نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره هشتم / بهار ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 8 / June 2016

ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره‌ای با استفاده از فرآیند مارکوف

سید یاسر درخشنده*[۱]
زهره سعیدی[۲]

چکیده

امروزه قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری یکی از شاخص‌های مهم در تمام علوم مهندسی است. با توجه به وابستگی روزافزون زندگی به انرژی الکتریکی، دسترس‌پذیری سیستم برق برای مصرف کنندگان اهمیت بالایی دارد. برای رسیدن به این هدف، هر یک از اجزای اصلی سیستم قدرت باید دارای قابلیت اطمینان مناسب باشد. در این تحقیق ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره‌ای با استفاده از فرآیند مارکوف انجام شده است. برای این منظور، در ابتدا مروری کلی بر ساختار و کاربرد نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره‌ای ارائه می‌شود. سپس مفاهیم اصلی روش فرآیند مارکوف مرور می‌گردد و مدل مناسب جهت ارزیابی قابلیت اطمینان یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ارائه می شود. با استفاده از مدل ارائه شده شاخص های مختلف قابلیت اطمینان واحتمالات رخداد حالات شکست، ظرفیت کامل و نیمه ظرفیت نیروگاه با توجه به تجهیزات موجود گزارش می‌شود و با استفاده از آنالیز حساسیت تأثیر نرخ خرابی و تعمیرات اجزای مختلف بر قابلیت اطمینان سیستم ارزیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

تلمبه-ذخیره‌ای، فرآیند مارکوف، قابلیت اطمینان، روش فراوانی و تداوم.

۱*. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، y_derakhshandeh@eng.sku.ac.ir.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۰

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

مقدمه

در هر جامعه مدرن، از کار افتادن محصول‌ها و سیستم‌ها موجب وقوع اختلال در سطوح مختلف می‌شود و می‌تواند به عنوان تهدیدی شدید برای جامعه و محیط زیست تلقی شود. از این رو مصرف‌کنندگان انتظار دارند که سیستم‌ها پایا، اطمینان‌بخش و ایمن باشند. بنابراین یک پرسش اساسی چنین مطرح می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم در طول عمر کاری آینده‌اش چه میزان و ایمنی آن چقدر است؟ قابلیت اطمینان یک سیستم احتمال عملکرد رضایت‌بخش آن سیستم تحت شرایط کار مشخص برای یک مدت زمان معین است. عملکرد یک سیستم در هیچ موردی به صورت قطعی قابل تعریف نیست بلکه ماهیت احتمالی دارد. تئوری احتمال به تنهایی قادر به پیش‌بینی قابلیت اطمینان یا ایمنی یک سیستم نیست و باید درک کاملی از سیستم، شرایط عملکرد و از کار افتادن آن، محیط‌های کار و تنش‌هایی که تحت آن شرایط واقع می‌شود در اختیار داشت (بیلینتون و آلن[1]، ۱۹۹۶).

ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت از دیرباز مورد توجه قرار گرفته و مقالات متعددی، شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم‌های مختلف را بررسی کرده است. به‌عنوان نمونه، کارکی[2] و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی دسترس‌پذیری نیروگاه بادی در کنار سایر نیروگاه‌های برقآبی شبکه پرداختند. حاجیان[3] و همکاران (۲۰۱۲)، شش آرایش مهم سیستم‌های اتوماسیون پست را بررسی و شاخص‌های قابلیت اطمینان هر طرح را بدست آورده و با یکدیگر مقایسه کردند؛ سپس با تغییر نرخ خرابی و نرخ تعمیرات تجهیزات اتوماسیون پست، آنالیز حساسیت را در آرایش‌های مختلف پست ارائه نمودند. مجید و صدیق[4] (۲۰۰۶) جهت بدست آوردن شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه برق‌آبی Dokan (عراق) از روش فرآیند مارکوف استفاده کردند. ساهاند[5] (۲۰۱۳) همین روش را در نیروگاه برق‌آبی Pathri (هند) برای سالهای ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ به کار گرفت. هدف آلِمانی[6] و همکاران (۲۰۱۰)، بررسی تأثیر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در مطالعات قابلیت اطمینان شبکه آرژانتین با در نظر گرفتن احتمال در دسترس بودن گاز طبیعی بود. در این مطالعات از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینانی مانند انتظار ازدست دادن بار، انتظار از دست دادن انرژی و ... استفاده شد. صبوحی[7] و همکاران (۲۰۱۶) از فرآیند مارکوف استفاده کرده و احتمال دسترس‌پذیری نیروگاه سیکل ترکیبی منتظرالقائم ایران را محاسبه نمودند. ونژانگ[8] و همکاران (۲۰۱۳) مبدل‌های AC/DC و DC/AC را در نیروگاه‌های بادی بررسی کرده و به کمک فرآیند مارکوف شش آرایش مختلف این نوع مبدل‌ها را از حیث قابلیت اطمینان مقایسه کردند.

سفیدگران[9] و همکاران (۲۰۱۲) فرآیند مارکوف را به همراه روش فراوانی و تداوم برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترانسفورمرهایی با سیستم خنک‌کنندگی هوا به کار بردند. کرمی هورستانی[10] و همکاران در سال ۲۰۱۴ روش مشابهی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های جبران گر توان راکتیو (SVC) بکار برده و تأثیر نرخ خرابی و تعمیرات اجزای مختلف آن را در جبران توان راکتیو سیستم بررسی نمودند.

میلر[11] و همکاران (۱۹۷۵) و مورای[12] (۱۹۷۹) به بررسی نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای Foyers انگلستان پرداختند و اجزای موجود و ساختار آن را بطور کامل معرفی نمودند. مراجع مذکور از معدود مراجعی هستند که ساختار جامع یک نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای را معرفی می‌کنند. ژانگ[13] (۲۰۱۰) نحوه‌ی راه‌اندازی ماشین‌های سنکرون را در نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای توسط SFC[14] تشریح نمود. جوانجیو[15] و همکاران (۲۰۱۲) راهبردهای کنترلی و اصول طراحی اجزای اصلی سیستم تحریک ژنراتور را در نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای Xiangshuijian معرفی نمودند. هوی‌مین[16] (۲۰۱۲) حالات مختلف بهره‌برداری نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای Pushihe چین را بررسی و دنباله‌های کنترلی را برای نظارت وکنترل عملکرد

[1] Billinton & Allen
[2] Karki
[3] Hajian
[4] Majeed & Sadiq
[5] Sahuand
[6] Alemany
[7] Sabouhi
[8] Wen Zhang
[9] Sefidgaran
[10] Karami horestani
[11] Miller
[12] Murray
[13] Zhang
[14] Static Frequency Converter
[15] Guanghui
[16] Huimin

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

آن طراحی کردند. میرسعیدی[1] و همکاران (۲۰۱۲) نیروگاه سیاه‌بیشه ایران را معرفی و تأثیر آن را در تنظیم بار شبکه بررسی نمودند. هرینگ[2] و همکاران در سال ۲۰۱۳ روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملیاتی نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای را در افق یکسال ارائه نموده و نشان دادند که نیروگاه تلمبه-ذخیره-ای در تعادل بار، کنترل فرکانس و پایداری شبکه تأثیر مثبت دارد. چیو[3] و همکاران (۲۰۰۸) نقش واحدهای تلمبه-ذخیره-ای را در بازار خدمات جانبی و امنیت شبکه قدرت بررسی کرده و تحقیقات خود را در شبکه سراسری کشور تایوان انجام دادند.

