

Reliability Modeling of ROR Power Plants in Power System Adequacy StudiesEsmail Khalilzadeh, *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Arsanjan Branch, Islamic Azad University,
Arsanjan, Iran
Esmail.khalilzadeh@iau.ac.ir

Received: 25 November 2023**Revised:** 24 December 2023**Accepted:** 26 December 2023**Abstract:**

Deployment of renewable energies for the electricity generation is on the rise around the world. Amongst is the Run-Of-The-River (ROR) power plant whose output power is variable throughout the year depending on the river water flow of the respective river. The inherent uncertainty associated with renewable energy resources calls new stochastic modeling approaches to measure the impacts of these energies on the power system performance. The uncertain and intermittent nature of these plants arisen from variability of river water flow, however, has led to some problems in their integration to power systems. This paper develops an analytical reliability model for ROR power plants. The model is based on the state space analysis and combination with other renewable and conventional power plants, is devised with the intention of being used in adequacy studies of power systems. Failure of related components and the intermittent nature of river water flow are concurrently accommodated in the proposed model. The well-known technique of *fuzzy c-means* clustering is employed to find the optimal states of the resultant multi-state reliability model. Two reliability test systems, i.e., RBTS and IEEE-RTS, are examined to demonstrate the effectiveness of the proposed reliability model. The water flow data of Sheshpir River in Pars region of Iran is used.

Keywords: Adequacy studies, fuzzy c-means clustering, intermittency, reliability modeling, run-of-the- river power plant

Corresponding Author: Esmail Khalilzadeh**Corresponding Author Address:** Department of Electrical and Computer Engineering- Daneshgah Blvd. -Islamic Azad University- Arsanjan Branch, Iran

مدل سازی قابلیت اطمینان نیروگاه های آبی جریانی در مطالعات کفایت سیستم قدرت

اسماعیل خلیل زاده، استادیار

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران
Esmail.khalilzadeh@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

چکیده: استفاده از انرژی های تجدیدپذیر جهت تولید برق در سراسر جهان رو به افزایش است. در میان آنها، نیروگاه آبی جریانی (ROR) است که توان خروجی آن در طول سال بسته به جریان آب رودخانه مربوطه متغیر است. عدم قطعیت ذاتی مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر، رویکردهای مدل سازی تصادفی جدید را برای اندازه گیری تأثیرات این انرژی ها بر عملکرد سیستم قدرت ایجاد می کند. ماهیت نامطمئن و متناوب این نیروگاه ها از تغییر جریان آب ناشی می شود، که منجر به ایجاد مشکلاتی در ترکیب آنها با سیستم قدرت شده است. این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان تحلیلی برای نیروگاه های آبی جریانی ارائه می کند. این مدل مبتنی بر تحلیل فضای حالت است و با هدف استفاده در مطالعات کفایت سیستم های قدرت، در ترکیب با سایر نیروگاه های تجدیدپذیر و متعارف، ابداع شده است. خرابی اجزای مرتبط و ماهیت متناوب جریان آب رودخانه به طور همزمان در مدل پیشنهادی گنجانده شده است. الگوریتم شناخته شده خوشه بندی C میانگین فازی (FCM) برای یافتن حالت های بهینه مدل قابلیت اطمینان چند حالتی حاصل استفاده می شود. دو سیستم تست قابلیت اطمینان شناخته شده، یعنی RBTS و IEEE-RTS برای نشان دادن اثربخشی مدل قابلیت اطمینان پیشنهادی مورد بررسی قرار می گیرند. از داده های جریان آب رودخانه ششپیر در استان فارس ایران استفاده شده است.

کلمات کلیدی: تکنیک خوشه بندی C میانگین فازی، عدم قطعیت، مطالعات کفایت، مدل قابلیت اطمینان، نیروگاه های آبی جریانی

نام نویسنده ی مسئول: اسماعیل خلیل زاده

نشانی نویسنده ی مسئول: ارسنجان - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارسنجان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

انرژی های تجدیدپذیر مانند باد، خورشید، آب رودخانه و زمین گرمایی به طور فزاینده ای در سراسر جهان برای تولید برق مورد استفاده قرار می گیرند. پاکیزگی، هزینه عملیاتی کم و پایداری منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ (RERS) دلایل اصلی استقرار رو به رشد چنین نیروگاه های پاک هستند. بسیاری از کشورها در سراسر جهان از استانداردهای پرتفوی تجدیدپذیر^۲ (RPS) در برنامه های برنامه ریزی توسعه تولید خود پیروی می کنند تا درصد مشخصی از کل بارهای خود را از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر (RER) تامین کنند. در این میان، نیروگاه های آبی جریانی^۳ (ROR) در ارتفاعات بالا، معمولاً بالای آبشارها و مناطق کوهستانی با رودخانه های سریع نصب می گردند. مانند نیروگاه های ۶۲ مگاواتی مامکوام و ۵۵ مگاواتی اسکوکام که هر دو در کانادا وجود دارند [۱]. نیروگاه یوگور ۷۳ مگاواتی در چین [۲]، ۴۲ مگاوات برشا در ایتالیا [۳] و نیروگاه ۳۰ مگاوات زنجیره ای یاسوج در ایران نمونه های دیگری از این نیروگاه ها می باشند. اگرچه یک نیروگاه آبی جریانی ساده ظرفیت پایینی دارد، ظرفیت های تولید قابل توجهی را می توان با پشت سر هم قرار دادن تعدادی از نیروگاه های آبی جریانی ساده به دست آورد. به عنوان مثال، نیروگاه آبی جریانی ۳۰ مگاواتی یاسوج در ایران، اتصال زنجیره ای شش واحد آبی جریانی کوچک ۵ مگاواتی است. نیروگاه های آبی جریانی ممکن است توان تولید شده را به شبکه AC ولتاژ بالا برسانند یا تقاضای خارج از شبکه را در نزدیکی بار تامین کنند. به دلیل تنوع ذاتی و متناوب بودن منابع انرژی تجدیدپذیر، جنبه های مختلف سیستم قدرت، به ویژه قابلیت اطمینان^۴، تحت تأثیر افزایش سطح نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر قرار می گیرد. تجزیه و تحلیل عددی اثرات منابع انرژی تجدیدپذیر بر عملکرد سیستم قدرت، تکنیک های جدیدی را ایجاد می نماید که باید برای ویژگی منحصر به فرد هر نوع منابع انرژی تجدیدپذیر طراحی شود. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های قدرت حاوی مزارع بادی و خورشیدی به طور مکرر در سال های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است [۴] تا [۱۰]. در [۴] تا [۶] چندین مدل قابلیت اطمینان احتمالی برای مزارع بادی در مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است. بر اساس این مدل ها، مزارع بادی را می توان به عنوان یک واحد معمولی با چند حالت مدل سازی کرد [۷]. ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه های کوچک بادی و فتوولتائیک (PV) را در یک سیستم قدرت ایزوله مطالعه می کند. در این مقاله ظرفیت مزارع بادی و PV کم ظرفیت در نظر گرفته شده و تولید آنها به شبکه برق متصل نیست. در [۸] مطالعات کفایت یک سیستم قدرت حاوی مزارع PV در مقیاس بزرگ بررسی شده است. در این مقاله یک مدل تحلیلی قابلیت اطمینان برای مزارع PV معرفی شده است و بر اساس این مدل می توان یک مزرعه PV را به عنوان یک واحد چند حالتی مدل کرد. در [۹، ۱۰] ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های قدرت حاوی مزارع بادی در مقیاس بزرگ از طریق تکنیک مبتنی بر شبیه سازی، یعنی روش شبیه سازی مونت کارلو^۵، بررسی شده است. مقاله [۱۱] تغییرات سرعت باد، تابش خورشید، سرعت جریان های جزرومدی و دمای محیط بر نرخ خرابی و قابلیت اطمینان ریزشکته های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین بادی، توربین جزرومدی جریانی و سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته شده است. در [۱۲] قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه های جزرومدی نوع مخزنی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله اثر تغییر ارتفاع جزرومد بر نرخ خرابی تجهیزات مختلف تشکیل دهنده این نیروگاه ها از جمله توربین، ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، ترانسفورماتور و کابل مورد بررسی قرار گرفته است. مقاله [۱۳] قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه های جزرومدی نوع جریانی را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع جریانی به دلیل تغییرات سرعت جریان های جزرومدی متغیر در نظر گرفته شده و تاثیر این عدم قطعیت بر مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه ها لحاظ شده است. مقاله [۱۴] تاثیر نیروگاه های جزرومدی نوع مخزنی^۶ بر مطالعات برنامه ریزی ریزشکته های شامل این نیروگاه ها را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله، به دلیل عدم قطعیت نیروگاه های جزرومدی مخزنی و نیروگاه فتوولتائیک، از باتری ذخیره انرژی جهت کاهش عدم قطعیت توان تولیدی ریزشکته استفاده شده

¹ Renewable energy resources

² Renewable portfolio standards

³ Run of the river

⁴ Reliability

⁵ Monte Carlo method

⁶ Barrage-type tidal power plants

است. در [۱۵] تاثیر تغییرات سرعت باد بر قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این نیروگاه‌ها از تکنولوژی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده و اثر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی تجهیزات مختلف تشکیل دهنده این نیروگاه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاله [۱۶] میزان رزرو چرخان مورد نیاز یک سیستم قدرت با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید را به دست آورده است. روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته مبتنی بر ریسک انتخاب واحد سیستم قدرت بوده و به دلیل عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید، میزان رزرو چرخان مورد نیاز شبکه افزایش یافته است. در [۱۷] تاثیر مبدل‌های انرژی امواج بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله از تکنولوژی ژنراتورهای شیار مخروطی^۱ در مبدل انرژی امواج استفاده شده و به دلیل تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان تولیدی این نیروگاه‌ها در طول زمان تغییر کرده است. بر همین اساس در مدل قابلیت اطمینان به دست آمده برای مبدل انرژی امواج بیش از دو حالت وجود دارد. در [۱۸] مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی با در نظر گرفتن اثر خرابی اجزا و تغییر توان تولیدی این نیروگاه‌ها که دلیل آن تغییر ارتفاع جزرومد است، به دست آمده است. سپس از مدل چند حالت به دست آمده به منظور تعیین شاخص‌های کفایت سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها استفاده شده است.

