

Suitable model of renewable power plant with variable output**Ali Ebrahimi****Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran****ali09217241129@gmail.com****Received:** 01 December 2024**Revised:** 09 February 2025**Accepted:** 17 February 2025**Abstract:**

Today, power grids are using renewable power plants for various reasons. Among these reasons are the environmental problems of fossil fuels and concerns about the depletion of their resources. Renewable power plants that have been used to generate electricity so far include wind, photovoltaic, tidal, wave, ocean thermal, and hydropower plants. In these power plants, their output power varies due to changes in wind speed, solar radiation intensity, tidal height and tidal current speed, wave height and period, ocean surface temperature, and river water discharge. In various studies conducted for the economic analysis, planning, and operation of power grids with the presence of various types of renewable power plants, it is necessary to obtain a suitable model for these power plants. Due to the change in renewable energy sources over time, the output power of these power plants also varies over time, and this model cannot be used for conducting various studies with large changes over time. Accordingly, in this paper, with the help of a suitable clustering method, the number of output power states in these power plants is reduced and a suitable model for these power plants is presented. In order to reach a suitable model of renewable power plants with variable output, different clustering techniques have been compared and among these methods, the fuzzy clustering method has been selected.

Keywords: renewable power plant, suitable model, variable output, clustering technique.**Corresponding Author:** Ali Ebrahimi**Corresponding Author Address:** Department of Electrical Engineering- Kazerun Branch -Islamic Azad University- Kazerun, Iran

مدل مناسب نیروگاه‌های تجدیدپذیر با خروجی متغیر

علی ابراهیمی

دانشکده مهندسی برق - واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
ali09217241129@gmail.com

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

چکیده: امروزه به دلایل مختلف شبکه‌های برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر بهره می‌برند. از جمله این دلایل می‌توان به مشکلات زیست محیطی سوخت‌های فسیلی و نگرانی از پایان یافتن منابع آن‌ها اشاره نمود. نیروگاه‌های تجدیدپذیری که تاکنون به منظور تولید برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از نیروگاه‌های بادی، فتوولتاییک، جزرومدی، موج، حرارتی اقیانوسو آبی جریانی. در این نیروگاه‌ها به دلیل تغییر سرعت باد، شدت تابش خورشید، ارتفاع جزرومد و سرعت جریان‌های جزرومدی، ارتفاع و دوره تناوب امواج، دمای سطح اقیانوس و دبی آب رودخانه، توان خروجی آن‌ها متغیر است. در مطالعات مختلفی که به منظور تحلیل اقتصادی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه‌های برق با حضور انواع مختلف نیروگاه‌های تجدیدپذیر انجام می‌شود لازم است مدل مناسبی برای این نیروگاه‌ها به دست آورده شود. به دلیل تغییر منابع انرژی تجدیدپذیر در طول زمان، توان خروجی این نیروگاه‌ها نیز در طول زمان متغیر بوده و برای انجام مطالعات مختلف نمی‌توان از این مدل با تغییرات زیاد در طول زمان استفاده کرد. بر همین اساس در این مقاله به کمک یک روش خوشه‌بندی مناسب تعداد حالت‌های توان خروجی در این نیروگاه‌ها کاهش داده می‌شود و یک مدل مناسب برای این نیروگاه‌ها ارائه می‌شود. به منظور رسیدن به مدل مناسب از نیروگاه‌های تجدیدپذیر با خروجی متغیر، تکنیک‌های مختلف خوشه‌بندی با هم مقایسه شده‌اند و از بین این روش‌ها، روش خوشه‌بندی فازی انتخاب شده است.

کلمات کلیدی: نیروگاه‌های تجدیدپذیر، مدل مناسب، خروجی متغیر، تکنیک‌های خوشه‌بندی

نام نویسنده‌ی مسئول: علی ابراهیمی

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

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به خصوص انرژی باد به منظور تولید برق در سراسر جهان رشد زیادی داشته است. پاک بودن و نداشتن مشکلات زیست محیطی، ارزان بودن و نداشتن نگرانی از پایان یافتن منابع این انرژی‌ها از دلایل این امر بوده است. از طرف دیگر توان تولیدی این نیروگاه‌ها بدلیل وابستگی به منابع تجدیدپذیر در طول زمان متغیر بوده و نمی‌توان توان ثابتی از این نیروگاه‌ها انتظار داشت. به عنوان نمونه توان تولیدی نیروگاه‌های بادی به سرعت باد وابسته بوده و چون سرعت باد تغییر می‌کند توان تولیدی نیز متغیر خواهد بود. این امر بر مسائل مختلف سیستم قدرت شامل این نیروگاه‌ها از جمله قابلیت اطمینان تأثیر می‌گذارد. بر همین اساس لازم است در سیستم‌های قدرت امروزی که درصد قابل توجهی از توان را نیروگاه‌های بادی تولید می‌کنند مطالعه دقیق‌تری در زمینه قابلیت اطمینان صورت پذیرد. در این تحقیق با در دست داشتن داده‌های ساعت به ساعت سرعت باد و منحنی توان توربین نیروگاه‌های بادی توان خروجی واحدهای بادی بدست می‌آید. از آن‌جا که سرعت باد با تنوع بسیار زیادی برخوردار است مدل بدست آمده دارای تعداد زیادی حالت خواهد بود که برای انجام مطالعات قابلیت اطمینان به هیچ وجه مناسب نیست. بر همین اساس لازم است به کمک تکنیکی مناسب تعداد حالت‌های بهینه و همچنین توان این حالت‌ها تعیین شود و یک مدل قابلیت اطمینان مناسب چند حالتی برای نیروگاه‌های بادی تعیین شود.

مدل تحلیلی بدست آمده می‌تواند در مطالعات مختلف سیستم قدرت به مانند برنامه‌ریزی استفاده شود و همچنین تعداد و ظرفیت نیروگاه‌هایی که لازم است در آینده به منظور تأمین بار پیش‌بینی شده نصب گردند، با این مدل بدست می‌آید. در تعیین مدل مناسب قابلیت اطمینان (تعداد حالت‌ها و ظرفیت مربوط به هر حالت) از روش‌های مختلف خوشه‌بندی استفاده شده و مناسب‌ترین تکنیک که می‌تواند بهینه‌ترین مدل را از نقطه نظر قابلیت اطمینان بدست آید تعیین می‌شود. این تکنیک از مقایسه نتایج مربوط به روش‌های مختلف خوشه‌بندی حاصل می‌شود.

در مطالعات قابلیت اطمینان روش‌های تحلیلی (مدل چند حالتی با احتمال رخداد مربوط حالت‌ها) و غیر تحلیلی (مبتنی بر روش شبیه سازی مونت کارلو) وجود دارد. در این تحقیق از روش تحلیلی استفاده شده و یک مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای نیروگاه‌های بادی بدست می‌آید و لذا مدل بدست آمده مشکلات ناشی از روش شبیه سازی به مانند نیاز به حجم حافظه بالا، صرف نمودن زمان طولانی در شبیه سازی و ... را ندارد.

به منظور بدست آوردن تأثیر نیروگاه‌های بادی بر مطالعات قابلیت اطمینان کارهای زیادی انجام شده است. در مراجع [۱-۲] برای مزارع بادی یک مدل قابلیت اطمینان ارائه شده و کفایت سیستم قدرت در سطح اول با استفاده از معیارهای احتمالاتی و سلامت سیستم در حضور نیروی باد بررسی شده است. برای این که حالت واقعی‌تر سیستم قدرت در نظر گرفته شود مطالعات سیستم مرکب تولید و انتقال نیز انجام شده و بر این اساس اولویت در تعیین مکان و ظرفیت نصب نیروگاه‌های بادی به دست آمده است. مدلی که برای واحد بادی به دست آورده شده است تنها عدم قطعیت موجود در سرعت وزش باد را در نظر گرفته و المان‌های موجود در سیستم تبدیل انرژی را مورد توجه قرار نداده است.