با توجه به اهمیت نیروگاه های تلمبه- ذخیره‌ای در شبکه، این تحقیق به بررسی شاخص‌های قابلیت اطمینان نیروگاه های تلمبه-ذخیره‌ای می‌پردازد. جهت ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان می‌توان از روش‌های تحلیلی یا مشابه‌سازی استفاده نمود. با توجه به اینکه در سیستم های تلمبه ذخیره‌ای می توان سیستم را بصورت تحلیلی مدل‌سازی نمود لذا در این تحقیق به کمک فرآیند مارکوف و روش فراوانی و تداوم این شاخص‌ها محاسبه می‌شوند. به این منظور تاریخچه و ساختار این نیروگاه‌ها و مبانی کلی فرآیند مارکوف و روش فراوانی و تداوم معرفی می‌شوند. سپس سیستم مورد مطالعه و ساختار آن تشریح شده و در ادامه روش مذکور برای سیستم مورد نظر پیاده‌سازی و محاسبات عددی آن گزارش می‌شود. همچنین آنالیز حساسیت برای اجزای مختلف نیروگاه ارائه شده و در پایان نتیجه‌گیری نهایی مطالعات ارائه می‌گردد.

مواد و روش‌ها

نیروگاه‌های برق‌آبیِ تلمبه-ذخیره‌ای روشی برای تولید برق به منظور تأمین تقاضای اوج بار از طریق استفاده از آب بین دو مخزن، در ارتفاع‌های متفاوت است. در زمان تقاضای کم، از انرژی الکتریکی شبکه برای پمپاژ آب به ارتفاع بالاتر استفاده می‌شود و در زمان اوج بار شبکه، آب ازمخزن بالا، از طریق توربین تولیدکننده برق به طرف مخزن پایین تخلیه و توان الکتریکی تولید می‌گردد. بنابراین ایده اساسی در این نیروگاه-ها، ذخیره‌ی انرژی الکتریکی اضافی تولید شده در سیستم به شکل انرژی پتانسیل هیدرولیکی در زمان‌های غیراوج و استفاده از این انرژی در زمان‌های اوج است. باتوجه به تلفات تبخیر و تبدیل انرژی الکترومکانیکی، تقریباً بین ۷۰ تا ۸۵ درصد انرژی الکتریکی مصرف شده برای پمپاژ آب به مخزن بالا را می‌توان دوباره دریافت کرد. در نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره‌ای، به‌منظور کاهش هزینه‌ها از توربین‌های برگشت پذیر (پمپ-توربین) استفاده می‌شود.

در اواخر قرن نوزدهم، طرح تلمبه-ذخیره‌ای در حقیقت، یک مخزن طبیعی برای بهبود جریان آب در چرخه بسیاری از نیروگاه‌های برق‌آبی بود. چند دهه بعد، زمانی که بهره‌برداری نیروگاه‌های حرارتی بر سایر طرح‌ها غالب شده بود، طرح استفاده از مخزن بالادستی جهت پمپاژ آب ارائه شد. اولین نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای جهان در سال ۱۸۸۲ در زوریخ سوییس شروع به فعالیت کرد. پس از آن در سال ۱۹۰۹ نیروگاه دیگری در اسکاف هوسن این کشور راه‌اندازی شد که هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. اولین نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای انگلستان در سال ۱۹۲۰ در والکربون نصب شد و به این ترتیب تا سال ۱۹۲۵حدود ۳۵ نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای در سراسر اروپا مشغول به فعالیت شدند (پیکارد[4] (۲۰۱۲) و ژانگ[5] (۲۰۱۰)). از مزایای این نیروگاه‌ها می‌توان به متعادل نمودن بار شبکه،کاهش ساخت و ساز نیروگاه‌های فسیلی و هسته‌ای و فراهم‌سازی تسهیلات در بازار برق اشاره کرد (میرسعیدی و همکاران (۲۰۱۲)، چیو وهمکاران (۲۰۰۸)).

حالات عملیاتی مختلفی برای هر نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای وجود دارد. این حالات عبارتند از: عملیات آماده به کار، تولید، تولید درحالت کندانسوری، پمپاژ، عملیات black-start، عملیات عادی پمپاژ و تولید، عملیات تولید اضطراری، عملیات توقف الکتریکی و پایان عملیات (هوی مین[6]، ۲۰۱۲).

به‌دلیل این که نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای در دو مود ژنراتوری و موتوری کار می‌کند، باید بتوان ماشین‌های سنکرون آن را به نحوه مناسب تغییر حالت داد. ساده‌ترین راه برای تعویض حالت ژنراتور-موتوری استفاده از کلید تعویض روی شبکه است. اما این روش باعث افت ولتاژ شدید و ایجاد شوک الکتریکی در ماشین‌آلات می‌شود. به این ترتیب، بهترین روش استفاده از مبدل کنترل فرکانس است. سرعت موتورهای سنکرون را می‌توان با تغییر فرکانس منبع تغذیه کنترل کرد

[1] Mirsaeidi
[2] Hering
[3] ChWu
[4] Pickard
[5] Zhang
[6] Huimin

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

و در هر فرکانس خاص به سرعت سنکرون جدید دست یافت؛ مگر آنکه تغییرات به حدی باشد که موتور سنکرونیسم خود را از دست بدهد. برای کنترل سرعت موتورهای سنکرون از تغییر ولتاژ و فرکانس خروجی اینورتر یا سیکلو کانورتر و یا از روش کنترل اتوماتیک استفاده می‌شود (فیتزجرالد[1] و همکاران (۱۹۹۹)، ژانگ (۲۰۱۰)).

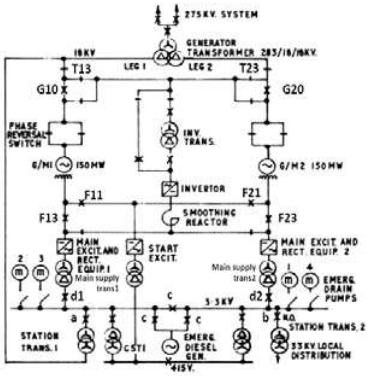
فرآیند مارکوف و روش فراوانی و تداوم

برای به‌دست‌آوردن شاخص‌های قابلیت اطمینان یک سیستم، ابتدا لازم است بلوک دیاگرام آن از دیدگاه قابلیت اطمینان ترسیم شود. این بلوک دیاگرام وضعیت موازی یا سری بودن اجزا را در تئوری قابلیت اطمینان مشخص می‌کند. هر کدام از این بلوک‌ها نمایانگر تجهیزات معینی بوده و دارای نرخ خرابی و تعمیرات مشخصی هستند. هرگاه زمان فرآیند تعمیرات برای تجهیزات تعمیرپذیر در مقایسه با زمان عملکرد آنها قابل چشم‌پوشی نباشد، جهت ارزیابی قابلیت اطمینان آنها از روش فرآیند مارکوف استفاده می‌شود.