بر اساس دانش پایه نویسندگان، در آثار گذشته، هیچ تلاشی به مدل‌سازی قابلیت اطمینان واحدهای آبی جریان و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت شامل نیروگاه‌های آبی جریان اختصاص داده نشده است. در پاسخ، این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان تحلیلی را معرفی می‌کند که می‌تواند برای مطالعات کفایت سیستم‌های قدرت حاوی نیروگاه‌های آبی جریان استفاده شود. بر اساس این مدل، نیروگاه‌های آبی جریان را می‌توان مشابه واحدهای متعارف، اما با حالت‌های بیشتر که ناشی از ماهیت نامشخص جریان آب می‌باشد، نشان داد. در این مدل، دو عامل مهم یعنی میزان خرابی اجزای مختلف و تغییرپذیری در جریان آب در نظر گرفته شده و یک مدل قابلیت اطمینان جامع ارائه شده است. تعداد و ظرفیت حالت‌های مرتبط با مدل پیشنهادی را می‌توان با بهینه‌سازی یک تابع هدف بر اساس الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی^۲ (FCM) تعیین کرد. مدل قابلیت اطمینان چند حالتی نیروگاه‌های آبی جریان را می‌توان برای مطالعات قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت زمانی که نیروگاه‌های آبی جریان قابل توجهی وجود دارد، استفاده کرد. علاوه بر این، شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان را می‌توان در برنامه‌ریزی توسعه تولید سیستم‌های برق مبتنی بر تجدیدپذیر تعیین و استفاده کرد.

این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش دوم، طراحی ساختاری نیروگاه‌های آبی جریان معرفی می‌شود و اجزای مورد توجه در مدل‌سازی قابلیت اطمینان شناسایی می‌شوند. مدل‌های قابلیت اطمینان جامع نیروگاه‌های آبی جریان با در نظر گرفتن خرابی اجزای مختلف و تغییرپذیری جریان آب به ترتیب در بخش‌های سوم و چهارم توسعه یافته‌اند. مطالعات کفایت^۳ یک سیستم قدرت حاوی نیروگاه‌های آبی جریان در بخش پنجم انجام شده است. این مقاله در بخش ششم نتیجه گیری شده است.

۲- ساختار نیروگاه‌های آبی جریانی

نیروگاه آبی جریانی یک واحد برق آبی در مقیاس کوچک است که برای تولید برق نیازی به سد، مخزن یا سیل ندارد. در این واحد از جریان طبیعی و ارتفاع یک رودخانه برای تولید برق استفاده می‌شود. اجزای مختلف یک نیروگاه ساده آبی جریانی در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۹-۲۱]. بخشی از آب رودخانه‌ای که به سرعت در حال حرکت است از طریق یک کانال آب^۴ به یک مخزن ذخیره^۵ هدایت می‌شود. آب این مخزن توسط یک یا چند لوله به نام پنوستاک^۶ به توربین^۷ منتقل می‌شود. برای جلوگیری از ورود زباله و سایر اشیاء ناخواسته مانند چوب یا درخت، فیلتری^۸ در ورودی پنوستاک‌ها تعبیه شده است. شیر

¹ Slot-coned generators

² Fuzzy c-means clustering technique

³ Adequacy

⁴ Water channel

⁵ Forebay tank

⁶ Penstock

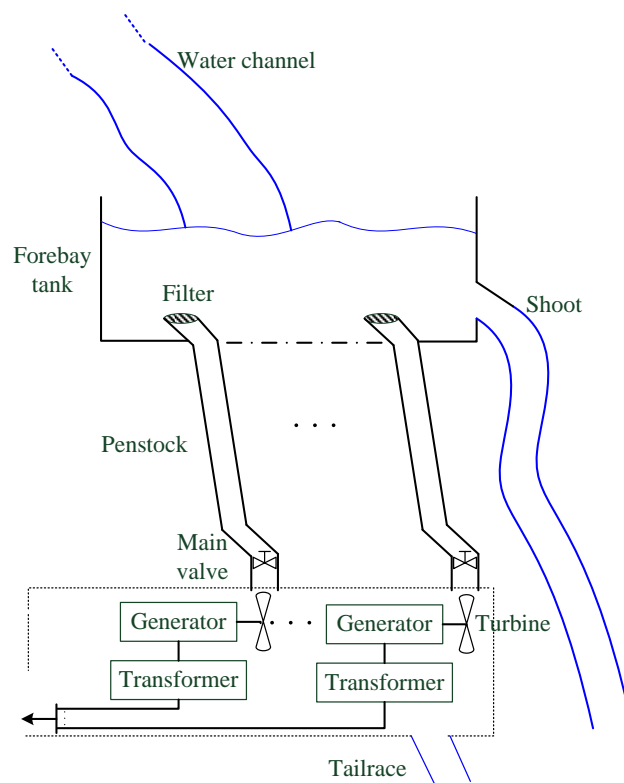
⁷ Turbine

⁸ Filter

اصلی^۱ برای کنترل جریان آب در خروجی پنوستاک نصب می شود. آب خروجی یک توربین^۲ متصل به یک ژنراتور الکتریکی^۳ را به حرکت در می آورد. الکتریسیته تولید شده از طریق یک ترانسفورماتور^۴ به شبکه AC منتقل می شود یا به مصرف ولتاژ پایین محلی هدایت می شود. آب خروجی توربین را می توان به نیروگاه های پایین تر یا از طریق خروجی نیروگاه^۵ به رودخانه منتقل کرد. کانال آب دیگری که به آن شوت یا سرریز^۶ می گویند نیز به مخزن ذخیره متصل می شود. در مواقعی که نیروگاه خاموش است یا زمانی که آب از مقدار معمول خود بیشتر است، آب را می توان توسط این کانال به مخزن انتقال داد.

۳- مدل فضای حالت نیروگاه های آبی جریانی

این بخش به طور کامل به مدل سازی احتمالاتی نیروگاه های آبی جریانی در حالت اتصال به شبکه AC اختصاص دارد. فرآیند مدل سازی با پرداختن به مدل قابلیت اطمینان اجزای مختلف آغاز و سپس به یک نیروگاه آبی جریانی زنجیره ای^۷ گسترش می یابد.



شکل (۱): ساختار نوعی یک نیروگاه آبی جریانی

۳-۱- مدل مارکوف دو حالت

در ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم، عملکرد اجزای مرتبط با آن باید بررسی و مدل سازی شود. برای انجام این کار، اولین گام، درک عمیق عملکرد اجزا، محدودیت هایی که تحت آن کار می کنند و علت های ریشه ای خرابی های آنها است [۲۲]. هدف آن پیروی از یک روش مدل سازی احتمالاتی قوی است تا تمام جنبه های مختلف اجزای مربوط به ارزیابی قابلیت اطمینان

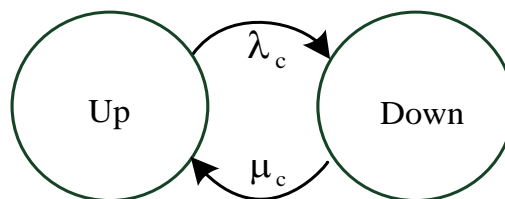
¹ Main valve
² Turbine
³ Generator
⁴ Transformer
⁵ Tailrace
⁶ Shoot
⁷ Cascade run of the river

سیستم مورد مطالعه را منعکس کند. در این راستا، یک روش کارآمد و پرکاربرد در برخورد با پدیده‌های تصادفی که به تکنیک زنجیره مارکوف^۱ معروف است، می‌تواند بسیار مفید باشد. این تکنیک توالی رویدادها را مشخص می‌کند و سعی می‌کند تمایل یک رویداد را به دنبال شدن رویداد دیگری مطالعه کند. با اجرای این رویکرد، سیستم مورد مطالعه در نهایت با یک مدل تحلیلی دو حالت یا چند حالت نشان داده می‌شود [۲۲].

