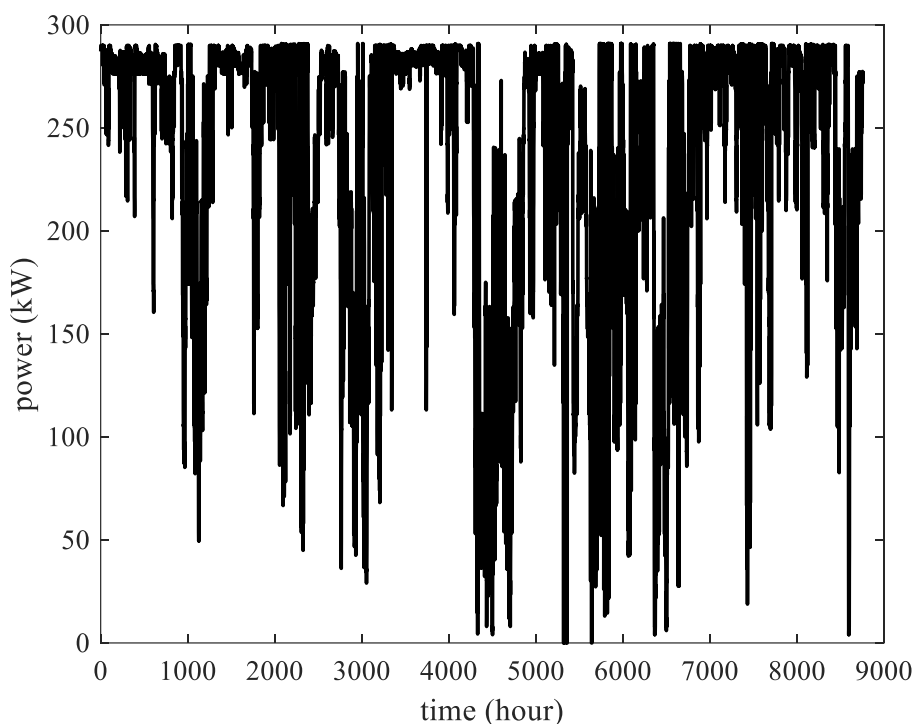
داده‌های ساعت به ساعت ارتفاع و دوره تناوب امواج نیز در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل‌ها مشخص است در طول زمان هم ارتفاع امواج و هم دوره تناوب آن‌ها در حال تغییر می‌باشد. به کمک این داده‌ها و همچنین ماتریس توان نیروگاه اردک سلتر می‌توان توان تولیدی نیروگاه اردک سلتر را به صورت ساعت به ساعت محاسبه نمود. در شکل ۵ توان تولیدی نیروگاه اردک سلتر مورد مطالعه در طول یک سال آورده شده است.