شیوه ارزیابی شاخص‌های فراوانی و تداوم بر مبنای این مفهوم استوار است که احتمال برقراری هر حالتی از سیستم با میانگین تداوم آن حالت تقسیم بر میانگین زمان چرخه وقوع آن حالت در سیستم برابر است. این مفهوم تنها در مورد میانگین رفتار بلندمدت صحیح است و در مورد احتمالات در شرایط گذرا کاربرد ندارد. به طور کلی می‌توان گفت فراوانی وقوع هر حالت برابر با حاصل ضرب احتمال حالت در آهنگ ترک آن حالت است (بیلینتون و آلن[2]،۱۹۹۶) .

سیستم مورد مطالعه و ساختار آن

سیستم مورد مطالعه در این تحقیق، برداشت شده از نیروگاه Foyers است. این نیروگاه با ظرفیت۳۰۰ مگاوات سومین نیروگاه بزرگ تلمبه-ذخیره ای انگلستان و دومین نیروگاهی است که از توربین‌های معکوس‌پذیر نوع شفت استفاده می‌کند. طرح اصلی در یک حوضه آبریز به مساحت ۲۷۴ کیلومترمربع بر روی رودخانه Foyers احداث و برای تقویت جریان رودخانه در زمان کم آبی، دو سد ذخیره سازی اضافی در دریاچه Mhor ساخته شد. در این نیروگاه دو واحد ۱۵۰ مگاواتی وجود دارد که از طریق سه ترانسفورمر تکفاز ۳۳۰MVA و ۱۸/۲۸۳ KV به شبکه ۲۷۵ KV متصل شده‌اند (شکل۱). ایستگاه‌های کمکی توسط دو خط ۳/۳KV و ۴۱۵V تغذیه می‌شوند. خط اول از سه منبع تامین می‌شود: الف) ترانسفورمر ۷ MVA متصل به ترانسفورمر ۱۸KV اصلی؛ ب) ترانسفورمر ۷MVA متصل به شبکه محلی ۳۳KV و ج) یک دیزل ژنراتور آماده به کار با قدرت ۱/۴MW (میلر[3] و همکاران، ۱۹۷۵). خط دوم برای تغذیه پمپ‌های زهکشی و مصارف داخلی نیروگاه مانند روشنایی تعبیه شده‌است. این دو خط به منظور تغذیه تحریک موتور در شرایط پمپاژ طراحی نشده‌اند، اما بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط Black-start می‌توانند این مهم را انجام دهند. تجهیزات راه‌اندازی موتورها شامل یک اینورتر و یک ترانسفورمر و سوییچ‌های مربوطه است که برای هر دو واحد به صورت مشترک استفاده می‌شود. تجهیزات یکسوکننده برای هر واحد جداگانه بوده و نه‌تنها برای مبدل راه انداز بلکه برای تحریک در طول عملکرد نرمال ژنراتور/موتوراستفاده می‌شوند. در فرکانس ۵۰Hz ولتاژ AC ورودی به یکسوکننده ها ۸۰۰V و ولتاژ خروجی از اینورترها ۷۵۰V است. بیشینه ولتاژ لینک DC در طول عملیات نرمال ۸۵۰V است. هدف استفاده از راکتور در لینک DC، حذف ریپل جریان در طول عملکرد با تغییر بار و محدود کردن نرخ افزایش جریان در خطاهای کنترلی است. اجزای اصلی نیروگاه در شکل (۱) مشخص شده است (میلر و همکاران (۱۹۷۵)، مورای[4] (۱۹۷۹)). نکتهٔ حائز اهمیت این است که ساختار ارائه شده در شکل (۱) برای کلیه نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره‌ای برقرار است و تمرکز بر مدل نیروگاه Foyers از کلیت مسئله کم نمی‌کند.



شکل (۱): اجزای اصلی نیروگاه تلمبه ذخیره ای

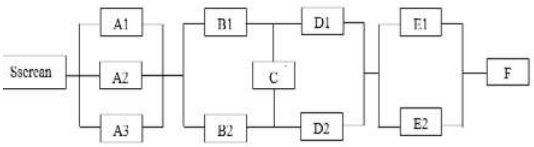
[1] Fitzgerald
[2] Billinton & Allen
[3] Miller
[4] Murray

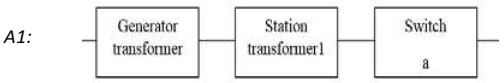
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

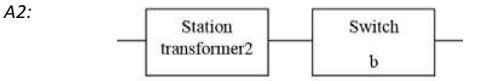
ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه تلمبه-ذخیره ای

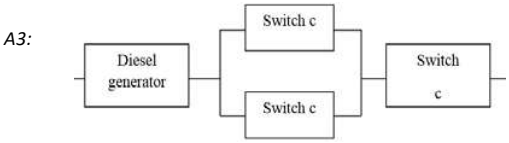
ارائهٔ بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان نیروگاه

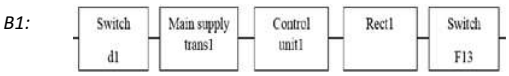
چنانچه در بخش‌های قبلی ذکر شد، اولین گام برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم، ترسیم بلوک دیاگرام آن از دیدگاه قابلیت اطمینان است. شکل (۲) این دیاگرام را برای نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای نشان می‌دهد. بلوک‌های مختلف در این شکل، از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند که در ادامه معرفی می‌شوند. اجزای معرفی شده بر مبنای نامگذاری صورت گرفته در شکل (۱) هستند.

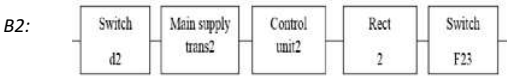


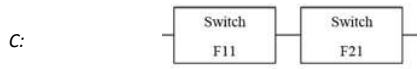


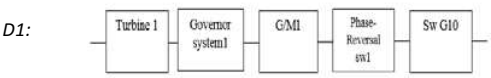


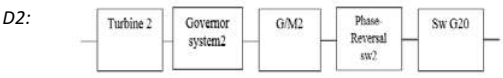


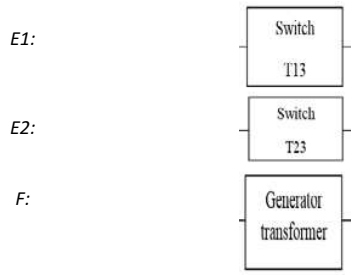












شکل(۲): بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای

بلوک Sscrean معرف دریچه ورود و خروج آب از مخزن بالادست و لوله‌های عبور دهنده آن است. همانطور که در بخش قبل و شکل (۱) مشخص شده است، جهت تغذیه جریان تحریک از خط ۳/۳kV استفاده می‌شود. این خط از سه منبع تأمین می‌شود. به این دلیل که این سه منبع کار مشابهی را انجام می‌دهند، بلوک دیاگرام‌های آنها موازی در نظر گرفته می‌شود (بلوک‌های A۱، A۲ و A۳). جریان تحریک تولید شده توسط بلوک RECT۱ از طریق کلید F۱۳ به ژنراتور/موتور۱ می‌رسد. بلوک RECT۱ شامل تجهیزات یکسوکننده تریستوری و سیستم خنک کننده آن است. همین فرآیند در مسیر RECT۲ و کلید F۲۳ برای ژنراتور/موتور۲ انجام می‌شود. علاوه بر آن دو کلید قدرت در بلوک C جریان تحریک را در مسیری مشترک به هر دو ژنراتور می‌رسانند. توان تولید شده از واحدها از دو طریق کلید E۱ و یا کلید E۲ به ترانسفورمر اصلی و سپس به شبکه انتقال می‌یابد. بنابراین E۱ و E۲ از دیدگاه قابلیت اطمینان موازی هستند. دلیل مدل نکردن تجهیزات اینورتر و راکتور این است که این تجهیزات در زمان راه اندازی و تغییر حالت موتوری به ژنراتوری کاربرد دارند و در حالت کار عادی نیروگاه از دیدگاه قابلیت اطمینان تاثیری ندارند (بیلینتون و آلن[1]،۱۹۹۶).

برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان به کمک روش فرآیند مارکوف لازم است نرخ خرابی و نرخ تعمیر هر بلوک بدست آید. برای مثال این محاسبات برای بلوک A۱ (شکل ۳-الف) در معادله‌های ۱ تا ۴ آمده است. در این معادلات، P نماد احتمال هر حالت و μ وλ به ترتیب نرخ تعمیرات و خرابی بلوک هستند. بدین ترتیب شکل (۳-الف) به شکل (۳-ب) خلاصه می‌شود. محاسبات جهت سایر بلوک‌ها نیز به طریق مشابه صورت گرفته است.

[1] Billinton & Allen

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

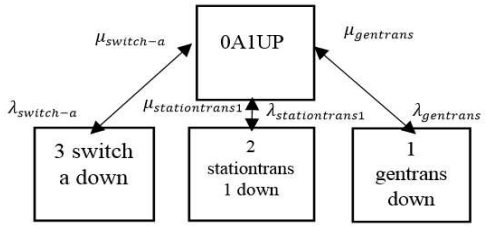
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

$$P_{A1}up = \left(1 + \frac{\lambda_{gentrans}}{\mu_{gentrans}} + \frac{\lambda_{stationtrans1}}{\mu_{stationtrans1}} + \frac{\lambda_{swcha}}{\mu_{swcha}}\right)^{-1} \quad (۱)$$

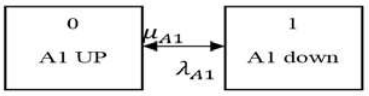
$$P_{A1}down = \left(1 + \frac{\lambda_{gentrans}}{\mu_{gentrans}} + \frac{\lambda_{stationtrans1}}{\mu_{stationtrans1}} + \frac{\lambda_{swcha}}{\mu_{swcha}}\right)^{-1} \left(\frac{\lambda_{gentrans}}{\mu_{gentrans}} + \frac{\lambda_{stationtrans1}}{\mu_{stationtrans1}} + \frac{\lambda_{swcha}}{\mu_{swcha}}\right) \quad (۲)$$

$$\lambda_{A1} = \lambda_{gentrans} + \lambda_{stationtrans1} + \lambda_{swcha} \quad (۳)$$

$$\mu_{A1} = \left(\lambda_{gentrans} + \lambda_{stationtrans1} + \lambda_{swcha}\right).\left(\frac{\lambda_{gentrans}}{\mu_{gentrans}} + \frac{\lambda_{stationtrans1}}{\mu_{stationtrans1}} + \frac{\lambda_{swcha}}{\mu_{swcha}}\right)^{-1} \quad (۴)$$



(الف)



(ب)

شکل (۳): بلوک دیاگرام مربوط به A۱

نرخ‌های خرابی و تعمیرات اجزای نیروگاه در جدول (۱) گزارش شده است (بیلینتون و آلن (۱۹۹۶)، ساهاند[1] (۲۰۱۳)).

یادآوری می‌شود که نرخ خرابی دستگاه‌ها با توجه به توابع مختلف احتمال، می‌تواند ثابت، کاهشی و یا افزایشی باشد. در فاصله زمانی طفولیت (راه‌اندازی[2]) دستگاه، نرخ خرابی سیر نزولی داشته و نسبت به زمان کاهش می‌یابد. دستگاه با گذراندن دوره راه‌اندازی اولیه خود وارد دوران عمر طبیعی می‌شود و نرخ خرابی آن ثابت می‌ماند. این دوره مربوط به مرحله بعد از رفع عیب و متعلق به دوران کار نرمال و ایده‌آل دستگاه است و قابلیت اطمینان تجهیز متناسب با وضعیت موجود خود، به‌صورت طبیعی مستهلک می‌شود و ضریب تناسب این استهلاک همان نرخ خرابی ثابت λ است. دستگاه پس از طی دوره عمر طبیعی خود وارد دوره فرسایش یا پیری می‌شود. در این دوره، نرخ خرابی نسبت به زمان افزایش می‌یابد.

در این تحقیق تمامی تجهیزات در دوره عمر مفید خود فرض شده و نرخ خرابی آنها ثابت است. همچنین محاسبات در حالت کار ماندگار نیروگاه انجام شده است و شرایط بحرانی در نظر گرفته نشده است.

از اعداد جدول (۱) جهت محاسبه نرخ‌های خطا و تعمیر بلوک‌ها با توجه به معادلات (۳) و (۴) استفاده می‌شود و نرخ خرابی و تعمیرات مربوط به هر یک از بلوک های شکل (۲)، محاسبه می‌گردد. در جدول (۲)، نتایج حاصل ارائه شده است.

جدول (۱): نرخ‌های خرابی و تعمیرات اجزای نیروگاه

نام تجهیز	$\lambda\ [\frac{f}{hr}]$	$\mu[\frac{r}{hr}]$
ترانسفورمر	۰/۰۰۰۱۸۳۶	۰/۰۲۹۹۳
ژنراتور	۰/۰۰۰۰۹۱۳	۰/۱۲۶۵۸
RECT	۰/۰۰۰۰۷	۰/۷۱۴۲۹
توربین	۰/۰۰۰۳۷	۰/۱۳۴۱۷
سوئیچ	۰/۰۰۲۳	۰/۰۵
دیزل	۱/۹۵۴۷e-۴	۰/۰۱۴۳
یونیت کنترل	۰/۰۰۰۲	۰/۰۲
سوئیچ تعویض فاز	۰/۰۰۲۳	۰/۰۵
Sscrean	۰/۰۰۰۰۱	۰/۱۱۲
سیستم گاورنر	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۲۶۴۶

جدول (۲): نرخ خرابی و نرخ تعمیرات بلوک‌ها

بلوک	$\lambda\ [\frac{f}{hr}]$	$\mu[\frac{r}{hr}]$
Sscrean	۰/۰۰۰۰۱	۰/۱۱۲
*A*۱	۰/۰۰۲۶۶۷۲	۰/۰۴۵۷۷۴۲
*A*۲	۰/۰۰۲۴۸۳۳۶	۰/۰۴۷۶۳۸۵
*A*۳	۰/۰۴۷۹۵۴۷	۰/۰۴۵۳۸۵
*B*۱	۰/۰۰۵۰۵۳۶	۰/۰۴۶۶۹۲
*B*۲	۰/۰۰۵۰۵۳۶	۰/۰۴۶۶۹۲

[1] Sahuand

[2] Commissioning

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

D۱	۰/۰۰۵۱۵۱۳	۰/۰۵۲۰۹۶
D۲	۰/۰۰۵۱۵۱۳	۰/۰۵۲۰۹۶
C	۰/۰۰۴۶	۰/۰۵
E	۰/۰۰۰۱۹۳۸	۰/۱
F	۰/۰۰۰۱۸۳۶	۰/۰۲۹۹۳

ترکیب بلوک‌ها با هدف ساده سازی مدل

جهت ساده‌سازی بیشتر محاسبات و کاهش فضای حالت می‌توان بلوک‌ها را با هم ترکیب کرد. در ادامه، محاسبات برای بلوک‌های ترکیب شده انجام می‌شود و بدین ترتیب کم‌ترین فضای حالت ممکن برای نیروگاه بدست می‌آید.