در مراجع [۳-۵] یک مدل ساده برای سرعت باد تنها بر اساس متوسط و انحراف معیار سالانه آن در یک مکان جغرافیایی مشخص معرفی و یک توزیع احتمال برای سرعت باد به دست آمده است. سپس با توجه به مشخصه توان خروجی توربین، واحد بادی با ظرفیت چندین حالتی با احتمال‌های مربوطه مدل شده و از این مدل در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل تولیدات بادی استفاده شده است. در مرجع [۶] از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلوی غیرترتیبی و بر اساس مدل سلامت سیستم، ظرفیت معادلی برای یک واحد بادی تعیین و یک مدل دو حالتی برای این واحد در نظر گرفته شده است. در این مقاله بر اساس داده‌های گذشته سرعت باد، یک توزیع وایبال به این داده‌ها برازش شده است. با تولید اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت برای واحدهای متعارف، و توزیع وایبال برای واحدهای بادی، مدل تولید در هر ساعت مشخص می‌شود، سپس با بار آن ساعت مقایسه و در نتیجه انجام شبیه‌سازی برای ۱ سال شاخص‌های ریسک و سلامت به دست می‌آید. برای رسیدن به همگرایی باید شبیه‌سازی به مدت چند هزار سال تکرار شود. یکی از شاخص‌هایی که محاسبه می‌شود تعداد ساعاتی است که ظرفیت واحد بادی صفر می‌باشد. برای مدل کردن واحد بادی به صورت دو حالتی، نسبت تعداد ساعات ظرفیت صفر به کل

ساعات شبیه‌سازی شده، به صورت عدم دسترس‌پذیری در نظر گرفته شده، آن‌گاه ظرفیت معادل واحد بادی تغییر داده شده تا شاخص‌های قابلیت اطمینان حاصل از این مدل با مقدار به دست آمده از شبیه‌سازی برابر شود. در مرجع [۷] قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال با وجود واحدهای بادی با در نظر گرفتن همبستگی بین سایت‌های بادی به روش نمونه‌برداری مونت‌کارلو ارزیابی شده است. در مرجع [۸] قابلیت اطمینان سیستم مرکب تولید و انتقال با وجود واحد بادی بررسی شده است. با داشتن داده‌های گذشته سرعت باد منحنی نرمال به سرعت باد برای ۶ ماه اول و دوم سال به صورت جداگانه برازش شده و بر اساس مشخصه توربین، توان خروجی واحد بادی به دست آمده و سپس به ۱۱ حالت با احتمال‌های مربوطه گسسته شده است. این مدل به سیستم تولید و انتقال جنوب ایران اعمال شده و شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم مرکب به دست آمده است.

در مراجع [۹-۱۲] روشی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ایزوله شامل واحدهای دیزلی، بادی و فتوولتاییک در سطح اول ارائه شده است. در اینجا از شاخص‌های مرتبط با مدل سلامت سیستم که هر دو جنبه قطعی و احتمالاتی را با هم دارند در برنامه‌ریزی توسعه تولید این سیستم‌ها استفاده شده است؛ به علاوه توصیه شده است که به علت وجود منابع انرژی تجدیدپذیر در مطالعات از معیارهای دوگانه استفاده شود. در مرجع [۱۳] با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلوی ترتیبی کیفیت سیستم تولید شامل واحدهای بادی مقیاس کوچک ایزوله به همراه باتری ذخیره‌کننده انرژی بررسی شده است. در مرجع [۱۴-۱۵] روشی به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم ایزوله شامل واحدهای بادی، دیزلی و باتری ذخیره‌کننده انرژی برای تأمین بار مصرف‌کنندگان در نقاط دوردست از شبکه ارائه شده است. در این روش یک توزیع وایبال به سرعت باد برازش شده، سپس حالت‌های گسسته‌ای برای سرعت باد در نظر گرفته شده و احتمال مربوطه به دست آمده است. با توجه به مشخصه توربین، توان واحد بادی در هر سرعت تعیین و در نهایت مدل چندحالتی برای واحد بادی حاصل شده است. باتری نیز به صورت یک ظرفیت متوسط با احتمال ۱۰۰ درصد بر اساس میزان انرژی‌های شارژ و دشارژ شده گذشته و در نظر گرفتن بازده مدل شده است. در مرجع [۱۶] تأثیر استفاده از منبع ذخیره‌کننده انرژی بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت ایزوله شامل واحدهای دیزلی، بادی و فتوولتاییک به روش شبیه‌سازی مونت کارلوی ترتیبی بررسی شده است. در مرجع [۱۷] قابلیت اطمینان یک سیستم میکروگرید شامل توربین‌های گازی، بادی، سیستم فتوولتاییک و باتری ذخیره‌کننده انرژی به روش شبیه‌سازی مونت کارلو مطالعه شده است. در این مقاله توزیع سرعت باد به صورت وایبال مدل شده است. برای انرژی تابشی خورشید نیز در سه وضعیت هوای صاف، ابری و بارانی الگوهای ارائه شده و میزان انحراف تابش از این الگوها به صورت توزیع نرمال مدل شده است. تعیین مدل قابلیت اطمینان سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز به دلیل تغییر توان خروجی به مانند تعیین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه بادی می‌باشد. در مقاله [۱۸] مدل قابلیت اطمینان نیروگاه حرارتی خورشیدی از نوع دریافت‌کننده مرکزی به دست آورده شده است. در این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان چندحالتی با در نظر گرفتن اثر خرابی تجهیزات تشکیل‌دهنده و تغییرات توان خروجی ناشی از تغییر شدت تابش خورشید به دست آورده شده است. مقاله [۱۹] برای مبدل‌های انرژی امواج مختلف مدل قابلیت اطمینان ارائه کرده است. در این مقاله نیروگاه‌های مختلف امواج شامل پلامیس، بایو، ژنراتور شیار مخروطی و ازدهای موج در نظر گرفته شده است و مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن اثر خرابی اجزای تشکیل‌دهنده و تغییرات توان خروجی نیروگاه به دست آورده شده است. در مقاله [۲۰] مدل قابلیت اطمینان نیروگاه امواج مبتنی بر تکنولوژی پلامیس به دست آورده شده است. در این مقاله تغییرات ارتفاع و دوره تناوب امواج که منجر به تغییر توان تولیدی نیروگاه شده در نظر گرفته شده است.

از مطالعه مقالات فوق نکات زیر حاصل شده است:

در هیچ کدام از مقالات فوق یک مدل قابلیت اطمینان برای واحد بادی ارائه نشده است. بنابراین نیاز است که با شناخت این سیستم‌ها و چگونگی عملکرد آن‌ها یک مدل قابلیت اطمینان ارائه شود.

در بررسی عدم قطعیت موجود در منابع انرژی تجدیدپذیر باد بیشتر از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. در این تحقیق مدل تحلیلی قابلیت اطمینانی که برای واحد بادی ارائه می‌شود عدم قطعیت موجود در سرعت باد را مد نظر قرار می‌دهد.

تاکنون تعیین تعداد حالات مناسب مدل قابلیت اطمینان مزارع بادی، به صورت دلخواه تعیین می‌شده است. در این مقاله سعی خواهد شد الگوریتم‌های مختلف کاهش تعداد حالات مورد بررسی قرار گرفته و روشی معرفی شود که در عین ساده نمودن و کاهش حجم محاسبات دقت قابل قبولی نیز در تعیین شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم تولید شامل نیروگاه‌های بادی داشته باشد.

با توجه به مقالات مرور شده و نتیجه‌گیری به دست آمده نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

تعیین مدل قابلیت اطمینان نیروگاه بادی با در نظر گرفتن اثر خرابی اجزای تشکیل‌دهنده و تغییرات سرعت باد که منجر به تغییرات توان خروجی نیروگاه می‌شود.