شکل (۳): نمودار ارتفاع امواج

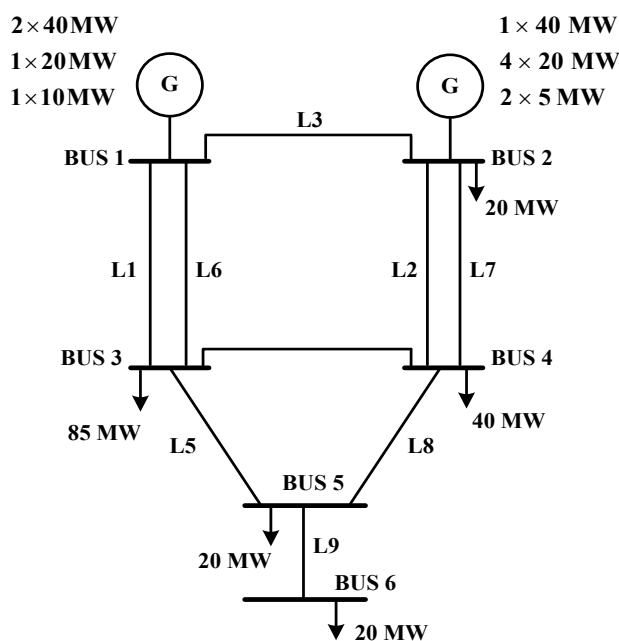


شکل (۴): دوره تناوب امواج



شکل (۵): توان تولیدی نیروگاه اردک سلتر

در شکل ۶ ساختار سیستم تست روی بیلینتون نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است، این سیستم از ۶ باسبار تشکیل شده است [۱۲]. نیروگاه‌های این سیستم ۱۱ نیروگاه می‌باشند که به باسبارهای ۱ و ۲ متصل شده‌اند. نیروگاه‌های متصل به باسبار ۱ شامل ۲ نیروگاه ۴۰ مگاواتی، یک نیروگاه ۲۰ مگاواتی و یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی می‌باشند. به باسبار ۲ نیز ۱ نیروگاه ۴۰ مگاواتی، ۴ نیروگاه ۲۰ مگاواتی و ۲ نیروگاه ۵ مگاواتی متصل شده است. مشخصات این نیروگاه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. این مشخصات شامل باسبارهایی که این نیروگاه‌ها به آن‌ها متصل شده‌اند، ظرفیت نامی نیروگاه‌ها، نرخ خرابی آن‌ها و مدت زمان تعمیر آن‌ها می‌باشد.



شکل (۶): ساختار سیستم تست روی بیلینتون

جدول (۴): مشخصات نیروگاه‌های سیستم تست روی بیلینتون

| زمان تعمیر<br>(ساعت) | نرخ خرابی (تعداد<br>در سال) | ظرفیت (مگاوات) | شماره باس | شماره نیروگاه |
|----------------------|-----------------------------|----------------|-----------|---------------|
| ۴۵                   | ۶                           | ۴۰             | ۱         | ۱             |
| ۴۵                   | ۶                           | ۴۰             | ۱         | ۲             |
| ۴۵                   | ۴                           | ۱۰             | ۱         | ۳             |
| ۴۵                   | ۵                           | ۲۰             | ۱         | ۴             |
| ۴۵                   | ۲                           | ۵              | ۲         | ۵             |
| ۴۵                   | ۲                           | ۵              | ۲         | ۶             |
| ۶۰                   | ۳                           | ۴۰             | ۲         | ۷             |
| ۵۵                   | ۲/۴                         | ۲۰             | ۲         | ۸             |
| ۵۵                   | ۲/۴                         | ۲۰             | ۲         | ۹             |
| ۵۵                   | ۲/۴                         | ۲۰             | ۲         | ۱۰            |
| ۵۵                   | ۲/۴                         | ۲۰             | ۲         | ۱۱            |

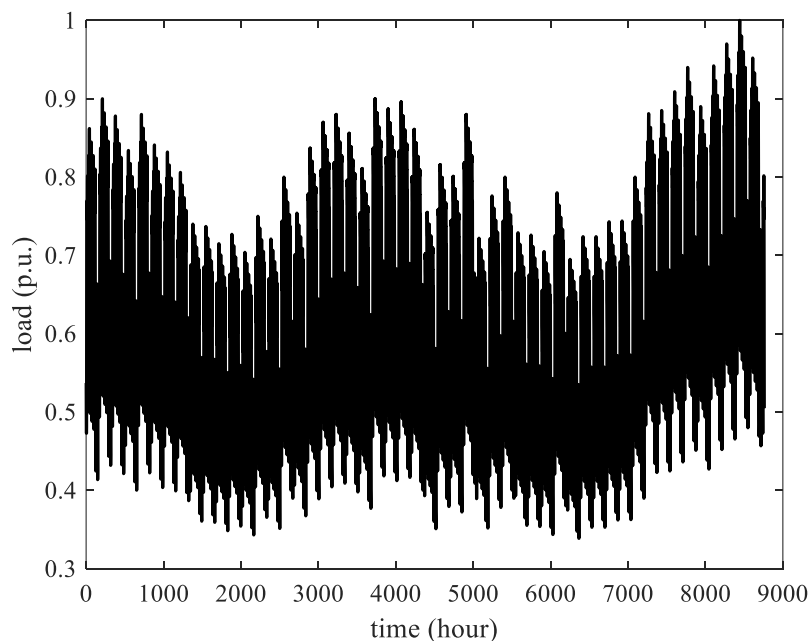
با توجه به داده‌های بیان شده در جدول ۴ دسترس‌پذیری نیروگاه‌های سیستم تست روی بیلینتون محاسبه شده و در جدول ۵ آورده شده است.