نتایج

زیرسیستم A

جهت ساده سازی محاسبات، عضوهای A۱، A۲ و A۳ در یک زیر سیستم با نام A بررسی شده است. نمودار فضای حالت A در شکل (۴) آمده است. بدلیل موازی بودن A۱، A۲ و A۳ اگر یکی از این سه بلوک در دسترس باشد زیر سیستم در حالت عملکرد است و حالت شکست زیرسیستم زمانی رخ می دهد که همه بلوک‌ها در حالت شکست باشند.

- حالات عملکرد صحیح A : ۰ ، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷
- حالت شکست A : حالت ۸

به کمک روش فراوانی و تداوم، هشت حالت نشان داده شده در شکل (۴) ادغام شده و به دو حالت شکست و عملکرد صحیحِ زیرسیستم A خلاصه می‌شود (شکل ۵). محاسبات در معادلات (۵) الی (۱۰) انجام شده است. در این معادلات P نمایانگر احتمال و f فراوانی هر حالت است.

$$P_1' = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad (۵)$$

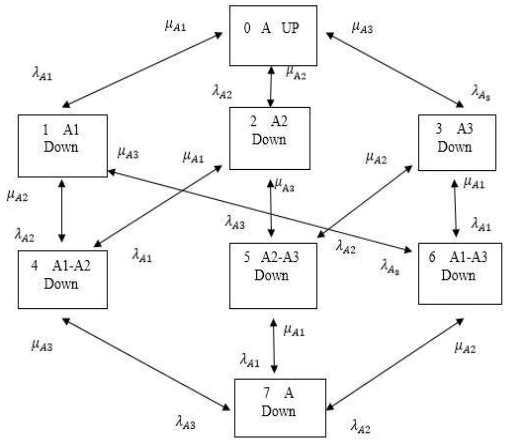
$$P_2' = P_7 \quad (۶)$$

$$f_{1'2'} = f_{47} + f_{57} + f_{67} \quad (۷)$$

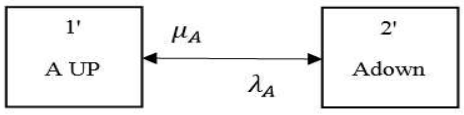
$$f_{2'1'} = f_{74} + f_{67} + f_{57} \quad (۸)$$

$$\lambda_A = \frac{f_{1'2'}}{P_{1'}} = \frac{(\lambda_{A3})P4 + (\lambda_{A1})P5 + (\lambda_{A2})P6}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6} \quad (۹)$$

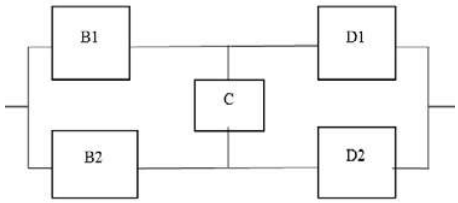
$$\mu_A = \frac{f_{2'1'}}{P_2'} = \frac{(\mu_{A1} + \mu_{A2} + \mu_{A3})P_7}{P_7} \quad (۱۰)$$



شکل (۴): نمودار فضای حالت زیر سیستم A



شکل(۵): نمودار فضای حالت کاهش یافته زیر سیستم A



شکل (۶): بلوک دیاگرام زیر سیستم BCD

زیر سیستم BCD

به طور مشابه جهت ساده‌سازی محاسبات، بلوک‌های B۱، B۲، C، D۱ و D۲ در قالب زیر سیستم BCD (شکل ۶) بررسی می‌شوند. این زیر سیستم دارای ۳۲ حالت مختلف در فضای حالت خود است (شکل ۷)، که پس از ادغام حالات مشابه به سه حالتِ ظرفیت کامل، نیمه ظرفیت و شکست خلاصه می‌شود (شکل ۸). دلیل این رویکرد آن است که این زیر سیستم مربوط به دو واحد نیروگاه است و اگر یکی از این واحدها در دسترس نباشد، نیروگاه در حالت نیمه ظرفیت کار می‌کند. معادلات (۱۱) تا (۲۳) محاسبات مربوط به ترکیب حالت‌ها را نمایش می‌دهند.

- حالت‌های تمام ظرفیت : ۰، ۱، ۲، ۳
- حالت‌های نیمه ظرفیت : ۴، ۵، ۷، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۹، ۲۱، ۲۲

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

- حالت‌های شکست : ۶، ۱۰، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۲۰،۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱

$$P_{0\prime} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 \quad (۱۱)$$

$$P_{1\prime} = P_4 + P_5 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} + P_{15} + P_{19} + P_{21} + P_{22} \quad (۱۲)$$

$$P_{2\prime} = P_6 + P_{10} + P_{16} + P_{17} + P_{20} + P_{18} + P_{23} + P_{24} + P_{25} + P_{26} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} \quad (۱۳)$$

$$f_{0\prime1\prime} = f_{04} + f_{05} + f_{17} + f_{18} + f_{19} + f_{2-11} + f_{2-12} + f_{2-13} + f_{37} + f_{3-11} + f_{3-14} + f_{3-15} \quad (۱۴)$$

$$f_{1\prime0\prime} = f_{40} + f_{50} + f_{71} + f_{81} + f_{91} + f_{11-2} + f_{12-2} + f_{13-2} + f_{73} + f_{11-3} + f_{14-3} + f_{15-3} \quad (۱۵)$$

$$f_{0\prime2\prime} = f_{16} + f_{26} \quad (۱۶)$$

$$f_{2\prime0\prime} = f_{61} + f_{62} \quad (۱۷)$$

$$f_{1\prime2\prime} = f_{5-10} + f_{4-10} + f_{12-17} + f_{8-17} + f_{9-18} + f_{13-18} + f_{12-23} + f_{13-23} + f_{14-24} + f_{15-24} + f_{9-25} + f_{8-25} + f_{19-26} + f_{21-26} + f_{22-27} + f_{7-20} + f_{9-20} + f_{15-20} + f_{22-29} + f_{21-29} + f_{19-30} \quad (۱۸)$$

$$\lambda_{0\prime1\prime} = \frac{f_{0\prime1\prime}}{P_{0\prime}} = \frac{(\lambda_{D1}+\lambda_{D2})P_0+(\lambda_C+\lambda_{D1}+\lambda_{D2})P1+(\lambda_C+\lambda_{D1}+\lambda_{D2})P_2+(\lambda_{B1}+\lambda_{B2}+\lambda_{D1}+\lambda_{D2})P_3}{P_0+P_1+P_2+P_3} \quad (۱۹)$$

$$\lambda_{0\prime2\prime} = \frac{f_{0\prime2\prime}}{P_{0\prime}} = \frac{\lambda_{B2}P1+\lambda_{B1}P2}{P_{0\prime}} \quad (۲۰)$$