- استفاده از روش خوشه‌بندی فازی به عنوان روشی مناسب جهت کاهش تعداد حالت‌های توان در مدل قابلیت اطمینان نیروگاه بادی

بر اساس موارد گفته شده در فوق و اهدافی که این تحقیق دنبال می‌کند، ساختار این مقاله به صورت زیر تدوین گردیده است: در بخش دوم مفهوم قابلیت اطمینان سیستم قدرت و در بخش سوم چگونگی تعیین مدل قابلیت اطمینان مزارع بادی بیان می‌شود. بخش چهارم انواع روش‌های خوشه‌بندی را تشریح نموده و این روش‌ها در بخش پنجم به منظور کاهش تعداد حالات مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی مورد استفاده قرار گرفته و بر اساس شاخص‌های کفایت سیستم قدرت شامل این مزارع بادی، مناسب‌ترین روش تعیین می‌شود. در بخش ششم نیز نتیجه‌گیری تحقیق آورده شده است.

۲- قابلیت اطمینان

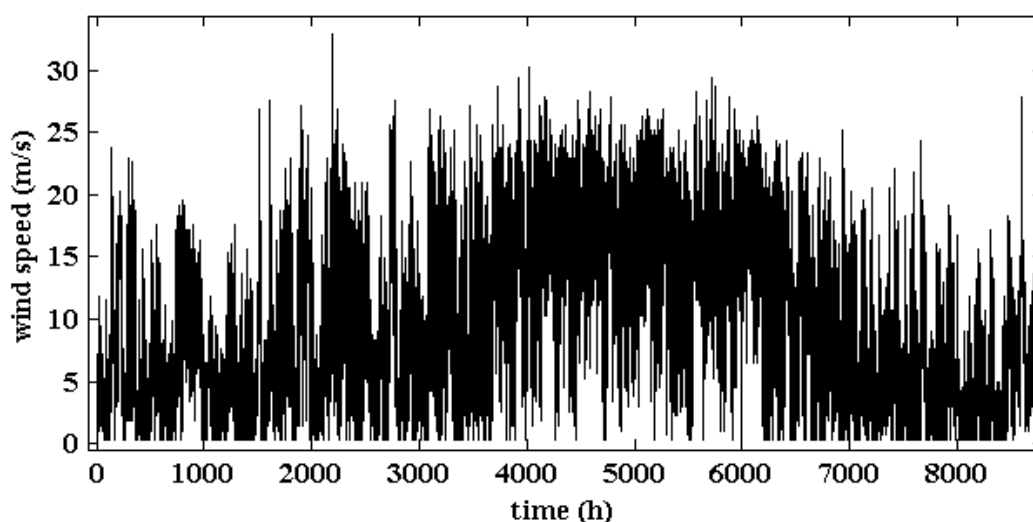
از اوایل قرن بیستم استفاده از انرژی الکتریکی آغار شد و امروزه یکی از جنبه‌های مهم در کشورهای پیشرفته و صنعتی نیروی برق است. از طرف دیگر با بوجود آمدن محیط تجدید ساختار شده، اهمیت کیفیت عرضه انرژی الکتریکی همراه با بالا رفتن انتظارات مردم افزایش پیدا کرده است. هر گونه خرابی در هر قسمت از سیستم قدرت باعث کاهش کیفیت، نقص در عرضه بار و با وقفه خواهد شد که این به نوبه خود می‌تواند باعث قطعی‌های محلی و خانگی و در صورت حاد خود باعث قطعی گسترده و خاموشی شود. معمولاً در هر کشوری در یک برهه زمانی خاص یک قطعی گسترده که سبب خاموش شدن کل شبکه شده اتفاق افتاده است. از این نمونه خاموشی‌ها می‌توان به خاموشی سال ۱۹۹۷ آمریکا (در نیویورک) اشاره کرد که میزان خسارت آن بالغ بر ۳۵۰ میلیون دلار برآورد شده است. با توجه به این توضیحات می‌توان به اهمیت برآورده نمودن سطح مناسبی از قابلیت اطمینان شبکه پی برد. در این زمینه تکنیک‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرد باید طوری باشند که یک موازنه منطقی بین ریسک سیستم و هزینه‌های اقتصادی در نظر بگیرد.

در یک سیستم قدرت هدف تأمین تقاضای بار مصرف‌کنندگان می‌باشد. بنابراین قابلیت اطمینان سیستم قدرت میزان توانایی این سیستم در تأمین برق مشترکین به صورت پیوسته همراه با کیفیت مطلوب و رعایت استانداردهای مربوطه می‌باشد. این توانایی در دو بخش کفایت و امنیت سیستم قدرت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. کفایت سیستم قدرت زمانی فراهم می‌شود که امکانات کافی در قسمت‌های تولید، انتقال و توزیع فراهم باشد که بتواند تقاضای بار را همراه با رعایت قیود بهره‌برداری پاسخگو باشد. امنیت سیستم قدرت به توانایی این سیستم در پاسخ به هرگونه اغتشاش نظیر از دست رفتن یک واحد تولیدی و یا قطع خطوط انتقال گفته می‌شود. مطالعات قابلیت اطمینان برای سیستم‌های قدرت با توجه به وجود قسمت‌های اساسی تولید، انتقال و توزیع در سه سطح سلسله مراتبی انجام می‌شود:

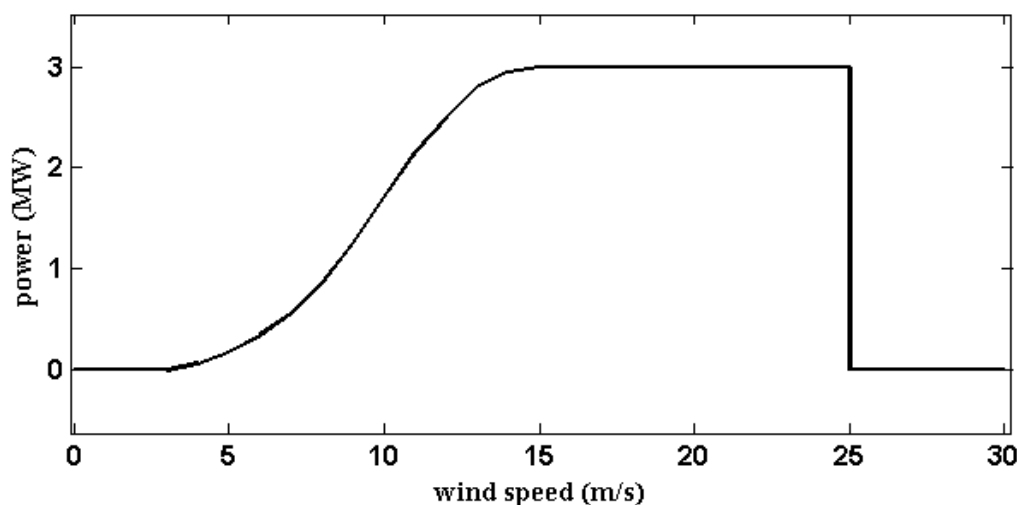
در سطح اول تنها قسمت تولید در نظر گرفته شده و توانایی واحدهای تولیدی موجود در تأمین کل بار بدون در نظر گرفتن قسمت‌های انتقال و توزیع بررسی می‌شود. در سطح دوم در کنار بخش تولید، بخش انتقال نیز در نظر گرفته شده و توانایی سیستم مرکب در تغذیه بار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در سطح سوم هر سه قسمت تولید، انتقال و توزیع در مطالعات وارد می‌شوند اما به دلیل حجم محاسبه و پیچیدگی زیاد تنها قسمت توزیع با استفاده از نتایج به دست آمده در سطوح قبل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های تجدیدپذیر