یک نیروگاه آبی جریانی به عنوان یک سیستم قابل تعمیر از تعدادی اجزا تشکیل شده است که به طور کامل در بخش دوم مورد بحث قرار گرفته است. هر جزء در هر زمان ممکن است با موفقیت کار کند یا نکند. عملکرد موفقیت‌آمیز یک نیروگاه آبی جریانی در هر زمان به عملکرد یا خرابی این قطعات بستگی دارد. بنابراین، یک تحلیل احتمالاتی کارآمد و مناسب باید برای ارزیابی اثرات حالت‌های عملکرد اجزا بر روی عملکرد این نیروگاه‌ها استفاده شود. در اینجا، روش زنجیره مارکوف برای ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس بودن اجزای نیروگاه‌های آبی جریانی اعمال می‌شود. یک مدل دو حالت ساده، که در شکل (۲) نشان داده شده است، به عنوان مدل قابلیت اطمینان مرتبط با هر جزء از نیروگاه آبی جریانی در نظر گرفته می‌شود، که در آن جزء یا در حالت سالم یا در حالت خراب قرار دارد [۲۲]. نرخ گذر از حالت up به حالت down با نرخ خرابی (λ_c) و بالعکس با نرخ تعمیر (μ_c) نشان داده می‌شود. احتمالات حالت‌های up و down خواهد بود:

(۱)

$$P_c^{UP} = \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c}, P_c^{DOWN} = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \mu_c}$$



شکل (۲): مدل مارکوف دو حالت اجزای نیروگاه آبی جریانی

۲-۳- مدل قابلیت اطمینان اجزای نیروگاه های آبی جریانی

در ادامه، نحوه خرابی و تاثیرات اجزای تشکیل‌دهنده یک نیروگاه آبی جریانی که در شکل (۱) آورده شده است، مورد بحث قرار گرفته است.

کانال آب

این جزء ممکن است در هنگام زلزله یا سیل از کار بیفتد. در هر دو حالت، آب رودخانه نمی‌تواند به مخزن ذخیره منتقل شود و خروجی نیروگاه برابر با صفر خواهد بود. مدل دو حالت up و down نشان داده شده در شکل (۲)، به عنوان مدل احتمالاتی کانال آب استفاده می‌شود. توجه داشته باشید که اگر آسیب قابل تعمیر نیست، باید از نرخ تعویض به جای نرخ تعمیر به عنوان نرخ انتقال از حالت‌های خراب به سالم استفاده شود.

مخزن ذخیره

خرابی مخزن ذخیره از وقوع زلزله یا سیل ناشی می‌شود. در صورت خرابی این قطعه، توان خروجی نیروگاه صفر خواهد بود. مدل مارکوف دو حالت از رفتار تصادفی این مخزن در نظر گرفته می‌شود.

فیلتر

خرابی فیلتر را می‌توان به دو حالت طبقه‌بندی کرد. در حالت اول، فیلتر سالم است اما پر از زباله یا اشیاء دیگری است که جریان آب را مسدود می‌کند. در نتیجه توان خروجی صفر خواهد بود. در حالت دوم، فیلتر پاره می‌شود و اجازه می‌دهد زباله یا

¹ Markov chain technique

اشیاء دیگر از درون پنوستاک عبور کنند و عملکرد صحیح توربین را مختل کنند. در چنین شرایطی، برای جلوگیری از آسیب جدی به توربین، واحد آبی جریانی متوقف می شود و تولید برق به صفر می رسد. از آنجایی که خروجی توان نیروگاه با هر دو حالت خرابی صفر است، مدل مارکوف دو حالت برای نمایش قابلیت اطمینان فیلتر کافی است.

لوله پنوستاک

لوله های پنوستاک به دلیل زلزله یا سیل از کار می افتند که جریان آب را به سمت توربین مسدود می کند. بنابراین، خرابی پنوستاک منجر به حالت خروجی صفر می شود و مشابه عناصر قبلی، می توان از مدل مارکوف دو حالت برای مدل سازی قابلیت اطمینان استفاده کرد.

شیر اصلی

شیر اصلی یک جزء دینامیکی است و ممکن است عناصر آن در طول زمان کارکرد دستگاه دچار پیری شوند. بنابراین کهنگی، یکی از علل خرابی و علت دیگر نفوذ زباله یا اشیاء دیگر از طریق پنوستاک است. با خرابی شیر اصلی، جریان آب در پنوستاک و در نتیجه تولید برق و فرکانس قابل کنترل نیست. در این شرایط واحد نیروگاهی باید خاموش باشد و توان خروجی آن برابر با صفر باشد. بنابراین مدل مارکوف دو حالت می تواند مدل قابلیت اطمینان این جزء را نشان دهد.

توربین

خرابی این قطعه به دو نوع داخلی و خارجی طبقه بندی می شود. نوع داخلی ناشی از خرابی اجزای تشکیل شده مانند تیغه ها، لوله های draft یا حلقه های ثابت است. خرابی های خارجی ناشی از زباله ها یا سایر اشیاء عبوری از انبار، زلزله، سیل و غیره است. توان خروجی این نیروگاه ها در صورت از کار افتادن توربین صفر خواهد بود. مدل سازی قابلیت اطمینان این جز توسط مدل مارکوف دو حالت قابل انجام است.

ژنراتور

مشابه توربین، خرابی های مرتبط با ژنراتور به دو نوع داخلی و خارجی طبقه بندی می شوند. خرابی های داخلی معمولاً در نتیجه خرابی عایق (تخلیه جزئی و کلی)، اتصال کوتاه و خرابی قطعات مکانیکی مانند یاتاقان یا حلقه لغزش رخ می دهد. خرابی های خارجی عموماً توسط قطعاتی غیر از عناصر خود ژنراتور ایجاد می شود. اتصال کوتاه در شبکه منجر به جریان های بیش از حد در سیم پیچ ها می شود و گرمای بیش از حد مربوطه ممکن است منجر به از کار افتادن ژنراتور شود. برای پوشش چنین خرابی هایی در مدل قابلیت اطمینان، می توان از مدل مارکوف دو حالت استفاده کرد.

ترانسفورماتور

توان تولیدی نیروگاه های آبی جریانی می تواند از طریق یک ترانسفورماتور قدرت به شبکه AC منتقل شود. خرابی این ترانسفورماتور باعث قطع اتصال نیروگاه به شبکه می شود که منجر به قطع برق رسانی به شبکه می شود. در صورت عدم مصرف محلی، هر زمان که ترانسفورماتور از کار افتاده باشد، توان خروجی نیروگاه باید صفر باشد. مجدداً، برای هدف مدل سازی قابلیت اطمینان، می توان از مدل مارکوف دو حالت استفاده کرد.

۳-۳- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه های آبی جریانی با یک پنوستاک

مدل های قابلیت اطمینان احتمالاتی مرتبط با اجزای نیروگاه آبی جریانی به طور کامل در بخش فرعی قبلی مورد بحث قرار گرفتند. این مدل ها باید برای دستیابی به یک مدل جامع از این نیروگاه ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های قدرت یکپارچه شوند. مدل حاصل، مدل فضای حالت نیروگاه ROR¹ نامیده می شود.

قطع نیروگاه می تواند با خرابی هر یک از اجزای تشکیل دهنده ساختار واحد آبی جریانی ساده همراه باشد. دلیل آن این است که خرابی هر یک از قطعات منجر به قطع کامل نیروگاه و در نتیجه صفر شدن سطح تولید می شود. بنابراین از نقطه نظر قابلیت اطمینان، تمام اجزاء در یک پیکربندی سری هستند، همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است.

بنابراین پارامترهای قابلیت اطمینان یک سیستم با n جز سری به شرح زیر است [۲۳].

¹ ROR power plant state space model



- 1- water channel
- 2- forebay tank
- 3- filter
- 4- penstock
- 5- main valve
- 6- turbine
- 7- generator
- 8- transformer

شکل (۳): مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه آبی جریان با یک پلوستاک

(۲)

$$\lambda_{eq} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

(۳)

$$U_{eq} = \sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i$$

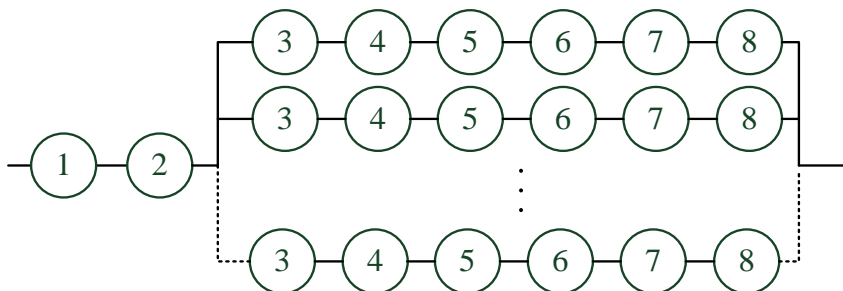
(۴)

$$r_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)$$

که در آن، λ_i ، U_i و r_i به ترتیب مخفف نرخ خرابی، عدم در دسترس پذیری و زمان تعمیر جزء i ام هستند و همچنین λ_{eq} ، U_{eq} و r_{eq} نرخ خرابی معادل کل سیستم، عدم در دسترس پذیری معادل کل سیستم و زمان تعمیر کل سیستم می باشند.