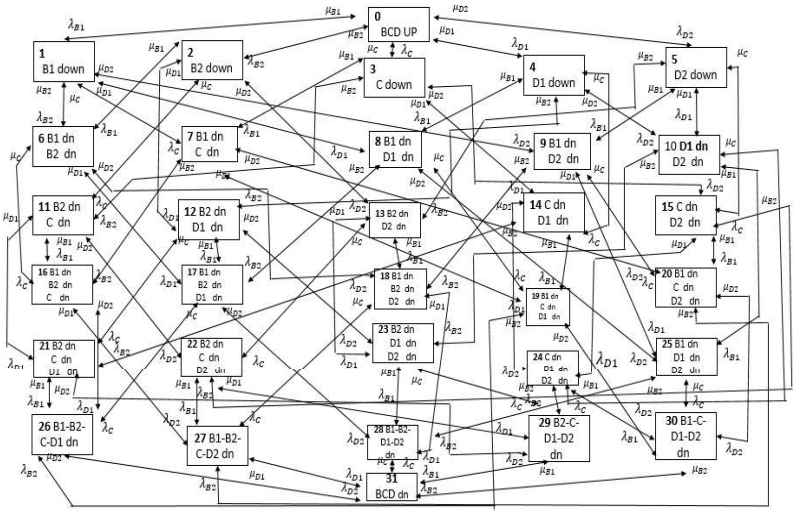
$$\mu_2\prime0\prime = f_2\prime0\prime/P_2\prime = (\mu_B2\ P6 + \mu_B1\ P6)/P_2\prime \quad (۲۱)$$

$$\mu_{1\prime0\prime} = \frac{f_{1\prime0\prime}}{P_{1\prime}} = \frac{\mu_{D1}P_4+\mu_{D2}P_5+\mu_C P_7+\mu_{D1}P_8+\mu_{D2}P_9+\mu_C P_{11}+P_{12}\mu_{D1}+P_{13}\mu_{D2}+\mu_{B1}P7+P_{11}\mu_{B2}+\mu_{D1}P_{14}+\mu_{D2}P_{15}}{P_{1\prime}} \quad (۲۲)$$

$$\lambda_{1\prime2\prime} = \frac{f_{1\prime2\prime}}{P_{1\prime}} = \frac{P_5\lambda_{D1}+P_4\lambda_{D2}+P_{12}\lambda_{B1}+P_8\lambda_{B2}+P_9\lambda_{B2}+P_{13}\lambda_{B1}+P_{12}\lambda_{D2}+P_{13}\lambda_{D1}+P_{14}\lambda_{D2}+P_{15}\lambda_{D1}+P_9\lambda_{D1}+P_8\lambda_{D2}+P_{19}\lambda_{B2}+P_{21}\lambda_{B1}+P_{22}\lambda_{B1}+P_7\lambda_{D2}+P_{22}\lambda_{D1}+P_{21}\lambda_{D2}+P_{19}\lambda_{D2}+P_9\lambda_C}{P_{1\prime}} \quad (۲۳)$$

سایر زیر سیستم‌ها

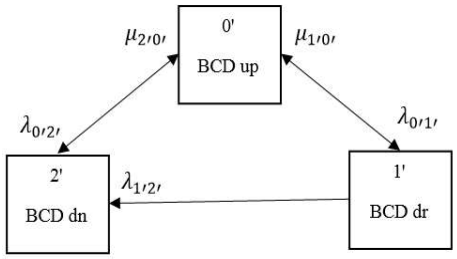
به طور مشابه به کمک روش فراوانی و تداوم بلوک‌های E۱، E۲ و F با هم و بلوک‌های Sscrean و A با هم ادغام شده و به ترتیب بلوک‌هایEF و SSA حاصل می‌شوند (شکل۹). با استفاده از اطلاعات جدول (۲)، محاسبات قابلیت اطمینان برای تمام زیر سیستم‌ها انجام می‌شود. جدول (۳) نرخ‌های خرابی و تعمیرات زیر سیستم BCD و جدول (۴) نتایج محاسبات برای سایر زیر سیستم‌ها را نشان می‌دهند.



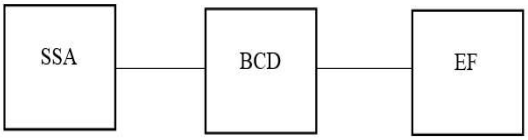
شکل (۷):نمودار فضای حالت زیر سیستمBCD

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]



شکل (۸): نمودار فضای حالت کاهش یافته BCD



شکل (۹): بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان نیروگاه پس از ادغام زیرسیستم‌ها

جدول (۳): نرخ خرابی (تعداد در ساعت) و نرخ تعمیرات (تعداد در ساعت) زیر سیستم BCD

$\lambda_{1'2'}$	۵/۳۹۵ e-۵
$\mu_{1'0'} = \mu_{BCD-dr}$	۰/۰۵۴۳۱۷
$\mu_{2'0'}$	۰/۵۵۴۱۲۲۲
$\lambda_{0'2'} = \lambda_{BCD}$	۷/۲۲۵۳۲۴۷ e-۴
$\lambda_{0'1'} = \lambda_{BDCDR}$	۱/۱۶۷۳۹۵۵۷e-۲

جدول(۴): نرخ خرابی و نرخ تعمیرات زیر سیستم‌ها

زیرسیستم	$\lambda\ [\frac{f}{hr}]$	$\mu\ [\frac{r}{hr}]$
A	۱/۵۶۱۶e-۴	۰/۱۳۸۷۹۸
EF	۳/۷۷ e-۴	۰/۰۴۶۷۵۲
SSA	۱/۶۶۱۶e-۴	۰/۱۳۶۸۲۸

نمودار فضای حالت کل نیروگاه

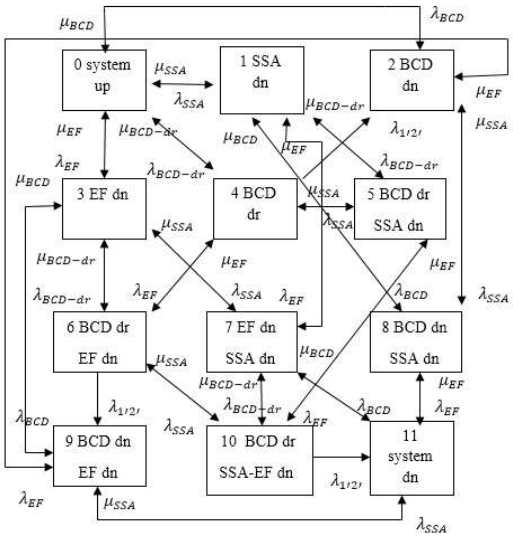
پس از ساده‌سازی‌های انجام شده بلوک دیاگرام کلی نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای به شکل (۹) خلاصه می‌شود. با توجه به این که EF و SSA هر کدام دو حالت و BCD سه حالت محتمل دارند، کل فضای حالت ممکن دوازده حالت خواهد بود. شکل (۱۰) نمودار فضای حالت نیروگاه را نشان می‌دهد. این حالات را می‌توان به سه حالت شکست، نیمه ظرفیت و ظرفیت کامل خلاصه کرد. بدین ترتیب احتمال رخداد حالات دسترس-پذیری، دسترس ناپذیری و نیمه ظرفیت نیروگاه بدست می-آید. روابط (۲۴) تا (۲۶) جمع بندی نهایی محاسبات را نشان می‌دهند.