جدول (۵): دسترس‌پذیری نیروگاه‌های سیستم تست روی بیلینتون

| ظرفیت نامی نیروگاه | دسترس‌پذیری نیروگاه |
|--------------------|---------------------|
| ۴۰                 | ۰/۹۷۰۱              |
| ۴۰                 | ۰/۹۷۰۱              |
| ۱۰                 | ۰/۹۷۹۹              |
| ۲۰                 | /۹۷۵۰               |
| ۵                  | ۰/۹۸۹۸              |
| ۵                  | ۰/۹۸۹۸              |
| ۴۰                 | ۰/۹۷۹۹              |
| ۲۰                 | ۰/۹۸۵۲              |
| ۲۰                 | ۰/۹۸۵۲              |
| ۲۰                 | ۰/۹۸۵۲              |
| ۲۰                 | ۰/۹۸۵۲              |

بار سیستم نیز مبتنی بر الگوی IEEE در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ تغییرات ساعت به ساعت بار سیستم در طول سال نشان داده شده است [۱۳]. پیک بار در اینجا ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است. به منظور انجام مطالعات قابلیت اطمینان و مطالعه نیروگاه‌های امواج مبتنی بر تکنولوژی اردک سلتر در این بخش سه حالت در نظر گرفته می‌شود:

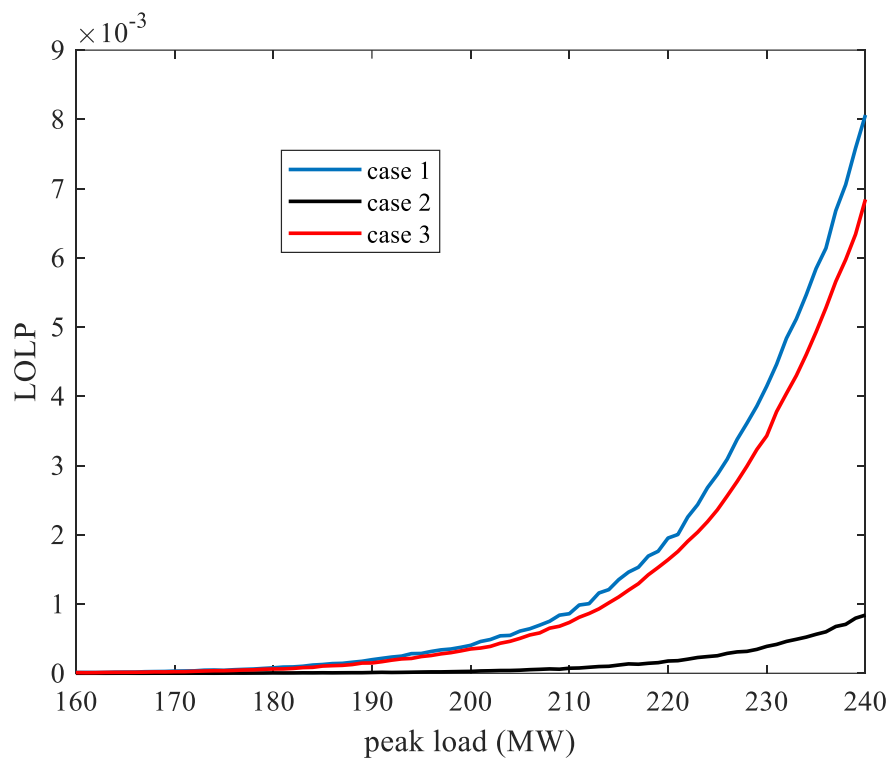
- حالت اول سیستم تست روی بیلینتون اولیه است که هیچ نیروگاه جدیدی به آن اضافه نشده است.
- حالت دوم سیستم تست روی بیلینتون است که یک نیروگاه ۲۹/۱ مگاواتی متعارف سنتی با دسترس‌پذیری ۰/۹۸ به آن اضافه شده است.
- در حالت سوم به سیستم تست روی بیلینتون ۱۰ نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی اردک سلتر هر کدام با توان نامی ۲۹۱ کیلووات اضافه شده است.