در این بخش مدل قابلیت اطمینان نیروگاه‌های تجدیدپذیر با خروجی متغیر نظیر نیروگاه بادی به دست آورده می‌شود. نیروگاه بادی به مانند سایر سیستم‌ها از اجزایی تشکیل شده است که ممکن است خراب شوند. بنابراین به مانند سایر سیستم‌ها برای نیروگاه بادی نیز یک دسترس‌پذیری تعریف می‌گردد دسترس‌پذیری نیروگاه بادی همان احتمال سالم بودن آن است. در این مرحله تأثیر متغیر بودن سرعت وزش باد بر مدل قابلیت اطمینان واحد بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سرعت باد با توجه به شرایط آب و هوایی در طول سال، روز و حتی ساعت متغیر می‌باشد. در شکل ۱ سرعت وزش باد برای منطقه منجیل در سال ۲۰۲۳ به صورت ساعت به ساعت (۸۷۶۰ داده) آورده شده است. این داده‌ها توسط سنسورهای مختلف بادی در ارتفاعات مختلف جمع‌آوری شده است. همان‌گونه که مشخص است سرعت باد به صورت تصادفی بوده و در طول زمان‌های مختلف مقادیر متفاوتی را اختیار می‌کند. برای به دست آوردن توان خروجی توربین بادی از منحنی توان توربین که توسط سازنده داده شده است استفاده می‌شود. منحنی توان توربین V90 ساخت کارخانه Vestas دانمارک در شکل ۲ نشان داده شده است. این توربین بادی دارای ظرفیت ۳ مگاوات بوده و بر اساس تکنولوژی ژنراتور القایی دو سو تغذیه کار می‌کند.



شکل (۱): الگوی وزش باد در سال ۲۰۲۳ در منطقه منجیل در ارتفاع ۴۰ متری به صورت ساعت به ساعت



شکل (۲): منحنی توان توربین V90

برای یک توربین بادی بر اساس داده‌های سرعت باد و منحنی توان توربین، مقدار توان خروجی با فرض سالم بودن توربین به دست می‌آید. از آنجا که تغییرات سرعت باد به صورت پیوسته می‌باشد توان خروجی توربین بادی نیز به صورت پیوسته بوده و دارای مقادیر متنوعی می‌باشد. وجود تعداد زیادی حالت برای توان خروجی واحد بادی به منظور انجام مطالعات قابلیت اطمینان مناسب نمی‌باشد و باید به کمک تکنیک خوشه‌بندی تعداد حالت‌ها کاهش یابد. با انتخاب روش مناسب خوشه‌بندی می‌توان تعداد مناسب حالت‌ها و همچنین مرکز خوشه‌ها که به عنوان ظرفیت هر حالت استفاده می‌شوند را تعیین نمود. روش‌های خوشه‌بندی متفاوتی وجود دارد که در این تحقیق هدف این است که از بین این روش‌ها مناسب‌ترین روش انتخاب گردد. پس از اعمال روش خوشه‌بندی تعداد حالت‌ها (کلاسترها)، مرکز حالت‌ها و داده‌های متعلق به هر حالت تعیین می‌شوند. پس از اعمال روش خوشه‌بندی تعداد حالت‌ها (کلاسترها)، مرکز حالت‌ها و داده‌های متعلق به هر حالت تعیین می‌شوند. با استفاده از روش فرکانس و تداوم احتمال هر کدام از این حالت‌ها و نرخ انتقال از یک حالت به حالت دیگر مطابق روابط زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_{ij} = \frac{N_{ij}}{T_i} \quad (1)$$

در رابطه فوق λ_{ij} نرخ گذر از حالت i ام به حالت j ام، N_{ij} تعداد دفعاتی که گذر از حالت i ام به حالت j ام اتفاق افتاده و T_i کل مدت زمان دوام در حالت i ام می‌باشد.

$$\lambda_{i+} = \sum_{j < i} \lambda_{ij}, \lambda_{i-} = \sum_{j > i} \lambda_{ij} \quad (2)$$

در رابطه فوق λ_{i+} نرخ گذر به ظرفیت‌های بالاتر و λ_{i-} نرخ گذر به ظرفیت‌های کوچکتر می‌باشد.

$$P_i = \frac{T_i}{T}, T = \sum T_i \quad (3)$$

در رابطه فوق P_i احتمال مربوط به حالت i ام و T کل زمان مورد مطالعه است.

۴- تکنیک‌های مختلف خوشه‌بندی

بر اساس اینکه هر کدام از داده‌ها در یک و یا چند خوشه قرار بگیرند دو نوع خوشه‌بندی وجود دارد: خوشه‌بندی سخت و فازی. در خوشه‌بندی سخت (hard- crisp) که خوشه‌بندی کلاسیک نیز نامیده می‌شود هر کدام از داده‌ها تنها متعلق به یک خوشه می‌باشند. در خوشه‌بندی فازی هر کدام از داده‌ها ممکن است به دو و یا چند خوشه متعلق باشند. در این حالت هر کدام از داده‌ها بر اساس یک عدد فازی بین ۰ و ۱ به هر کدام از خوشه‌ها تعلق دارند به گونه‌ای که مجموع این عدد فازی یعنی مجموع تعلق هر داده به کل خوشه‌ها یک می‌باشد. در الگوریتم‌های خوشه‌بندی سه چیز اهمیت دارد: اول اینکه تعداد خوشه‌ها چقدر باشد، دوم اینکه مرکز هر کدام از خوشه‌ها و یا به عبارت دیگر شاخصی که بیانگر آن خوشه باشد چه مقداری باشد و در نهایت اینکه چه محدوده‌ای متعلق به هر کدام از خوشه‌ها می‌باشد. بر اساس این موارد نیز روش‌های خوشه‌بندی متفاوت می‌باشند؛ ممکن است در یک روش خوشه‌بندی مرکز هر خوشه نقطه میانی آن خوشه باشد و در روش دیگر بر اساس داده‌های موجود و با توجه به وزن داده‌ها مرکز خوشه تعیین گردد. البته می‌توان مرکز خوشه و همچنین محدوده هر کدام از خوشه‌ها را بر اساس بهینه نمودن تابع هدفی که در خوشه‌بندی استفاده می‌شود تعیین نمود. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده، در این مقاله چهار روش زیر به منظور تعیین تعداد خوشه‌ها، مراکز آن‌ها و محدوده مربوط به هر کدام از خوشه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

-استفاده از روش سخت، در نظر گرفتن خوشه‌های یکنواخت و تعیین مرکز خوشه بر اساس نقطه میانی هر خوشه
-استفاده از روش سخت، در نظر گرفتن خوشه‌های یکنواخت و تعیین مرکز خوشه بر اساس وزن دادن داده‌های موجود در هر خوشه

-استفاده از روش سخت، در نظر گرفتن تعداد، محدوده و مرکز خوشه با انجام بهینه‌سازی تابع هدف مبتنی بر فاصله بین داده‌ها

-استفاده از روش فازی و در نظر گرفتن تعداد، محدوده و مرکز خوشه با انجام بهینه‌سازی تابع هدف مبتنی بر فاصله بین داده‌ها

منظور از خوشه‌بندی یکنواخت این است که طول همه خوشه‌ها مساوی می‌باشد. به عنوان نمونه اگر داده‌های سرعت باد بین ۰ تا ۵ متر بر ثانیه بوده و بنا باشد ۴ خوشه یکنواخت در نظر گرفته شود این چهار خوشه عبارتند از:

خوشه اول: سرعت‌های بین ۰ تا ۱/۲۵ متر بر ثانیه

خوشه دوم: سرعت‌های بین ۱/۲۵ تا ۲/۵ متر بر ثانیه

خوشه سوم: سرعت‌های بین ۲/۵ تا ۳/۷۵ متر بر ثانیه

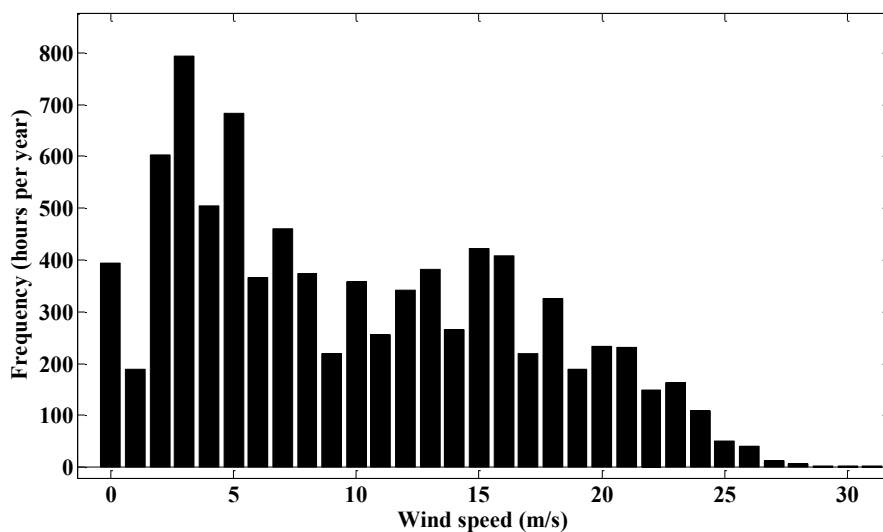
خوشه چهارم: سرعت‌های بین ۳/۷۶ تا ۵ متر بر ثانیه

تفاوت اصلی مجموعه‌های فازی و مجموعه‌های کلاسیک در این است که تابع تعلق مجموعه‌های فازی دو مقداری نیست (۰ یا ۱) بلکه می‌تواند هر مقداری بین ۰ تا ۱ را اختیار کند. حال مجموعه انسان‌های جوان و پیر را در نظر بگیرید. اگر ۲۵ سال را سن جوانی در نظر بگیریم می‌توانیم به ۲۵ تعلق ۱ بدهیم و مثلاً به ۳۰ تعلق ۰/۸ و به ۳۵ تعلق ۰/۷۵ و به ۹۰ تعلق ۰/۱ را بدهیم. اگر اعضای یک مجموعه فازی تنها دارای تابع تعلق ۰ و ۱ باشند این مجموعه فازی یک مجموعه کلاسیک خواهد بود. نکته جالب توجه این است که مثلاً سن ۵۰ می‌تواند با تعلق ۰/۵ عضو مجموعه جوان باشد و با تعلق ۰/۵ عضو مجموعه پیر؛ یعنی یک عضو مجموعه مرجع می‌تواند با درجه‌های تعلق مختلف عضو مجموعه‌های فازی تعریف شده روی مجموعه مرجع باشد. در خوشه‌بندی کلاسیک هر نمونه ورودی متعلق به یک و فقط یک خوشه می‌باشد و نمی‌تواند عضو دو خوشه و یا بیشتر باشد. مثلاً هر یک از وسایل نقلیه عضو یک خوشه می‌باشد و نمونه‌ای عضو دو خوشه نیست و به زبان دیگر خوشه‌ها همپوشانی ندارند. حال حالتی را در نظر بگیرید که میزان تشابه یک نمونه با دو خوشه و یا بیشتر یکسان باشد. در خوشه‌بندی کلاسیک باید تصمیم‌گیری شود که این نمونه متعلق به کدام خوشه است. تفاوت اصلی خوشه‌بندی کلاسیک و خوشه‌بندی فازی در این است که در خوشه‌بندی فازی یک نمونه می‌تواند متعلق به بیش از یک خوشه باشد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

داده‌های مربوط به سرعت باد در منطقه منجیل نشان داده شد. با اعمال این داده‌ها به منحنی توربین V90 توان خروجی هر واحد در هر ساعت به دست می‌آید. منحنی هیستوگرام مربوط به داده‌های سرعت باد در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است داده‌ها حول دو سرعت یکی نزدیکی ۳ متر بر ثانیه و دیگری ۱۵ متر بر ثانیه دارای توزیع مناسبی بوده و نتیجه خوشه‌بندی می‌تواند به دو خوشه منتهی گردد. اما نکته‌ای که باید مورد توجه قرار بگیرد این است که خوشه‌بندی سرعت باد نمی‌تواند مدل قابلیت اطمینان مناسب و دقیقی را بدست دهد. اگر این امر صورت پذیرد داده‌های نزدیک به همی که کمتر و بیشتر از سرعت قطع بالا قرار دارند ممکن است در یک خوشه قرار بگیرند و منجر به یک توان شوند؛ در حالی که سرعت‌های بالاتر از قطع بالا منجر به توان صفر و سرعت‌های کمتر از قطع بالا به توان نامی منجر می‌شوند. بنابراین باید الگوریتم خوشه‌بندی به داده‌های توان خروجی اعمال گردد. سیستم تست RBTS دارای ۲۴۰ مگاوات واحد نصب شده شامل ۲ واحد ۵ مگاواتی، یک واحد ۱۰ مگاواتی، ۵ واحد ۲۰ مگاواتی و ۳ واحد ۴۰ مگاواتی با پیک بار سالانه ۱۸۵ مگاوات می‌باشد. مدل بار به صورت یک خط مستقیم بوده که از ۱۰۰ تا ۶۰ درصد پیک بار ماکزیمم جریان دارد. مدل قابلیت اطمینان مزرعه بادی با مدل قابلیت اطمینان مربوط به سیستم تست ترکیب شده و مقدار متوسط انرژی تأمین نشده در پیک بار ۱۸۵ مگاوات بدست آورده شده است. نتایج حاصل از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب مقدار ۵۵/۱۸۸۳ مگاوات ساعت در سال را نشان می‌دهد. در این قسمت به منظور کاهش تعداد حالات از روش خوشه‌بندی یکنواخت به گونه‌ای که مرکز هر خوشه نقطه میانی باشد استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تعداد خوشه‌ها در تعیین مدل قابلیت اطمینان مزرعه بادی بسیار

اهمیت دارد در این مطالعه تعداد خوشه‌ها از ۴ تا ۱۰ خوشه تغییر داده شده و در هر حالت مدل مربوط به مزرعه بادی بدست آورده شده است.



شکل (۳): هیستوگرام سرعت وزش باد

سپس مدل بدست آمده در ارزیابی کفایت سیستم قدرت RBTS همراه با مزرعه بادی استفاده شده است. در جداول زیر مدل قابلیت اطمینان مزرعه بادی در هر کدام از این حالت‌ها آورده شده است:

جدول (۱): مدل قابلیت اطمینان ۴ حالت مزرعه بادی

حالت	مرکز خوشه	محدوده توان	احتمال
۱	۳/۷۵	۷-۰/۵	۰/۴۸۲۱
۲	۱۱/۲۵	۷/۱۵-۵	۰/۰۶۵۷
۳	۱۸/۷۵	۲۲-۱۵/۵	۰/۰۵۶۱
۴	۲۶/۲۵	۲۲/۳۰-۵	۰/۳۹۶۱

جدول (۲): مدل قابلیت اطمینان ۵ حالت مزرعه بادی

حالت	مرکز خوشه	محدوده توان	احتمال
۱	۳	۶-۰	۰/۴۵۰۲
۲	۹	۱۲-۶	۰/۰۷۱۰
۳	۱۵	۱۸-۱۲	۰/۰۴۲۰
۴	۲۱	۲۴-۱۸	۰/۰۵۳۵
۵	۲۷	۳۰-۲۴	۰/۳۸۳۳