- حالت شکست سیستم :۱ ، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۸ ،۹، ۱۰، ۱۱
- حالت نیمه ظرفیت سیستم : ۴
- حالت ظرفیت کامل: ۰

(۲۴) - احتمال ظرفیت کامل: $P_{UP} = ۰/۸۳۲۵۳۱$

(۲۵) - احتمال نیمه ظرفیت: $P_{Derated} = ۰/۱۶۲۷۷۶$

(۲۶) - احتمال شکست: $P_{Down} = ۰/۰۰۴۶۹۳$



شکل (۱۰): نمودار فضای حالت نیروگاه تلمبه-ذخیره ای

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

آنالیز حساسیت

در این بخش حساسیت احتمال رخداد حالات ظرفیت کامل و نیمه ظرفیت نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای در برابر نرخ‌های خرابی و تعمیرات اجزای تشکیل دهنده مورد بحث قرار می گیرد.

شاخص $\frac{\lambda}{\mu}$

براساس شکل (۲) ، ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای از طریق مدل‌سازی یازده بلوک اصلی صورت می‌گیرد. جهت بررسی حساسیت از شاخص $\frac{\lambda}{\mu}$ استفاده می‌شود. از دیدگاه قابلیت اطمینان، تجهیزات یا بلوک‌هایی که دارای مقدار بالاتر شاخص $\frac{\lambda}{\mu}$ باشند باعث افزایش بیشتر ریسک سیستم می‌گردند. به این منظور بهره‌بردار سیستم می‌تواند با کاهش نرخ خرابی و یا افزایش نرخ تعمیر این اجزا وضعیت عمکرد صحیح نیروگاه را بهبود بخشد. جدول (۵) این شاخص را برای بلوک های اصلی سیستم نمایش می‌دهد.

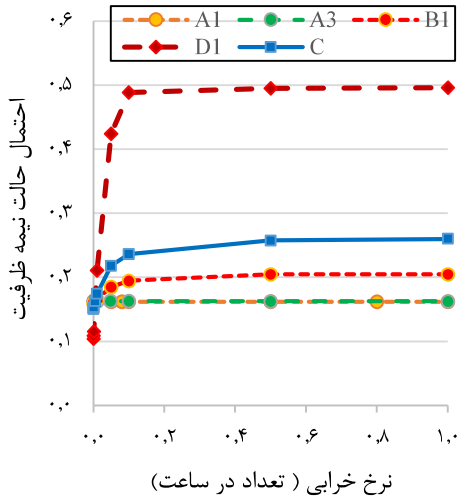
جدول (۵) : شاخص $\frac{\lambda}{\mu}$ برای نیروگاه

بلوک	λ/μ
Sscrean	۸/۹۲۸۶ e-۵
A۱	۵/۸۲۷ e-۱
A۲	۵/۲۱۳e-۲
A۳	۱/۰۵۶۶۹۲ e-۱
B۱	۱/۰۸۲۳۲۳e-۱
B۲	۱/۰۸۲۳۲۳e-۱
D۱	۹/۸۸۸e-۲
D۲	۹/۸۸۸e-۲
C	۹/۲e-۲
E	۱/۹۳۷۷e-۳
F	۵/۷۰۷۸e-۵

حساسیت احتمال حالت‌های ظرفیت کامل و نیمه ظرفیت نیروگاه به نرخ‌های خرابی و تعمیرات اجزا

برای تحلیل حساسیت احتمال حالات ظرفیت کامل و نیمه ظرفیت نیروگاه، لازم است نرخ شکست و یا نرخ تعمیر هر یک از بلوک‌ها در حالی که نرخ‌های سایر اجزاء ثابت هستند تغییر یابند. محاسبات برای بلوک‌هایی که دارای شاخص $\frac{\lambda}{\mu}$ بالاتری هستند انجام شده است. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) میزان حساسیت احتمال حالات ظرفیت کامل و نیمه ظرفیت نیروگاه به تغییرات نرخ خرابی بلوک‌های مهم‌تر سیستم را نشان می‌دهند. مشاهده می شود با افزایش نرخ خرابی، احتمال حضور در حالت ظرفیت کامل کاسته شده و در مقابل احتمال رخداد حالت نیمه ظرفیت افزایش یافته است.

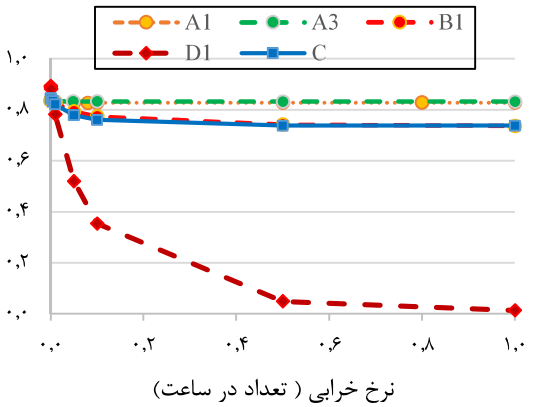
همچنین شکل های (۱۳) و (۱۴) میزان حساسیت احتمال حالات ظرفیت کامل و نیمه ظرفیت نیروگاه به تغییرات نرخ تعمیرات را نمایش می دهند. با افزایش نرخ تعمیرات احتمال حضور در حالت نیمه ظرفیت کاسته شده و در مقابل احتمال رخداد حالت ظرفیت کامل افزایش می یابد.



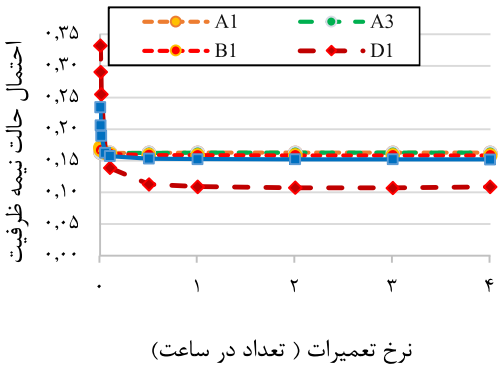
شکل (۱۱): حساسیت احتمال نیمه ظرفیت نیروگاه به نرخ خرابی تجهیزات

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

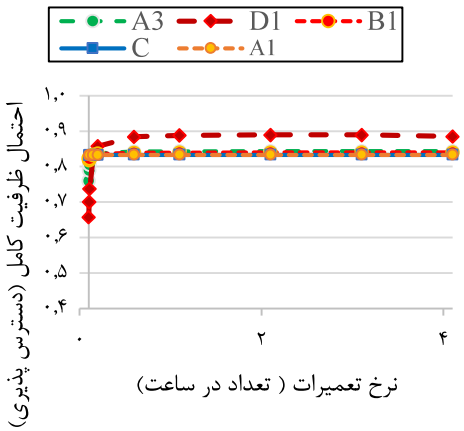
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]