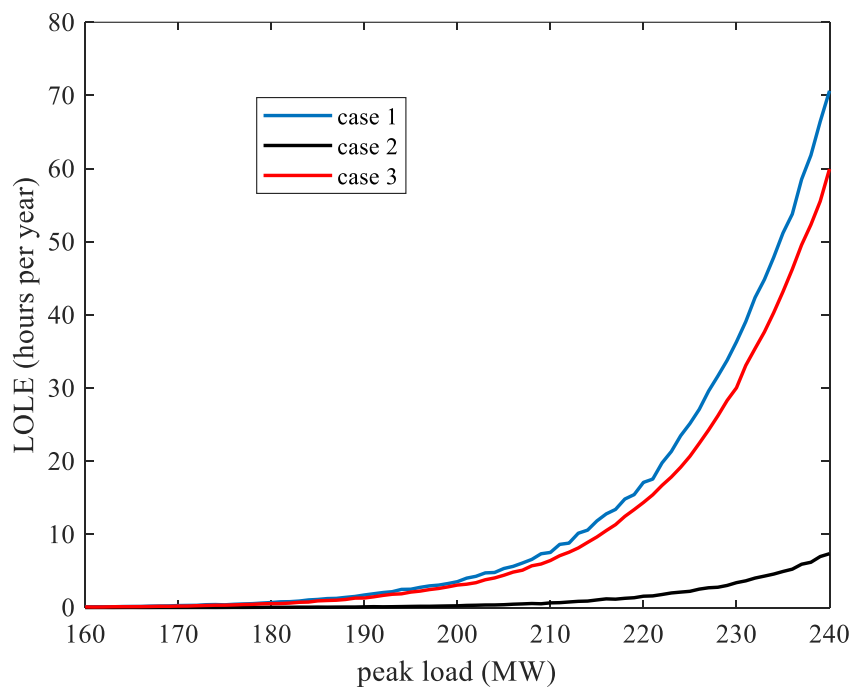
شکل (۷): تغییرات بار

در این مقاله روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای ۱۰۰۰ سال شبیه‌سازی شده است و شاخص‌های قابلیت اطمینان احتمال قطعی بار، متوسط زمان قطعی بار و متوسط انرژی تامین نشده برای سه حالت بیان شده محاسبه شده‌اند. این شاخص‌ها در شکل‌های زیر نشان داده شده است. در شکل ۸ نمودار احتمال قطعی بار برای سه حالت بیان شده بر حسب پیک بار رسم شده است. پیک بار در این نمودارها از ۱۸۰ تا ۲۴۰ مگاوات تغییر داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است با زیاد شدن پیک بار، احتمال قطعی بار نیز بیشتر می‌شود. در صورتی که یک نیروگاه جدید به سیستم قدرت اضافه شود قابلیت اطمینان بهبود پیدا می‌کند، چرا که همانگونه که مشخص است در هنگام اضافه شدن نیروگاه متعارف سنتی و همچنین در صورت اضافه شدن نیروگاه‌های اردک سلتر، شاخص احتمال قطعی بار کمتر شده است. نیروگاه اردک سلتر در مقایسه با نیروگاه متعارف سنتی تاثیر کمتری در بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت داشته است. این امر به این دلیل است که ارتفاع و دوره تناوب امواج در طول زمان متغیر بوده و توان تولیدی نیروگاه در طول زمان تغییر می‌کند. بنابراین به دلیل تغییرات پارامترهای امواج، در بیشتر مواقع توان تولیدی نیروگاه اردک سلتر از توان نامی آن کمتر می‌باشد. برخلاف نیروگاه‌های متعارف سنتی توان تولیدی نیروگاه‌های امواج قابل کنترل نیست و به تغییرات امواج وابسته است. در شکل ۹ نیز نمودار متوسط زمان قطعی بار بر حسب پیک بار برای سه حالت بیان شده رسم شده است. همانگونه که در این شکل نیز مشخص است با زیاد شدن پیک بار، شاخص متوسط زمان قطع بار بیشتر می‌شود و این به این معناست که قابلیت اطمینان سیستم قدرت کاهش می‌یابد. اما اضافه شدن نیروگاه‌های جدید چه نیروگاه متعارف و چه نیروگاه اردک سلتر سبب بهبود قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌گردد. چرا که در هر دو حالت متوسط زمان قطع بار کاهش یافته است. نیروگاه متعارف سنتی در مقایسه با نیروگاه اردک سلتر تاثیر بیشتری در بهبود قابلیت اطمینان داشته است. چرا که بر خلاف نیروگاه اردک سلتر که توان خروجی آن در طول زمان متغیر است، توان تولیدی نیروگاه متعارف سنتی در طول زمان ثابت می‌باشد. تغییرات توان خروجی نیروگاه اردک سلتر به دلیل تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج می‌باشد. در شکل ۱۰ نیز نمودار متوسط انرژی تامین نشده بر حسب پیک بار برای سه حالت بیان شده در این بخش نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است با زیاد شدن پیک بار شاخص قابلیت اطمینان متوسط انرژی تامین نشده افزایش پیدا می‌کند که نشان می‌دهد قابلیت اطمینان سیستم قدرت بدتر می‌شود. در صورتی که نیروگاه‌های جدید چه تجدیدپذیر که مبتنی بر تکنولوژی اردک سلتر می‌باشد و چه نیروگاه غیر تجدیدپذیر که همان نیروگاه متعارف سنتی است به سیستم قدرت اضافه شود قابلیت اطمینان سیستم قدرت بهتر می‌شود و شاخص متوسط انرژی تامین نشده کاهش می‌یابد. به مانند دو شاخص قبل، تاثیر نیروگاه‌های متعارف سنتی که توان خروجی‌شان ثابت است