۳-۴- مدل فضای حالت^۱ نیروگاه های آبی جریانی با بیش از یک پلوستاک

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود، یک نیروگاه آبی جریانی ممکن است حاوی بیش از یک پلوستاک باشد. با این حال، این نیروگاه‌ها فقط شامل یک کانال آب و یک مخزن ذخیره هستند. بنابراین مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه آبی جریانی با m پلوستاک مانند مدل نشان داده شده در شکل (۴) خواهد بود.



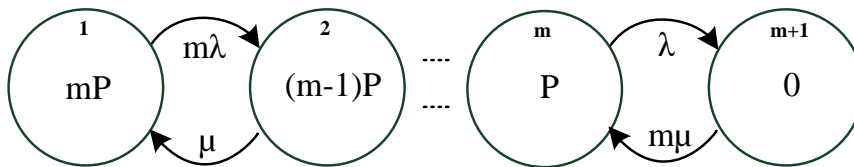
شکل (۴): مدل قابلیت اطمینان نیروگاه آبی جریانی با m پلوستاک

¹¹ State space

اگر توان نامی تولید شده توسط هر توربین ژنراتور متصل به هر پنوستاک P باشد، کل نیروگاه ظرفیت های متفاوتی خواهد داشت که برخی از آنها حالت های کاهش یافته هستند. شکل (۵) زنجیره مارکوف از حالت های مرتبط با ظرفیت های متفاوت را نشان می دهد که P نشان دهنده سطح تولید توان هر مجموعه از توربین-ژنراتور است. توجه داشته باشید که در این شکل خرابی کانال آب و مخزن ذخیره نادیده گرفته شده است. در صورت خرابی در هر یک از عناصر هر مجموعه مانند فیلتر، پنوستاک، شیر اصلی، توربین، ژنراتور و ترانسفورماتور، مجموعه مربوطه به حالت قطع می رود و سطح تولید برق کاهش می یابد. بنابراین با استفاده از عبارات ریاضی زیر بخش قبلی، هر مجموعه از اتصال سری این ۶ جزء را می توان به ترتیب با A و U به عنوان در دسترس پذیری و عدم در دسترس پذیری معادل نشان داد. احتمال حالت k با مجموعه های خراب شده k-1 را می توان به صورت (۵) محاسبه کرد.

$$P_k = \binom{m}{k-1} A^{m-k+1} U^{k-1} \quad (5)$$

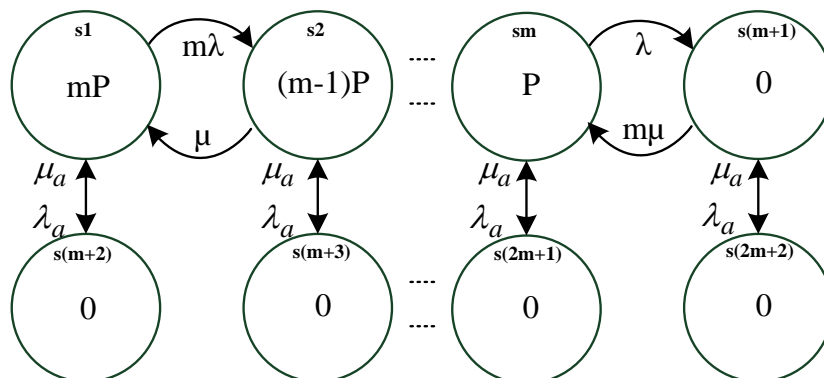
یادآوری می شود که در این بخش، دبی آب ثابت و برابر با مقدار نامی در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): مدل فضای حالت نیروگاه آبی جریانی با m پنوستاک

در این مرحله، خرابی های مرتبط با کانال آب و مخزن ذخیره در مدل سازی قابلیت اطمینان در نظر گرفته می شود. با اشاره به مدل نشان داده شده در شکل (۴)، خرابی یکی یا هر دو کانال آب یا مخزن ذخیره منجر به قطع شدن کل نیروگاه می شود. در نتیجه توان تولیدی صفر خواهد بود. بنابراین، زنجیره مارکوف نشان داده شده در شکل (۵) می تواند مانند مدل نشان داده شده در شکل (۶) گسترش یابد، که مدل جامع و کامل نیروگاه آبی جریانی با m پنوستاک است. در این شکل μ_a و λ_a معادل نرخ خرابی و تعمیر اتصال سری کانال آب و مخزن ذخیره می باشند. با تعریف U_a و A_a به عنوان در دسترس بودن و عدم در دسترس پذیری اتصال سری کانال آب و مخزن ذخیره، احتمال حالت های مختلف شکل (۶) به صورت زیر تعیین می شود.

$$P_{sk} = \begin{cases} A_a \times P_k, & 1 \leq k \leq m+1 \\ U_a \times P_k, & m+2 \leq k \leq 2m+2 \end{cases} \quad (6)$$



شکل (۶): مدل فضای حالت نیروگاه آبی جریانی با m پنوستاک

از آنجایی که مدل نشان داده شده در شکل (۶) دارای چندین حالت با توان خروجی صفر است، می توان آن را به عنوان شکل (۷) کاهش داد. احتمالها و نرخ های انتقال جدید به صورت زیر خواهند بود.

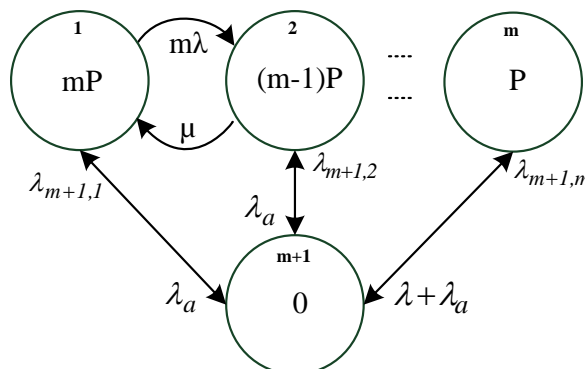
(۷)

$$P_{m+1} = \sum_{k=m+1}^{2m+2} P_{sk} \quad (۸)$$

$$\lambda_{m+1,1} = \frac{\mu_a \cdot P_{m+2}}{\sum_{k=m+1}^{2m+2} P_k} \quad (۹)$$

$$\lambda_{m+1,2} = \frac{\mu_a \cdot P_{m+3}}{\sum_{k=m+1}^{2m+2} P_k} \quad (۱۰)$$

$$\lambda_{m+1,m} = \frac{\mu_a \cdot P_{2m+1} + m\mu \cdot P_{m+1}}{\sum_{k=m+1}^{2m+2} P_k}$$



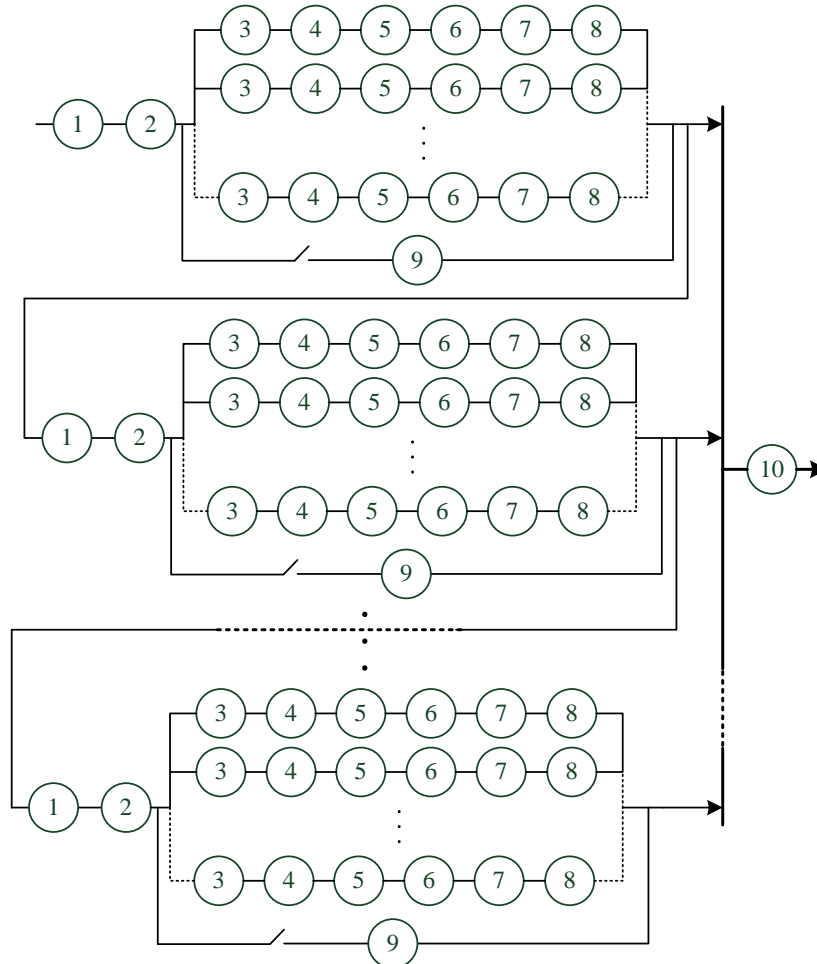
شکل (۷): مدل فضای حالت کاهش یافته نیروگاه آبی جریان با m پمپونستاک