جدول (۳): مدل قابلیت اطمینان ۶ حالت مزرعه بادی

حالت	مرکز خوشه	محدوده توان	احتمال
۱	۲/۵	۵-۰	۰/۴۳۲۴
۲	۷/۵	۱۰-۵	۰/۰۶۳۱
۳	۱۲/۵	۱۵-۱۰	۰/۰۵۲۳
۴	۱۷/۵	۲۰-۱۵	۰/۰۲۶۹
۵	۲۲/۵	۲۵-۲۰	۰/۰۵۳۷

۰/۳۷۱۶	۳۰-۲۵	۲۷/۵	۶
--------	-------	------	---

جدول (۴): مدل قابلیت اطمینان ۷ حالت مزرعه بادی

احتمال	محدوده توان	مرکز خوشه	حالت
۰/۴۱۳۶	۴-۰/۳	۲/۱۵	۱
۰/۰۶۸۵	۴/۸-۳/۶	۶/۴۵	۲
۰/۰۳۹۱	۸/۱۲-۶/۹	۱۰/۷۵	۳
۰/۰۴۲۰	۱۲/۱۷-۹/۲	۱۵/۰۵	۴
۰/۰۲۶۹	۱۷/۲۱-۲/۵	۱۹/۳۵	۵
۰/۰۵۲۶	۲۱/۲۵-۵/۸	۲۳/۶۵	۶
۰/۳۵۷۱	۲۵/۳۰-۸	۲۷/۹۵	۷

جدول (۵): مدل قابلیت اطمینان ۸ حالت مزرعه بادی

احتمال	محدوده توان	مرکز خوشه	حالت
۰/۴۱۳۶	۳-۰/۷۵	۱/۸۷۵	۱
۰/۰۶۸۵	۳/۷-۷۵/۵	۵/۶۲۵	۲
۰/۰۲۶۸	۷/۱۱-۵/۳۵	۹/۳۷۵	۳
۰/۰۳۸۹	۱۱/۱۵-۲۵	۱۳/۱۲۵	۴
۰/۰۲۶۸	۱۸-۱۵/۷۵	۱۶/۸۷۵	۵
۰/۰۲۹۲	۱۸/۲۲-۷۵/۵	۲۰/۶۲۵	۶
۰/۰۳۹۰	۲۲/۲۶-۵/۲۵	۲۴/۳۷۵	۷
۰/۳۵۷۱	۲۶/۳۰-۲۵	۲۸/۱۲۵	۸

با بدست آوردن مدل مزرعه بادی با تعداد حالات مختلف و اعمال آن به سیستم تست RBTS مقدار شاخص متوسط انرژی تامین نشده در پیک بار ۱۸۵ مگاوات محاسبه شده و در جدول زیر آورده شده است:

جدول (۶): مقدار شاخص انرژی تأمین نشده در حالات مختلف

تعداد حالاتها	۴	۵	۶	۷	۸
مقدار انرژی تأمین نشده (MWh/yr)	۴۵/۴۶۵۶	۴۷/۰۳۴۰	۴۸/۳۵۴۷	۴۹/۱۸۸۱	۵۰/۷۴۲۱
درصد خطا نسبت به حالت اولیه	۱۷/۶	۱۴/۸	۱۲/۴	۱۰/۹	۸/۱

همانگونه که در جدول فوق نشان داده شده است با زیاد شدن تعداد حالت میزان خطا کاهش می‌یابد. مدل ۸ حالت مزرعه بادی با دقت کمتر از ۱۰ درصد می‌تواند به عنوان جایگزین مزرعه بادی با تعداد حالات زیاد استفاده شود و اگر این میزان خطا قابل قبول نباشد باید تعداد حالات افزایش داده شود. در این قسمت به مانند قبل خوشه‌ها یکنواخت فرض شده اما مرکز خوشه بر اساس وزن‌دهی داده‌های موجود در آن خوشه به صورت رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$c_k = \sum_{i=1}^n P_i x_i \quad (۴)$$

در رابطه فوق c_k مرکز خوشه k ام، x_i داده‌های موجود در این خوشه که دارای n تنوع بوده و P_i احتمال مربوط به داده x_i در این خوشه می‌باشد. بر این اساس با در نظر گرفتن تعداد ۴ تا ۸ خوشه، مدل قابلیت اطمینان مزرعه بادی به صورت نشان داده شده در جداول زیر خواهد بود:

جدول (۷): مدل قابلیت اطمینان ۴ حالت مزرعه بادی

احتمال	محدوده توان	مرکز خوشه	حالت
۰/۴۸۲۱	۷-۰/۵	۱/۵	۱
۰/۰۶۵۷	۷/۱۵-۵	۱۱/۷	۲
۰/۰۵۶۱	۲۲-۱۵/۵	۱۹/۲	۳
۰/۳۹۶۱	۲۲/۳۰-۵	۲۹/۱	۴

جدول (۸): مدل قابلیت اطمینان ۵ حالت مزرعه بادی

احتمال	محدوده توان	مرکز خوشه	حالت
۰/۴۵۰۲	۶-۰	۱/۱	۱
۰/۰۷۱۰	۱۲-۶	۸/۶	۲
۰/۰۴۲۰	۱۸-۱۲	۱۴/۹	۳
۰/۰۵۳۵	۲۴-۱۸	۲۰/۹	۴
۰/۳۸۳۳	۳۰-۲۴	۲۹/۳	۵

جدول (۹): مدل قابلیت اطمینان ۶ حالت مزرعه بادی

احتمال	محدوده توان	مرکز خوشه	حالت
۰/۴۳۲۴	۵-۰	۰/۹	۱
۰/۰۶۳۱	۱۰-۵	۶/۷	۲
۰/۰۵۲۳	۱۵-۱۰	۱۲/۴	۳
۰/۰۲۶۹	۲۰-۱۵	۱۷/۳	۴
۰/۰۵۳۷	۲۵-۲۰	۲۳/۳	۵
۰/۳۷۱۶	۳۰-۲۵	۲۹/۵	۶

جدول (۱۰): مدل قابلیت اطمینان ۷ حالت مزرعه بادی

احتمال	محدوده توان	مرکز خوشه	حالت
۰/۴۱۳۶	۴-۰/۳	۰/۸	۱
۰/۰۶۸۵	۴/۸-۳/۶	۵/۶	۲
۰/۰۳۹۱	۸/۱۲-۶/۹	۱۰/۱	۳
۰/۰۴۲۰	۱۲/۱۷-۹/۲	۱۴/۹	۴
۰/۰۲۶۹	۱۷/۲۱-۲/۵	۱۹/۳	۵
۰/۰۵۲۶	۲۱/۲۵-۵/۸	۲۳/۹	۶
۰/۳۵۷۱	۲۵/۳۰-۸	۲۹/۷	۷

جدول (۱۱): مدل قابلیت اطمینان ۸ حالت مزرعه بادی

احتمال	محدوده توان	مرکز خوشه	حالت
۰/۴۱۳۶	۳-۰/۷۵	۰/۸	۱
۰/۰۶۸۵	۳/۷-۷۵/۵	۵/۸	۲
۰/۰۲۶۸	۷/۱۱-۵/۲۵	۹/۴	۳

۴	۱۳/۲	۱۱/۱۵-۲۵	۰/۰۳۸۹
۵	۱۷/۳	۱۸-۱۵/۷۵	۰/۰۲۶۸
۶	۲۱/۰	۱۸/۲۲-۷۵/۵	۰/۰۲۹۲
۷	۲۴/۵	۲۲/۲۶-۵/۲۵	۰/۰۳۹۰
۸	۲۹/۷	۲۶/۳۰-۲۵	۰/۳۵۷۱

مدل بدست آمده مزرعه بادی با تعداد حالات مختلف به سیستم تست RBTS اعمال شده و در هر مورد مقدار شاخص متوسط انرژی تدمین نشده در پیک بار ۱۸۵ مگاوات محاسبه می‌شود که نتایج آن در جدول زیر آورده شده است:

جدول (۱۲): مقدار شاخص انرژی تأمین نشده در حالات مختلف

۸	۷	۶	۵	۴	تعداد حالات
۵۴/۸۰۰۶	۵۴/۷۶۴۴	۵۴/۷۰۰۱	۵۴/۵۵۳۰	۵۳/۹۶۸۷	مقدار انرژی تأمین نشده (MWh/yr)
۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱/۲	۲/۲	درصد خطا نسبت به حالت اولیه

همان‌گونه که در این جدول مشخص است در این مورد میزان خطا به نسبت حالت قبل بسیار کمتر می‌باشد. از طرف دیگر هر چه تعداد حالات بیشتر شود میزان خطا کاهش یافته و با دقت خوبی می‌توان مدل ۶ حالت مزرعه بادی را با دقت کمتر از ۱ درصد به عنوان جایگزین مدل اولیه با تعداد حالات زیاد استفاده نمود. در این قسمت به منظور تعیین محدوده مربوط به هر خوشه و اینکه مرکز خوشه چه مقداری باشد یک تابع هدف مبتنی بر فاصله بین داده‌ها و مرکز خوشه مربوطه بهینه‌سازی می‌شود. با مینیمم نمودن این تابع در تعداد خوشه‌های متفاوت مرکز هر خوشه و احتمال مربوطه تعیین شده و مدل قابلیت اطمینان مزرعه بادی تعیین می‌شود. همانگونه که بیان شد این خوشه‌بندی سخت بوده و هر کدام از داده‌ها تنها متعلق به یک خوشه خواهند بود. در جداول زیر این مدل‌ها آورده شده است.

جدول (۱۳): مدل قابلیت اطمینان ۴ حالت مزرعه بادی

حالت	مرکز خوشه	محدوده توان	احتمال
۱	۱/۷	۵-۰/۱	۰/۴۰۱۲
۲	۶/۲	۵/۱۶-۱/۲	۰/۰۵۴۷
۳	۱۹/۵	۱۶/۲۴-۲/۵	۰/۰۷۵۸
۴	۲۹/۶	۲۴/۳۰-۵	۰/۴۶۸۳

جدول (۱۴): مدل قابلیت اطمینان ۵ حالت مزرعه بادی

حالت	مرکز خوشه	محدوده توان	احتمال
۱	۰/۹	۴-۰/۴	۰/۴۱۱۲
۲	۵/۳	۴/۱۰-۴/۷	۰/۰۷۹۸
۳	۱۱/۴	۱۰/۱۶-۷/۸	۰/۰۴۲۸
۴	۱۹/۹	۱۶/۲۵-۸/۳	۰/۰۶۳۹
۵	۲۹/۷	۲۵/۳۰-۳	۰/۴۰۲۳

جدول (۱۵): مدل قابلیت اطمینان ۶ حالت مزرعه بادی

حالت	مرکز خوشه	محدوده توان	احتمال
------	-----------	-------------	--------

۱	۰/۸	۳-۰/۱	۰/۳۳۲۱
۲	۴/۲	۳/۹-۱/۲	۰/۱۱۲۳
۳	۱۰/۶	۹/۱۵-۲/۶	۰/۰۲۵۸
۴	۱۷/۶	۱۵/۲۲-۶/۱	۰/۰۴۹۲
۵	۲۴/۵	۲۲/۲۶-۱/۳	۰/۰۷۱۱
۶	۲۹/۷	۲۶/۳۰-۳	۰/۴۰۹۵

جدول (۱۶): مدل قابلیت اطمینان ۷ حالت مزرعه بادی

حالت	مرکز خوشه	محدوده توان	احتمال
۱	۰/۵	۲-۰/۴	۰/۳۰۲۵
۲	۴/۱	۲/۸-۴/۱	۰/۱۲۵۸
۳	۹/۷	۸/۱۳-۱/۶	۰/۰۴۹۲
۴	۱۵/۱	۱۳/۱۸-۶/۴	۰/۰۳۲۴
۵	۲۰/۱	۱۸/۲۳-۴/۸	۰/۰۲۹۱
۶	۲۴/۹	۲۳/۲۵-۸/۵	۰/۰۶۵۶
۷	۲۹/۷	۲۵/۳۰-۵	۰/۳۹۵۴

جدول (۱۷): مدل قابلیت اطمینان ۸ حالت مزرعه بادی

حالت	مرکز خوشه	محدوده توان	احتمال
۱	۰/۴	۳-۰/۰	۰/۳۸۱۲
۲	۴/۱	۳/۷-۰/۹	۰/۱۱۲۵
۳	۹/۲	۷/۱۲-۹/۵	۰/۰۴۱۲
۴	۱۴/۲	۱۲/۱۶-۵/۲	۰/۰۲۲۷
۵	۱۷/۵	۱۶/۱۹-۲/۷	۰/۰۳۱۱
۶	۲۲/۲	۱۹/۲۴-۷/۷	۰/۰۳۳۲
۷	۲۵/۱	۲۴/۲۶-۵/۰	۰/۰۵۷۱
۸	۲۹/۸	۲۶/۳۰-۰	۰/۳۲۱۰

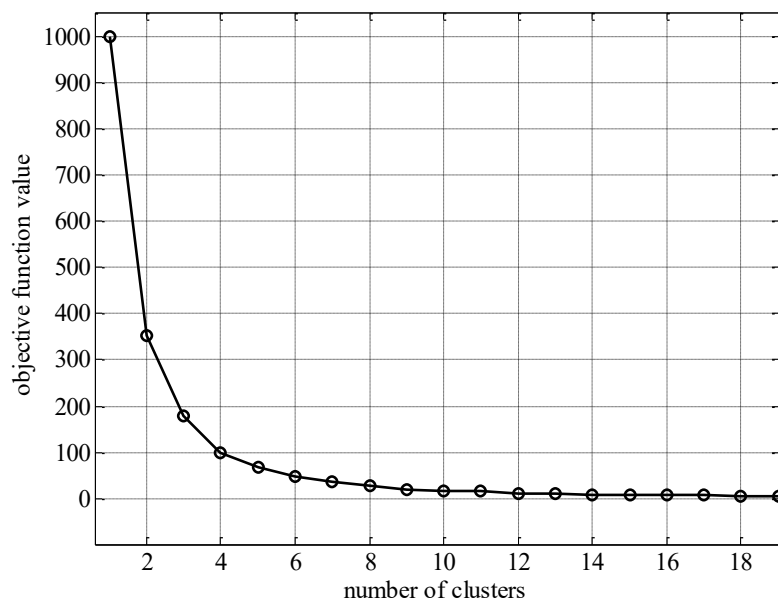
مدل بدست آمده مزرعه بادی با تعداد حالات مختلف به سیستم تست RBTS اعمال شده و در هر مورد مقدار شاخص متوسط انرژی تامین نشده در پیک بار ۱۸۵ مگاوات محاسبه می‌شود که نتایج آن در جدول زیر آورده شده است:

جدول (۱۸): مقدار شاخص انرژی تامین نشده در حالات مختلف

تعداد حالاتها	۴	۵	۶	۷	۸
مقدار انرژی تامین نشده (MWh/yr)	۵۴/۷۳۳۵	۵۴/۸۹۱۲	۵۴/۹۶۰۸	۵۵/۰۰۱۰	۵۵/۰۲۹۵
درصد خطا نسبت به حالت اولیه	۰/۸۲	۰/۵۴	۰/۴۱	۰/۳۴	۰/۲۹

همان‌گونه که مشخص است با زیاد شدن تعداد حالاتها میزان خطا کاهش می‌یابد. به علاوه این روش خوشه‌بندی توانسته است به نسبت دو روش قبل عملکرد بهتری داشته باشد. در این قسمت روش خوشه‌بندی میانگین فازی به منظور تعیین مدل قابلیت اطمینان مزارع بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس مدل بدست آمده در مطالعه ارزیابی کفایت سیستم‌های تست استاندارد استفاده می‌شوند. با اعمال روش خوشه‌بندی میانگین فازی به داده‌های توان خروجی نیروگاه بادی مقدار تابع هدف بر حسب تعداد خوشه‌ها به صورت نشان داده شده در شکل ۴ خواهد بود. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است با

افزایش تعداد خوشه‌ها روند کاهشی مقدار تابع هدف کند می‌شود به گونه‌ای که می‌توان تعداد خوشه‌ها را ۷ کلاستر به صورت نشان داده شده در جدول ۱۹ در نظر گرفت.