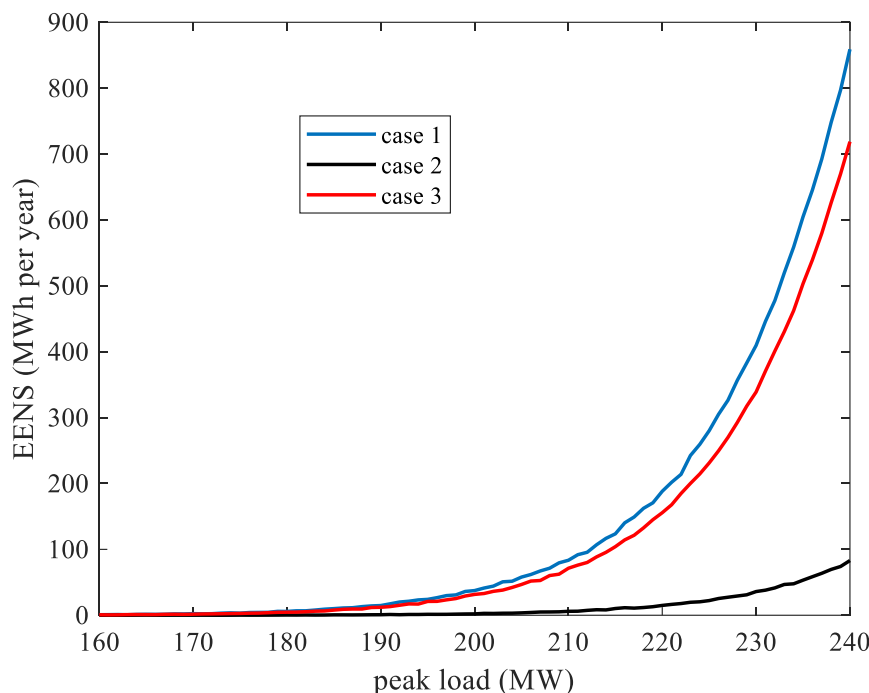
در بهبود شاخص متوسط انرژی تامین نشده بیشتر از نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی اردک سلتر می‌باشد. چرا که در نیروگاه اردک سلتر به دلیل تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان خروجی متغیر بوده و در بیشتر مواقع توان خروجی نیروگاه کمتر از توان نامی آن است.