۵-۳- مدل فضای حالت نیروگاه آبی جریان زنجیره ای

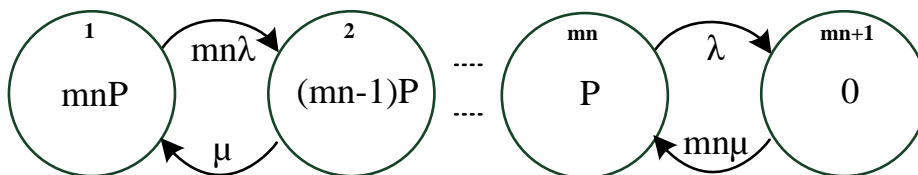
در اینجا، مدل فضای حالت یک نیروگاه آبی جریان زنجیره ای که شامل n واحد ROR یکسان است، مشتق شده است. هر واحد نیروگاهی ساده دارای m پمپونستاک فرض می شود، و بنابراین مدل فضای حالت هر یک شبیه به آنچه در شکل (۷) نشان داده شده است، می باشد. وقتی مقدار آب مخزن ذخیره بیش از ظرفیت مورد نیاز است، یک یا چند پمپونستاک مسدود می شود و بنابراین آب را می توان از طریق سرریزی که به انتهای نیروگاه متصل است به پایین دست منتقل کرد. در یک نیروگاه زنجیره ای، هنگامی که یک واحد فوقانی از کار می افتد، آب از طریق سرریز مربوطه به واحدهای پایین منتقل می شود. بنابراین، خرابی یک واحد نیروگاهی ساده تأثیری بر عملکرد واحدهای پایین ندارد. از نقطه نظر قابلیت اطمینان، سرریزها به عنوان عناصر آماده به کار هستند. بر این اساس، مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه زنجیره ای مطابق شکل (۸) خواهد بود. در این شکل، سرریز با عنصر (۹) نشان داده شده است. اگرچه در شکل (۸) به عنوان عنصر ۱۰ نشان داده شده است.

در واقع، نرخ خرابی کانال آب، مخزن ذخیره، پمپونستاک و سرریز بسیار پایین است و می توان آنها را در مدل قابلیت اطمینان نیروگاههای زنجیره ای بدون ایجاد خطای قابل توجه نادیده گرفت. بنابراین، نیروگاه آبی جریان زنجیره ای شامل n واحد ساده، هر کدام با m پمپونستاک، می تواند به صورت یک واحد با $m \times n$ پمپونستاک نمایش داده شود. مدل فضای حالت در شکل

(۹) نشان داده شده است. در این مدل، λ و μ معادل نرخ خرابی و تعمیر اتصال سری قطعات در هر مجموعه پستاک شامل فیلتر، شیر اصلی، توربین، ژنراتور و ترانسفورماتور هستند. خرابی ترانسفورماتور قدرت در مدل نشان داده شده در شکل (۹) در نظر گرفته نشده است.

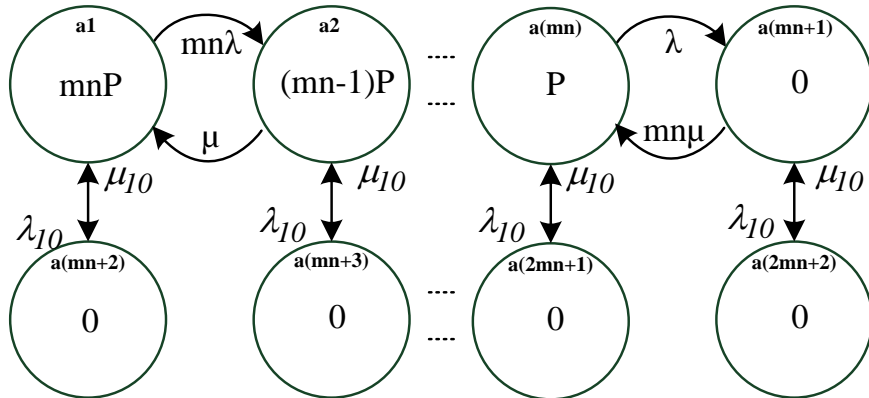


شکل (۸): مدل قابلیت اطمینان نیروگاه آبی جریان زنجیره ای

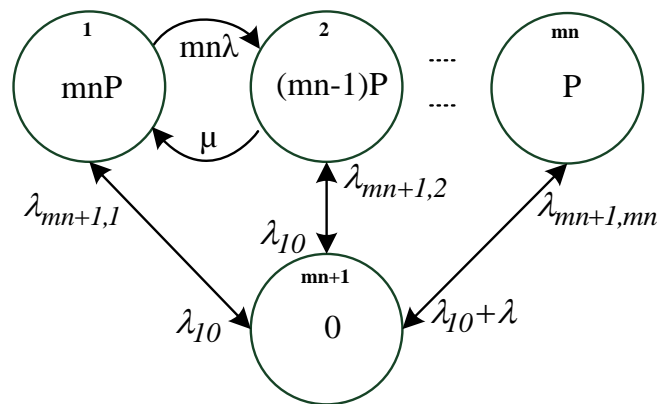


شکل (۹): مدل فضای حالت نیروگاه آبی جریان زنجیره ای بدون ترانسفورماتور قدرت

هنگامی که ترانسفورماتور قدرت از کار می افتد، اتصال بین نیروگاه و شبکه AC قطع می شود و توان تولیدی نمی تواند به شبکه تحویل داده شود. بنابراین از نقطه نظر قابلیت اطمینان، خرابی ترانسفورماتور قدرت منجر به صفر شدن تولید کل نیروگاه می شود. مدل فضای حالت نیروگاه آبی جریان زنجیره ای، با در نظر گرفتن خرابی ترانسفورماتور قدرت، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. حالت های با ظرفیت صفر در شکل (۱۰) ادغام شده اند تا یک حالت واحد را تشکیل دهند. مدل حاصل در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): مدل فضای حالت نیروگاه آبی جریان زنجیره ای با در نظر گرفتن ترانسفورماتور قدرت



شکل (۱۱): مدل فضای حالت کاهش یافته نیروگاه آبی جریان زنجیره ای

۴- تاثیر تغییرپذیری جریان آب بر مدل قابلیت اطمینان نیروگاه های آبی جریانی

در بخش قبل، مدل احتمالی یک نیروگاه آبی جریانی زنجیره‌ای به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. با این حال، توان خروجی این نیروگاه زنجیره‌ای به عامل مؤثر دیگری بستگی دارد که از عدم قطعیت جریان آب ناشی می‌شود. برای نشان دادن تغییرپذیری جریان آب، یک مدل احتمالاتی در این بخش پیشنهاد می‌شود.

۴-۱- تغییرپذیری توان خروجی نیروگاه آبی جریانی

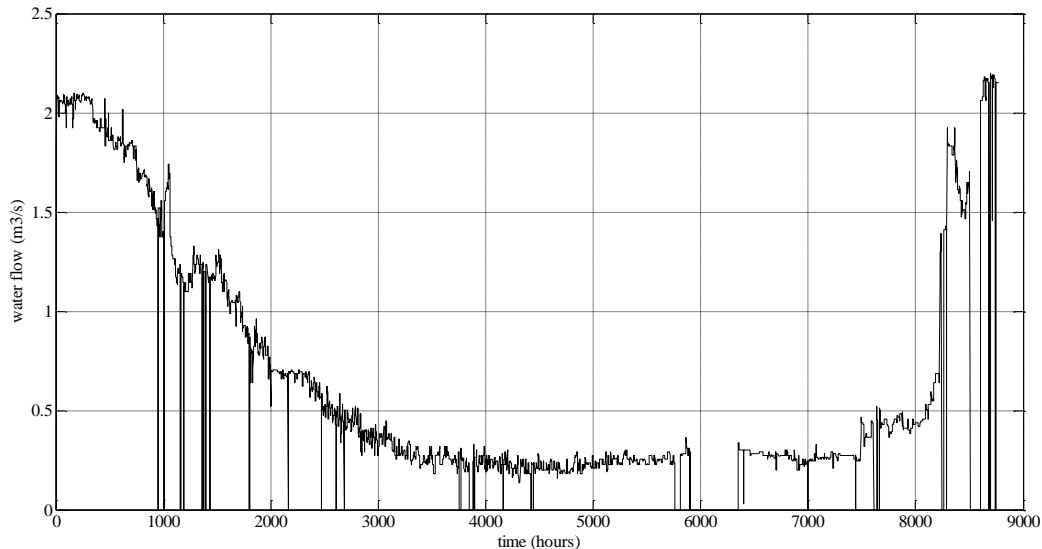
جریان آب در یک رودخانه در زمان‌های مختلف سال متغیر است. در نتیجه، توان خروجی این نیروگاه‌ها نیز متغیر خواهد بود. داده‌های جریان آب رودخانه شش‌سپیر در استان فارس ایران مربوط به سال ۱۳۹۸ در شکل (۱۲) نشان داده شده است [۲۴]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، جریان آب رودخانه دارای مقادیر بسیار زیادی است. بنابراین، تعداد حالات مرتبط با توان خروجی نیز بسیار زیاد خواهد بود که در ارزیابی قابلیت اطمینان تحلیلی مطلوب نیست. راه‌حل پیشنهادی، کاهش فضای حالت به یک مدل چند حالتی است. برای انجام این کار، یک روش کارآمد و قوی، به نام الگوریتم خوشه‌بندی C میانگین فازی در اینجا استفاده می‌شود.