شکل (۱۲) : حساسیت احتمال ظرفیت کامل نیروگاه به نرخ خرابی تجهیزات



شکل (۱۳): حساسیت احتمال نیمه ظرفیت نیروگاه به نرخ تعمیرات تجهیزات



شکل (۱۴): حساسیت احتمال ظرفیت کامل نیروگاه به نرخ تعمیرات تجهیزات

نتیجه گیری

با توجه به وابستگی روزافزون زندگی امروزی به انرژی الکتریکی، دسترس پذیری سیستم برق برای مصرف کنندگان اهمیت بالایی دارد. نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای نقش مهمی در بهبود کیفیت و افزایش دسترس‌پذیری انرژی در شبکه سراسری دارد. در این مقاله به ارزیابی قابلیت اطمینان یک نیروگاه تلمبه ذخیره ای پرداخته شد. به این منظور مدل قابلیت اطمینان اینگونه از نیروگاه‌ها استخراج گردید. با استفاده از فرآیند مارکوف و روش فراوانی و تداوم، ارزیابی دسترس‌پذیری نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای صورت‌پذیرفت. در ادامه با تجمیع حالات محتمل، احتمالات دسترس‌پذیری، دسترس ناپذیری و فعالیت نیروگاه با نیمه ظرفیت محاسبه گردید. سپس آنالیز حساسیت احتمالات به تغییرات نرخ‌های خرابی و تعمیرات صورت گرفت و نشان داده شد کاهش نرخ خرابی و یا افزایش نرخ تعمیرات تجهیزات مختلف به چه میزان بر افزایش احتمال رخداد ظرفیت کامل و کاهش احتمال رخداد نیمه ظرفیت تاثیر می‌گذارند.

مراجع

1- Alemany, J. M., Moitre, D. and Magnago, F. (2010). "Power System Reliability Considering Combined Cycle Plants." *IEEE Latin America Transactions.* 8(5), 547-557.

2- Billinton, R. and Allen, R. N. (1992). "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques." *2nd edition,* NewYork: Plenum.

3- ChWu, CH., Lee, J. W., Lung C. and Hong-Wei, L. (2008). "Role and Value of Pumped Storage Units in an Ancillary Services Market for Isolated Power Systems—Simulation in the Taiwan Power System." *IEEE Transactions on Industry Application*. 44(6), 1924-1929.

4- Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. J. R. and Umans, S. D. (1999). "Electric Machinery." 6th edition.

5- Guanghui, H., Weiguo, H. and Xiaoluo, L. (2012). "Excitation system for Xiangshuijian Pumped Storage unit." *Hangzhou: International Conference on Sustainable Power Generation and Supply.* 1-5.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

Pumped Hydro For Massive Energy Storage." *Proceedings of the IEEE.* 100(2), 473-484.

16- Sabouhi, H., Abbaspour, A., Fotuhi-firuzabad, M. and Dehghanian, P. (2016). "Reliability modeling and availability analysis of combined cycle power plants." *Electrical Power and Energy Systems.* 79(1), 108–119.

17- Sahuand, M. (2013). "Reliability and Availability Evaluation of Hydro Power Station." *International Journal on Emerging Technologies*. 4(2), 89-93.

18- Sefidgaran, M., Mirzaie, M. and Ebrahimzadeh, M. (2012). "Reliability model of the power transformer with ONAF cooling." *Electrical Power and Energy Systems.* 35(1), 97–104.

19- Wen Zhang, C., Zhang, T., Chen, N. and Jin, T. (2013). "Reliability modeling and analysis for a novel design of modular converter system of wind turbines." *Reliability Engineering and System Safety.* 111(2), 86-94.

20- Zhang, Y. (2010). "Study of Process of Starting Pumped Storage Machines by Static Frequency Converter With Field Current Controlled." *Dalian: 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS).* 1(July 2010), 224-227.

6- Hajian, H., Hasanianfar, M. and Hamedani Golshan, M. E. (2012). "Quantitative Reliability Assessment of Various Automated Industrial Sunbstations and Their Impacts on Distribution Reliability." *IEEE Transactions on Power Delivery.* 27(3), 1223-1234.

7- Hering, P., Mosna, J., Janecek, E. and Hrycej, D. (2013). "Optimal scheduling of a pumped-storage hydro power plant operation." *Wroclaw: 13th International Conference on Environmental and Electrical Engineering (EEEIC)*. 166 – 171.

8- Huimin, W. (2012). "Design of the Control Sequence for Monitoring and Control System of Pushihe Pumped Storage Power Station." *Zhangjiajie: 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE).* 1, 329-331.

9- Karami Horestani, A., Hamedani Golshan, M. E. and Hajian, H. (2014). "Reliability modeling of TCR–FC type SVC using Markov process." *Electrical Power and Energy Systems.* 55(February 2014), 305–311.

10- Karki, R., Hu, P. and Billinton, R. (2010). "Reliability Evaluation Considering Wind and Hydro Power Coordination." *IEEE Transactions on Power Systems.* 25(2), 685-694.

11- Majeed, A. R., and Sadiq, M. (2006). "Reliability and Availability Evaluation of Dokan Hydro Power Station." *Caracas: 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Lation America.* 1-6.

12- Miller, D. J., Murray, A. T. L. and Marshall, C. (1975). "Foyers Pumped-Storage Project." *IET Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 122(11), 1222-1234.

13- Mirsaeidi, S., Gandomkar, M., Miveh, M. R. and Gharibdoost, M. R. (2012). "Power System Load Regulation by Pumped Storage Power Plants." *Tehran: Proceedings of 17th Conference on EPDC.* 1-5.

14- Murray, A. T. L. (1979). "Foyers Pumped Storage Scheme." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.* 98(5), 1739-1749.

15- Pickard, W.F. (2012). "The History, Present State, and Future Prospects Of Underground

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

Reliability Evaluation of the Pumped-Storage Plant Using Markov Process

Seyed Yaser. Derakhshandeh [1*]
Zohre Saeidi [2]

Abstract

Nowadays, reliability and availability are the most important criteria in all engineering sciences. Due to the high dependency of the life to electrical energy, the availability of power system is very important for consumers. As a matter of fact, the reliability of all main components of the power system should be high and adequate. In this research reliability evaluation of the pumped storage plant is carried out by using Markov process. For this purpose, an overview of the structure and the usage of the pumped storage plant is presented at first. Then, the main concepts of the Markov process model are reviewed and the appropriate model for reliability evaluation of a pumped storage plant is presented. By using the presented model and according to existing equipment, various indicators of reliability and also the possibilities of failure mode, full and half capacity of the plant are reported and sensitivity analysis is carried out to evaluate the effect of repair and failure rates of equipments on reliability of the system.

Keywords

Pumped -storage, Markov process, Reliability, Frequency and duration method.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.4.2]

1* Assistant Professor, Engineering Department, Shahrekord University, y_derakhshandeh@eng.sku.ac.ir.
2 M.Sc. Student , Shahrekord University.
Received: 2016/02/13 Accepted: 2016/05/30