شکل (۴): نمودار مقدار تابع هدف بر حسب تعداد خوشه‌ها

جدول (۱۹): نتایج اعمال الگوریتم خوشه‌بندی به واحد بادی ۳ مگاواتی

شماره خوشه‌ها	مرکز خوشه
۱	۳
۲	۲/۵
۳	۱/۹
۴	۱/۳
۵	۰/۸
۶	۰/۳
۷	۰

مدل بدست آمده در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تست RBTS زمانی که مزرعه بادی به آن اضافه شده باشد استفاده شده است. در این حالت مقدار انرژی متوسط تأمین نشده به ازای پیک بار ۱۸۵ مگاوات ۵۵/۲۱۱۴ بدست آورده شده است که نشان می‌دهد نسبت به حالتی که از مدل اولیه مزرعه بادی با تعداد حالت‌های زیاد استفاده شده است تنها ۰/۰۴ درصد خطا وجود دارد. لذا از بین تمامی روش‌های خوشه‌بندی گفته شده این روش بهترین روش می‌باشد. البته این روش دارای حجم محاسباتی بیشتر بوده و می‌توان گفت کاملترین روش است؛ چرا که سایر روش‌های خوشه‌بندی زیرمجموعه این روش می‌باشند. به عنوان نمونه روش خوشه‌بندی سخت با در نظر گرفتن عدد تعلق صفر و یا یک حالت خاصی از روش خوشه‌بندی فازی می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تعیین تعداد حالات مناسب برای مدل‌سازی نیروگاه‌های تجدیدپذیر با خروجی متغیر به مانند نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های فتوولتائیک، نیروگاه‌های جزرومدی، نیروگاه‌های امواج، نیروگاه‌های حرارتی اقیانوس و نیروگاه‌های آبی جریان از روش خوشه‌بندی استفاده شد. در این نیروگاه‌ها به دلیل تغییر سرعت باد، تغییر شدت تابش خورشید، تغییر ارتفاع جزرومد و سرعت جریان‌های جزرومدی، تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج، تغییر دمای سطح اقیانوس و تغییر دبی آب رودخانه توان خروجی آن‌ها تغییر می‌کند. نتیجه این تحقیق نشان داد که استفاده از روش خوشه‌بندی فازی به بهترین

صورت می‌تواند نیروگاه‌های تجدیدپذیر با خروجی متغیر از جمله نیروگاه‌های بادی را مدل نماید. در مقایسه با روش‌های خوشه‌بندی سخت این نتیجه منطقی می‌باشد؛ چرا که روش‌های خوشه‌بندی سخت حالت خاصی از روش خوشه‌بندی فازی می‌باشد که عدد تعلق در آن‌ها صفر و یا یک می‌باشد. باید دقت داشت که در بدست آوردن این مدل از داده‌های گذشته سرعت باد استفاده شده است و اینکه مدل چند حالتی شود به این داده‌ها بستگی دارد. پرواضح است که هر چه داده‌های مربوط به تعداد سال‌های بیشتری در دسترس باشد مدل بدست آمده دقیقتر خواهد بود.

References

مراجع

- [1] Gundolf Dany, "Power Reserve in Interconnected Systems with High Wind Power Production" *IEEE Porto Power Tech Conference*, 10-13 September, Porto, Portugal, 2001.
- [2] Ahmad Salehi Dobakhshari, Mahmud Fotuhi-Firuzabad, "A Reliability Model of Large Wind Farms for Power System Adequacy Studies" *IEEE Transaction of Energy Conversion*, Vol 24, no. 3, September 2009.
- [3] Rajesh Karki, Po Hu, Roy Billinton, "A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation" *IEEE Transaction of Energy Conversion*, Vol. 21, no. 2, June 2006.
- [4] R. Karki, P. Hu and R. Billinton, "Reliability Evaluation of a Wind Power Delivery Ststem Using an Approximated Wind Model" *Universities Power Engineering Conferences, UPEC 2006*.
- [5] R. Karki, P. Hu, R. Billinton, "Adequacy Criteria and Methods for Wind Power Transmission Planning" *Power & Energy Society General Meeting. PES 2009*.
- [6] François Vallée, Jacques Lobry, Olivier Deblecker, "Impact of the Wind Geographical Correlation Level for Reliability Studies" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, no. 4, November 2007.
- [7] Yi. Gao, Roy Billinton, Rajesh Karki, "Composite Generation and Transmission System Reliability Evaluation Incorporating Two Wind Energy Facilities Considering Wind Speed Correlation" *North American Power Symposium, NAPS 2008*.
- [8] M. R. Haghighat, M. Omidvar, "Wind Farm Modeling in Reliability Assessment of Power System" *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH*, Stockholm, Sweden – pp. 11-15, June 2006.
- [9] Rajesh Karki, "Reliability and Cost Evaluation of Small Isolated Power System Containing Photovoltaic and Wind Energy", PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, April, 2000.
- [10] Roy Billinton, Rajesh Karki, "Capacity Expansion of Small Isolated Power Systems Using PV and Wind Energy", *IEEE Transaction on Powr Systems*, Vol. 16, no. 4, November 2001.
- [11] R. Billinton, R. Karki, "Maintaining Supply Reliability of Small Isolated Power Systems Using Renewable Energy" *IEE proc-Gener, Transm, Distrib*, Vol. 148, no. 6, November 2001.
- [12] Rajesh Karki, Roy Billinton, "Reliability/Cost Implications of PV and Wind Energy Utilization in Small Isolated Power Systems" *IEEE Transaction of Energy Conversion*, Vol. 16, no. 4, December 2001.
- [13] R. Billinton, Bagen, "A Sequential Simulation Method for the Generating Capacty Adequacy Evaluation of Small Stand-alone Wind Energy Conversion Systems" *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2002
- [14] X. Liu, S. Islam, "Reliability Evaluation of a Wind-Diesel Hybrid Power System with Battery Bank Using Discrete Wind Speed Frame Analysis" *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH*, Stockholm, Sweden , pp. 11-15, June 2006
- [15] Xu. Liu, S. Islam, A. Chowdhury, D.O Koval, "Reliability evaluation of a wind-diesel-battery hybrid power system" *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. ICPS 2008*
- [16] Bagen, R. Billinton, "Impact of Energy Storage on Power System Reliability Performance" *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, May 2005
- [17] R. Yokoyama, T. Niimura, N. Saito, "Modeling and Evaluation of Supply Reliability of Microgrids including PV and Wind Power" *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008
- [18] Ghaedi, Amir, and Mehrdad Mahmoudian. "Reliability Modelling of Central Receiver Power Plants." *Journal of Applied Research in Electrical Engineering*, 2025.
- [19] Ghaedi, Amir, Reza Sedaghati, and Mehrdad Mahmoudian. "Reliability modeling of different wave energy conversion technologies." *Electrical Engineering*, pp. 1-25, 2024.
- [20] Ghaedi, Amir, et al. "Reliability modeling of wave energy converters based on pelamis technology." *Electric Power Systems Research*, Vol. 227, 109977, 2024.