۴-۲- الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی (FCM)

توان خروجی در مدل مارکوف^۱ نیروگاه‌های آبی جریانی باید به تعداد محدودی از حالت‌ها تفکیک شود. برای تعیین تعداد و دامنه این مراحل، می‌توان از یک انتخاب دلخواه استفاده کرد. با این حال، دقت مدل ممکن است تحت تاثیر این روش قرار

^۱ Markov model

گیرد. بنابراین یک روش کارآمد که بتواند به طور همزمان دقت مدل و کلی بودن آن را تضمین کند، ضروری است. این مقاله الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی را به عنوان یک روش قوی در هنگام برخورد با شناسایی ساختار داده های بدون برچسب بررسی می کند [۲۵].



شکل (۱۲): داده های جریان آب رودخانه ششپیر در سال ۱۳۹۸

خوشه بندی به عنوان هنر تعیین گروه ها در داده ها معرفی شده است [۲۶]. در این طبقه بندی بدون نظارت الگوها، داده ها بر اساس معیارهای شباهت به زیرمجموعه های همگن و کاملاً جدا شده (خوشه ها) دسته بندی می شوند. هدف از این روش، کاهش اشیاء داده ای بزرگ به تعداد عملی گروه های همگن است. الگوریتم های خوشه بندی را می توان بر اساس اصل (تابع هدف، گراف-نظری، سلسله مراتبی) و یا بر اساس نوع مدل (تعیین، احتمالی و فازی) طبقه بندی کرد. بر اساس رویکرد الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی داده های موضوع به خوشه های فازی C کاهش می یابد تا یک مسئله بهینه سازی کمینه سازی را حل کند که در رابطه (۱۱) تعریف شده است [۲۵].

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m d_{ik}^2 = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2 \quad (11)$$

در فرمول فوق m یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است که در اکثر موارد برای m عدد ۲ انتخاب می شود. اگر در فرمول فوق m برابر ۱ قرار داده شود تابع هدف خوشه بندی C میانگین (کلاسیک) غیرفازی بدست می آید. در فرمول فوق x_k نمونه k ام، v_i نماینده یا مرکز خوشه i ام و n تعداد نمونه ها می باشد. u_{ik} میزان تعلق نمونه i ام در خوشه k ام را نشان می دهد. علامت $\|*\|$ میزان تشابه (فاصله) نمونه با (از) مرکز خوشه می باشد که می تواند از هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد، استفاده گردد.

۳-۴- مدل جامع نیروگاه های آبی جریانی زنجیره ای

برای تعیین مجموعه ای مناسب از حالت های مرتبط با خروجی نیروگاه آبی جریانی، توان خروجی تاریخی نیروگاه به عنوان داده های ورودی به الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی داده می شود. با استفاده از این تکنیک مناسب ترین خوشه ها که بیانگر حالت های مختلف مرتبط با سطوح تولید نیروگاه هستند، به دست می آیند. احتمال حالت ها و نرخ های انتقال در میان آنها را می توان از طریق تکنیک فرکانس و مدت زمان محاسبه نمود [۲۵].

۵- مطالعات کفایت سیستم قدرت با در نظر گرفتن نیروگاه های آبی جریان زنجیره ای

مدل نهایی قابلیت اطمینان توسعه یافته برای یک نیروگاه آبی جریان دارا چند حالت است و می تواند در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت، مشابه یک واحد معمولی با ظرفیت های کاهش یافته مورد بررسی قرار گیرد. اگر ارزیابی قابلیت اطمینان در سطح سلسله مراتبی I¹ (HLI) در نظر گرفته شده باشد، ابتدا جدول احتمال خروج ظرفیت² (COPT) واحدهای معمولی ساخته می شود. سپس مدل چندحالتی این نیروگاه ها باید با COPT واحدهای معمولی ترکیب شود تا COPT نهایی را تشکیل دهد. سپس شاخص های قابلیت اطمینان با ترکیب جدول خروج احتمال ظرفیت این نیروگاه ها و مدل بار تعیین می شوند. اگر روش های ارزیابی دیگری مانند شبیه سازی مونت کارلو³ یا سایر مطالعات قابلیت اطمینان سطح سلسله مراتبی در نظر گرفته شود، مدل قابلیت اطمینان پیشنهادی این نیروگاه ها می تواند به آسانی مورد استفاده قرار گیرد.

۶- تجزیه و تحلیل عددی

در این بخش، دو سیستم تست RBTS⁴ و IEEE-RTS⁵ مورد بررسی قرار می گیرند. این سیستم ها با افزودن برخی نیروگاه های آبی جریان (ROR) بر اساس داده های جریان آب رودخانه ششپیر اندکی اصلاح می شوند. مطالعات قابلیت اطمینان در این سیستم ها در سطح سلسله مراتبی اول (HLI) انجام می شود. شاخص های کفایت متفاوتی برای بررسی توانایی های این نیروگاه ها در بهبود قابلیت اطمینان سیستم ها در مقایسه با واحدهای متعارف محاسبه می شوند. تحلیل های حساسیت متعددی نیز برای مطالعه تأثیرات سطح نفوذ نیروگاه های آبی جریان (ROR) و همچنین تغییرات بار اوج سیستم بر شاخص های قابلیت اطمینان انجام می شود.

۱-۶- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه آبی جریان زنجیره ای

در این مرحله یک نیروگاه آبی جریان زنجیره ای ۳۰ مگاواتی ساخته شده بر روی رودخانه ششپیر در استان فارس برای مدل سازی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. نیروگاه شامل ۵ واحد آبی جریان تک واحدی با ۴ مجموعه پنوساک می باشد. ظرفیت نامی هر پنوساک در جریان آب ۲/۲ متر مکعب بر ثانیه برابر با ۱/۵ مگاوات است. داده های قابلیت اطمینان اجزای نیروگاه در جدول (۱) آورده شده است [۲۷]. با در نظر گرفتن روش پیشنهادی در حال استفاده، مدل فضای حالت نیروگاه مورد مطالعه همان طور که در جدول (۲) ارائه شده است، به دست می آید. در این مدل هنوز تغییرپذیری جریان آب در نظر گرفته نشده است.

جدول (۱): داده های قابلیت اطمینان اجزای نیروگاه های آبی جریان

Components	Component #	Average failure rate (f/yr)	Average repair time (h)
Water channel	1	0	-
Forebay tank	2	0	-
Filter	3	2	10
Penstock	4	0	-
Main valve	5	0.5	87.6
Turbine	6	0.5	87.6
Generator	7	0.2	175.2
Transformer	8	0.2	175.2
Shoot	9	0	-
Power transformer	10	0.1	175.2

¹ Hierarchical Level I

² Capacity outage probability table

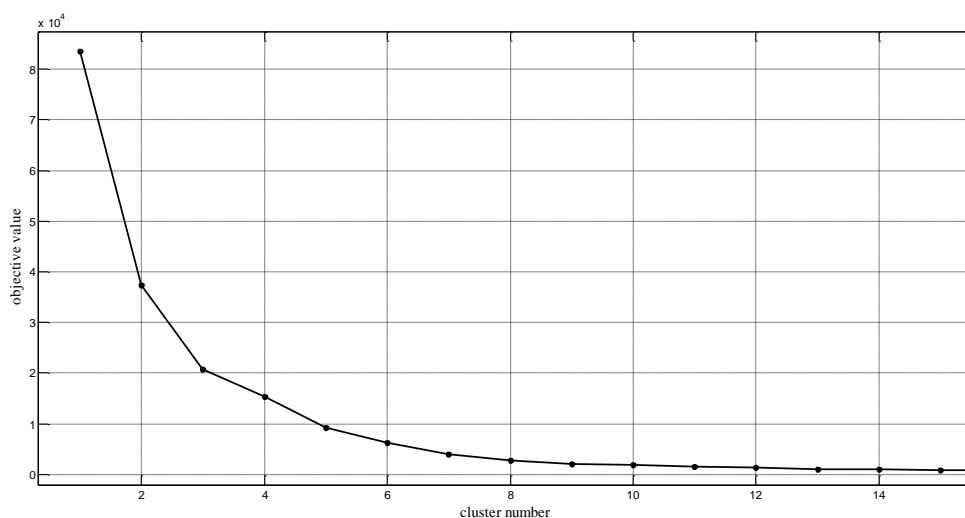
³ Monte Carlo simulation

⁴ Roy Billinton Test System

⁵ IEEE Reliability Test System

جدول (۲): مدل فضای حالت نیروگاه آبی جریانی مورد مطالعه

Cap. (MW)	Prob.	Cap. (MW)	Prob.	Cap. (MW)	Prob.
0	3.60E-27	10.5	3.57E-13	21	0.000228
1.5	1.44E-24	12	1.16E-11	22.5	0.001826
3	2.73E-22	13.5	3.09E-10	24	0.011413
4.5	3.28E-20	15	6.80E-09	25.5	0.053709
6	2.79E-18	16.5	1.24E-07	27	0.179026
7.5	1.78E-16	18	1.85E-06	28.5	0.37689
9	8.92E-15	19.5	2.28E-05	30	0.376882