شکل (۸): نمودار احتمال قطعی بار بر حسب پیک بار



شکل (۹): نمودار متوسط زمان قطعی بار بر حسب پیک بار



شکل (۱۰): نمودار متوسط انرژی تامین نشده بر حسب پیک بار

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه اردک سلتر با استفاده از روش عددی مبتنی بر تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شده است. نیروگاه اردک سلتر یکی از انواع نیروگاه‌های امواج می‌باشد که انرژی امواج اقیانوس را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در این تحقیق ابتدا نیروگاه اردک سلتر، اساس تولید برق در این نیروگاه و اجزای اصلی تشکیل دهنده آن توضیح داده شده است. نیروگاه اردک سلتر دارای تجهیزات اصلی سیستم نگهدارنده، پلنفرم تعادل، بیرینگ، لوله‌های بالاست، قوطی توان، ژنراتور الکتریکی ژيروسکپی، مخازن بایو، مبدل الکترونیک قدرت و ترانسفورماتور می‌باشد. با خراب شدن هر کدام از این تجهیزات عملکرد نیروگاه متوقف شده و توان تولیدی آن صفر خواهد بود. بنابراین به لحاظ قابلیت اطمینان این اجزا به صورت سری در مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه قرار دارند. به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه اردک سلتر در این تحقیق پیشنهاد شده است که از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده گردد. با توجه به تغییرات ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان تولیدی نیروگاه امواج در طول زمان متغیر بوده و این امر سبب می‌شود روش‌های تحلیلی نتوانند به خوبی این نیروگاه‌ها را مدل نمایند. بر همین اساس از روش شبیه‌سازی مونت کارلو با تکرار ۱۰۰۰ سال در این مقاله استفاده شده است تا بتوان شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های اردک سلتر را محاسبه نمود. برای این کار ابتدا برای اجزای اصلی تشکیل دهنده نیروگاه اردک سلتر اعداد تصادفی تولید شده و در صورتی که این اعداد تصادفی بین صفر و دسترس‌پذیری هر کدام از اجزا قرار بگیرند آن تجهیز سالم در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که همه تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه سالم باشند، نیروگاه توان الکتریکی تولید می‌کند و در غیر این صورت توان تولیدی نیروگاه صفر خواهد بود. به همین صورت توان کل سیستم مشخص شده و با مقایسه کردن این توان با بار سیستم حالت‌های قطعی مشخص می‌گردند. با انجام شبیه‌سازی در یک سال و تکرار آن برای چندین صد یا چندین هزار سال می‌توان شاخص‌های دقت مناسب برای قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه اردک سلتر به دست آورد. در این مقاله به کمک نرم‌افزار متلب یک شبیه‌سازی در طول ۱۰۰۰ سال انجام شده و شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم قدرت محاسبه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با زیاد شدن پیک بار شاخص‌های قابلیت اطمینان احتمال قطعی بار، متوسط زمان قطعی بار و متوسط انرژی تامین نشده افزایش پیدا می‌کند که نشان می‌دهد قابلیت اطمینان سیستم قدرت بدتر می‌شود. در صورتی که

نیروگاه‌های جدید چه تجدیدپذیر که مبتنی بر تکنولوژی اردک سلتر می‌باشد و چه نیروگاه غیرتجدیدپذیر که همان نیروگاه متعارف سنتی است به سیستم قدرت اضافه شود قابلیت اطمینان سیستم قدرت بهتر می‌شود و شاخص‌های احتمال قطعی بار، متوسط زمان قطعی بار و متوسط انرژی تامین نشده کاهش می‌یابد. همچنین، تاثیر نیروگاه‌های متعارف سنتی که توان خروجی‌شان ثابت است در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان بیشتر از نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی اردک سلتر می‌باشد. چرا که در نیروگاه اردک سلتر به دلیل تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان خروجی متغیر بوده و در بیشتر مواقع توان خروجی نیروگاه اردک سلتر کمتر از توان نامی آن است.

## References

### مراجع

- [1] Y. Jiang, et al, "Design and testing of a mechanical power take-off system for rolling-type wave energy converter", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 8, pp. 1487-1499, 2021.
- [2] K. Dongeun, et al, "Numerical and experimental study on linear behavior of salter's duck wave energy converter", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, no. 2, pp. 116-122, 2019.
- [3] C. Jeeva, et al, "Tapping the Wave Power of Seas and Oceans Using Salter Duck", *2023 Intelligent Computing and Control for Engineering and Business Systems (ICCEBS)*. IEEE, 2023.
- [4] R. Iphofen, "The UK Wave Power Project: Salter's Duck", *Ethics, Integrity and Policymaking: The Value of the Case Study*, pp. 101-110, 2022.
- [5] H. Yazdi, et al, "Wave power extraction by Multi-Salter's duck WECs arrayed on the floating offshore wind turbine platform", *Energy*, Vol. 278, 12793, 2023.
- [6] J. Wu, et al, "Numerical and experimental study of the Solo Duck wave energy converter", *Energies*, Vol. 12, no. 10, 1941, 2019.
- [7] Y. Feng, et al, "Design of Duck wave power generation device based on wave energy", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 696. no. 1. IOP Publishing, 2021.
- [8] S. Salter, "Wave energy: Nostalgic Ramblings, future hopes and heretical suggestions", *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, Vol. 2, pp. 399-428, 2016.
- [9] A. Ghaedi, M. Mahmoudian, "Reliability Modelling of Central Receiver Power Plants", *Journal of Applied Research in Electrical Engineering*, 2025.
- [10] A. Ghaedi, R. Sedaghati, M. Mahmoudian, "Reliability modeling of different wave energy conversion technologies", *Electrical Engineering*, pp. 1-25, 2024.
- [11] A. Ghaedi et al, "Reliability modeling of wave energy converters based on pelamis technology", *Electric Power Systems Research*, vol. 227, no. 109977, 2024.
- [12] A. Tiwary, T. Swati, "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.