شکل (۱۳): تابع هدف روش الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی در مقابل تعداد خوشه ها

داده های جریان آب رودخانه ششپیر در سال ۱۳۹۸ در شکل (۱۲) ارائه شده است. تعداد بهینه حالت ها با اجرای الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی به دست می آید و تابع هدف تکنیک این با توجه به تعداد خوشه ها در شکل (۱۳) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود افزایش تعداد خوشه ها باعث کاهش بیشتر تابع هدف می شود. با این حال، برای ۸ خوشه یا بیشتر، تغییرات تابع هدف تقریباً اشباع شده است و تغییرات قابل توجهی ندارد. بنابراین، ۸ خوشه مجموعه ای بهینه برای نمایش ظرفیت های نیروگاهی با دقت قابل قبول خواهد بود. این خوشه ها در جدول (۳) نشان داده شده اند. توجه داشته باشید که در محاسبه این ظرفیت ها تنها تغییرپذیری جریان آب تاثیرگذار است و خرابی قطعات لحاظ نشده است.

جدول (۳): حالت های ظرفیت بهینه بدست آمده با الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی

Center (MW)	Center (percent)	Power range (MW)	Number of hours	Probability
0	0	0-1.8	832	0.09497
3.5	11.7	1.8-4.7	3840	0.43836
6	20	4.7-7.6	1195	0.13642
9.7	32.3	7.6-11.4	696	0.07945
13.6	45.3	11.4-15.2	294	0.03356
16.9	56.3	15.2-20.2	548	0.06256
23.4	78	20.2-25.6	703	0.08025
28	93.3	25.6-30	652	0.07443

اکنون نوبت به ترکیب مدل قابلیت اطمینان نیروگاه آبی جریانی یعنی جدول (۲)، با مدل مرتبط با تغییرپذیری در جریان آب که در جدول (۳) نشان داده شده است، می‌باشد. این مدل جامع قابلیت اطمینان نیروگاه آبی جریانی زنجیره‌ای شامل خرابی اجزا و تنوع منابع در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴): مدل جامع قابلیت اطمینان نیروگاه آبی جریانی مورد مطالعه

Cap. (MW)	Prob.	Cap. (MW)	Probability	Cap. (MW)	Probability
0	0.09480	8.72	0.00050	16.89	0.05521
2.98	0.00010	9.21	0.00865	21.06	0.00051
3.16	0.00028	9.69	0.07010	22.23	0.00873
3.33	0.04770	12.23	0.00021	23.40	0.07082
3.51	0.38700	12.91	0.00365	25.19	0.00047
5.40	0.00087	13.59	0.02960	26.59	0.00810
5.70	0.01490	15.20	0.00039	27.99	0.06568
6.00	0.12000	16.05	0.00681		

۲-۶- تجزیه و تحلیل کفایت سیستم تست RBTS در حضور نیروگاه های آبی جریانی

مطالعات کفایت سیستم تست RBTS در حضور نیروگاه های آبی جریانی در این بخش انجام می‌شود. سیستم تست RBTS شامل ۲۴۰ مگاوات ظرفیت نصب شده و ۱۸۵ مگاوات بار پیک سالانه است [۲۸]. در این مطالعه، بار در نظر گرفته شده توسط منحنی تداوم بار^۱ به صورت یک خط مستقیم از ۱۰۰٪ تا ۶۰٪ از ماکزیمم پیک بار سالانه مدل‌سازی می‌شود. برای ارزیابی مناسب اثرات تولید این نیروگاه‌ها بر عملکرد قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، سه حالت مختلف به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

مورد اول: سیستم تست RBTS اصلی

مورد دوم: RBTS اصلاح شده با یک نیروگاه آبی جریانی ۳۰ مگاواتی که در بخش قبلی مدل‌سازی شده است.

مورد سوم: RBTS اصلاح شده با یک نیروگاه متعارف جدید ۳۰ مگاواتی با نرخ خروج اضطراری^۲ (FOR) برابر ۵ درصد.

دو شاخص مهم قابلیت اطمینان، یعنی مقدار متوسط بار قطع شده (LOLE)^۳ و متوسط انرژی مورد انتظار تامین نشده^۴ (EENS) با سه مورد و بر حسب بارهای اوج مختلف محاسبه می‌شوند. نتایج در جدول (۵) و شکل (۱۴) منعکس شده است. همان‌طور که می‌توان استنباط کرد، اگرچه نیروگاه آبی جریانی اضافه شده، قابلیت اطمینان سیستم را در مقایسه با مورد اول بهبود می‌بخشد، اما واحد معمولی با همان ظرفیت می‌تواند به طور موثرتری سطح قابلیت اطمینان را بهبود بخشد (مورد سوم). این به دلیل تغییرپذیری و عدم قطعیت جریان آب است که منجر به بروز حالت‌هایی با سطوح تولید بسیار کوچک می‌شود و این مشاهده به طور کلی در مورد یک واحد متعارف صحبت نمی‌کند.

یک شاخص جدید در اینجا برای اندازه‌گیری ظرفیت موثر نیروگاه آبی جریانی در مقایسه با یک واحد متعارف تعریف شده است. ما شاخص جدید را ظرفیت واحد متعارف معادل^۵ (ECUC) می‌نامیم. ECUC که ظرفیت یک واحد متعارف معادل با نرخ خروج اضطراری برابر ۵ درصد است که اگر به جای نیروگاه آبی جریانی ۳۰ مگاواتی به سیستم اضافه شود، همان سطح قابلیت اطمینان حاصل می‌شود. جدول (۶)، ظرفیت واحد متعارف معادل را برای بارهای اوج مختلف نشان می‌دهد. نتایج تأیید می‌کند که برنامه‌ریزان سیستم قدرت و تصمیم‌گیرندگان باید از نیروگاه‌های آبی جریانی بزرگتر در مقایسه با واحدهای متعارف استفاده کنند تا به یک سطح قابلیت اطمینان از پیش تعیین شده برسند.

¹ Load duration curve

² Forced outage rate

³ Loss of load expectation

⁴ Expected energy not supplied

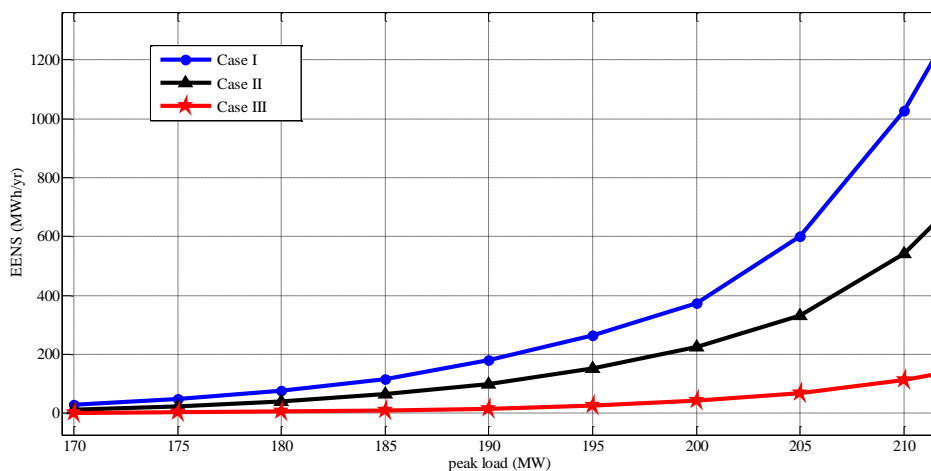
⁵ Equivalent conventional unit capacity

جدول (۵): مقدار متوسط بار قطع شده (LOLE (HRS/YR)) مرتبط با سه حالت مختلف

Peak load (MW)	Case I	Case II	Case III
170	3.57143	1.832781	0.247445
175	4.967642	2.909058	0.428037
180	6.35791	4.05321	0.602653
185	11.12279	6.018318	0.963396
190	15.65325	9.408126	1.328097
195	20.74907	13.22548	2.781695
200	26.35622	17.56675	4.202168
205	68.68322	30.65807	7.463669
210	109.0098	58.71933	10.62894
215	148.1956	89.72251	16.50375
220	186.307	122.0685	22.16009
225	256.9655	162.898	29.93379
230	324.7104	219.0237	38.01036

جدول (۶): ظرفیت واحد متعارف معادل (ECUC) مرتبط با سه حالت مختلف

Peak load (MW)	170	180	190	200	210	220	230
ECUC (MW)	5.85	6.78	6.73	7.15	6.16	6.72	7.24



شکل (۱۴): متوسط انرژی تامین نشده (EENS (MWH/YR)) مرتبط با سه حالت مختلف

۳-۶- تجزیه و تحلیل کفایت سیستم تست IEEE-RTS در حضور نیروگاه های آبی جریانی رنجیره ای

تأثیرات ترکیب نیروگاه های آبی جریانی در مقیاس بزرگ بر عملکرد قابلیت اطمینان سیستم های قدرت در اینجا به خوبی بررسی شده است. در این راستا، سیستم تست IEEE-RTS با افزودن پنج نیروگاه آبی جریانی ۳۰ مگاواتی که قبلاً در این بخش مدل سازی شده بودند، اصلاح می شود. داده های تولید IEEE-RTS در [۲۹] آورده شده است و بار آن از طریق یک منحنی تداوم بار به صورت یک خط مستقیم از ۱۰۰ تا ۶۰ درصد از ماکزیمم پیک بار سالانه ۲۸۵۰ مگاواتی مدل سازی شده است.

از طریق روش پیشنهادی، شاخص های مقدار متوسط بار قطع شده و همچنین متوسط انرژی مورد انتظار تامین نشده مرتبط با سیستم تست IEEE-RTS اصلاح شده، محاسبه و در جدول (۷) ارائه شده است. برای دریافت بینش بهتر در مورد تفاوت بین

این نیروگاه‌ها و واحدهای متعارف، مطالعات در موارد مختلف انجام می‌شود. این موارد با اضافه شدن چندین واحد متعارف یا واحدهای آبی جریان‌ی هم اندازه، همراه می‌باشد. می‌توان از جدول (۷) استنباط نمود، افزودن یک نیروگاه جدید آبی جریان‌ی یا واحد متعارف، هر دو شاخص مقدار متوسط بار قطع شده و متوسط انرژی مورد انتظار تامین نشده را در مقایسه با حالت پایه کاهش می‌دهد. با این حال، زمانی که واحد اضافه شده جدید از نوع آبی جریان‌ی باشد، بهبود در سطح قابلیت اطمینان کمتر است.

در این بخش، تحلیل دیگر مربوط به ارزیابی شاخص قابلیت افزایش میزان بار قابل تغذیه^۱ (IPLCC) است. این شاخص مربوط به هر واحد جدید اضافه شده در آخرین ستون جدول (۷) گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با اضافه شدن اولین نیروگاه آبی جریان‌ی ۳۰ مگاواتی، اوج بار سیستم را می‌توان ۹.۳ مگاوات افزایش داد. در حالی که با اضافه شدن اولین واحد متعارف با همان اندازه، پیک بار سیستم برابر با ۲۹.۶ مگاوات افزایش می‌یابد. بنابراین، مزیت ظرفیت نیروگاه آبی جریان‌ی با داده‌های جریان آب که در بخش‌های قبلی داده شده است، حدود ۳۱ درصد یک واحد معمولی با همان اندازه است.

جدول (۷): شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم تست IEEE-RTS

Case Description	LOLE (h/yr)	EENS (MWh/yr)	IPLCC (MW)
Base Case	112.9085	16983.86	0
Base case + 1 conv.	95.32231	14036.8	29.6
Base case + 2 conv.	80.73625	11549.94	59.5
Base case + 3 conv.	68.86317	9431.269	89.3
Base case + 4 conv.	58.22836	7630.917	119.0
Base case + 5 conv.	48.45224	6119.975	148.6
Base case + 1 ROR	107.2386	16029.97	9.3
Base case + 2 ROR	101.7935	15124.72	18.2
Base case + 3 ROR	96.61983	14265.67	27.4
Base case + 4 ROR	91.45622	13365.25	36.3
Base case + 5 ROR	87.00219	12298.94	45.2

۷- نتیجه گیری

این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان تحلیلی برای نیروگاه‌های آبی جریان‌ی زنجیره‌ای پیشنهاد می‌کند تا در مطالعات کفایت سیستم‌های قدرت هیبریدی حاوی این نوع منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد. مدل توسعه یافته هر دو مورد عدم قطعیت‌ها، یعنی خرابی اجزا و متناوب بودن یا تغییرپذیری در جریان آب را در نظر می‌گیرد. روش خوشه‌بندی C میانگین فازی برای دستیابی به مجموعه‌ای از حالت‌های ظرفیت بهینه در هر دو جنبه محاسباتی و دقت در نظر گرفته شد. این مدل نهایی حاصل، چندحالتی می‌باشد و برای استفاده در تکنیک‌های ارزیابی قابلیت اطمینان مانند تحلیل مبتنی بر جدول احتمال خروج ظرفیت‌ها مناسب است. مدل قابلیت اطمینان پیشنهادی برای مطالعات کفایت RBTS و IEEE-RTS استفاده شد. بر اساس تحلیل عددی، واحدهای آبی جریان‌ی می‌توانند عملکرد قابلیت اطمینان سیستم قدرت را بهبود بخشند. با این حال، تاثیر مثبت آنها کمتر از یک واحد متعارف با همان اندازه است. دلیل اصلی این مشاهده، متناوب بودن جریان آب در طول سال است که منجر به استفاده جزئی از ظرفیت نصب شده این نیروگاه می‌شود.

References

مراجع

¹ Increase in the Peak Load-Carrying Capability Index

- [1] www.runofriverpower.com
- [2] www.carbonneutral.com
- [3] www.bkwitalia.com
- [4] A. Ghaedi, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini, "Toward a Comprehensive Model of Large-Scale DFIG-Based Wind Farms in Adequacy Assessment of Power System", *IEEE Trans. On Sustainable energy*, vol. 5, no. 1, Aug. 2013.
- [5] A.S. Dobakhshari, M. Fotuhi-Firuzabad, "A Reliability Model of Large Wind Farms for Power System Adequacy Studies", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 3, pp. 792-801, Sep. 2009.
- [6] A. P. Leite, C. L. T. Borges, D. M. Falcão, "Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1493-1501, Nov. 2006.
- [7] R. Karki, R. Billinton, "Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, no. 4, pp. 368-373, Dec. 2001.
- [8] A. Ghaedi, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Parvania, "Incorporating Large Photovoltaic Farms in Power Generation System Adequacy Assessment", *Scientia Iranica*, vol. 21, issue 3, 2014.
- [9] Y. Gao, R. Billinton, "Adequacy assessment of generating systems containing wind power considering wind speed correlation", *Renewable Power Generation, IET*, vol. 3, no. 2, pp. 217-226, June 2009.
- [10] P. Hu, R. Karki, R. Billinton, "Reliability evaluation of generating systems containing wind power and energy storage", *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 3, no. 8, pp. 783-791, Aug. 2009.
- [11] A. Nargeszar, A. Ghaedi, M. Nafar, M. Simab, "Reliability evaluation of the renewable energy-based microgrids considering resource variation", *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 3, pp. 507-527, 2023.
- [12] 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, 2020.
- [13] M. Mirzadeh, M. Simab, A. Ghaedi, "Reliability evaluation of power systems containing tidal powerplant", *Journal of Energy Management and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 28-38, 2020.
- [14] M.R. Negahdari, A. Ghaedi, M. Nafar and M. Simab, "Optimal planning of a microgrid containing tidal barrage equipped to the hydro-pumps", *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 9, pp. 2215-2224, 2023.
- [15] A. Ghaedi, H. Gorginpour, "Reliability evaluation of permanent magnet synchronous generator-based wind turbines considering wind speed variations", *Wind Energy*, vol. 24, no. 11, pp. 1275-1293, 2021.
- [16] A. Ghaedi, H. Gorginpour, "Spinning reserve scheduling in power systems containing wind and solar generations", *Electrical Engineering*, vol. 103, pp. 2507-2526, 2021.
- [17] A. Ghaedi, H. Gorginpour, "Reliability assessment of composite power systems containing sea wave slot-coned generators", *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 16, pp. 3172-3180, 2020.
- [18] 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.
- [19] Varun, I. K. Bha, Ravi Prakash, "Life Cycle Analysis of Run-of River Small Hydro Power Plants in India", *The Open Renewable Energy Journal*, vol. 1, pp. 11-16, 2008.
- [20] P. Heller, F.R. Bollaert, A. J. Schleiss, "Comprehensive system analysis of a multipurpose run-of-river power plant with holistic qualitative assessment", *Intl. J. River Basin Management*, vol. 8, no. 3-4, pp. 295-304, Oct. 2010.
- [21] Hemant Sharma, Jasvir Singh, "Run off River Plant: Status and Prospects", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 3, issue 2, July 2013.
- [22] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems", plenum press, second edition, London, 1992.
- [23] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems," Plenum Press, New York and London, 2nd Edition, 1994.
- [24] The water flow-data of the Sheshpir River in the Pars region of Iran related to the year 2019, collected by Talebi Power Plant Operator.
- [25] R. L. Cannon, V. D. Jitendra, J. C. Bezdek, "Efficient Implementation of the Fuzzy c-Means Clustering Algorithms" *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 2, pp. 248-255, March 1986.
- [26] H. C. Huang, Y. Y. Chuang, C. S. Chen, "Multiple Kernel Fuzzy Clustering", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 120-134, Feb. 2012.
- [27] Reliability data associated to components of run of the river power plant, collected by the Talebi Power Plant operator, Feb. 2019
- [28] R. Billinton, S. Kumar, and et.al., "A reliability test system for educational purposes basic data", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 1238-1244, Aug. 1989.