

مدل سازی پایایی توان الکتریکی یک قطب انرژی در شرایط بحرانی

حبیب اله اعلمی^{*۱}

۱ - استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۳/۰۸/۱۸، پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۴)

چکیده

با توسعه مبدل ها و ذخیره سازهای انرژی، موضوع قطب های انرژی چندحاملی مورد توجه قرار گرفته است. در این قطب ها، انواع صورت های انرژی مانند برق، گاز و حرارت می توانند از طریق مبدل های مربوطه به یکدیگر تبدیل شوند. با توجه به امکان جایگزینی انواع صورت های انرژی، کاهش هزینه و افزایش پایایی تأمین انرژی سامانه، مهم ترین مزیت استفاده از این قطب ها است. در این مقاله، پایایی سامانه تأمین انرژی یک قطب انرژی شامل چند بار حساس به روش زنجیره مارکوف و شبیه سازی مونت کارلو مدل می شود. در مدل پیشنهادی روشی برای مدل سازی نرخ خرابی در شرایط بحرانی ارائه می شود. مدل ارائه شده در مطالعات طراحی و ارزیابی کفایت سامانه تأمین انرژی مکان های مختلف به ویژه بارهای حساس کاربرد دارد و با استفاده از آن، ظرفیت مناسب هر یک از اجزای سامانه قابل ارزیابی است. در نهایت، نتایج شبیه سازی مدل پیشنهادی بر روی یک سامانه نمونه ارائه می شود.

کلید واژه ها: ارزیابی پایایی، سامانه چندحاملی، زنجیره مارکوف، مبدل، ذخیره ساز، منابع انرژی نو.

Modeling the Reliability of Electric Power of an Energy Hub in Critical Situation

H. Alami

Imam Hossein University

(Received: 09/11/2014; Accepted: 03/05/2015)

Abstract

With the development of energy converters and storages, the issue of multi-carrier energy hubs has been considered. At these hubs, various forms of energy such as electricity, gas and heat can be converted to one another through the converters. Given the substitution possibility of different forms of energy, reduce the cost and increase reliability of power supply system, which are the main advantage of energy hubs. In this paper, an energy hub including multiple sensitive loads is considered and reliability of its energy systems is modeled using Markov Chain and sequential Monte Carlo. In the proposed model, a method is presented for modeling failure rates in critical situations. The proposed model can be employed in planning studies to evaluate the adequacy of power supply system and using it, the appropriate capacity of each of the system components can be evaluated. Finally, simulation results of the proposed model on a test system are presented.

Keywords: Reliability Evaluation, Multi-Carrier System, Markov Chain, Converter, Storage, Renewable Resources.

* Corresponding Author E-mail: halami@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

گسترش برهم کنش و وابستگی صورت‌های مختلف انرژی به یکدیگر از حدود یک دهه پیش در ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه‌های قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است [۱]. این مطالعات عمدتاً در سطح سامانه تولید و انتقال و با بررسی تأثیر وضعیت منابع اولیه (سوخت) بر امنیت سامانه قدرت الکتریکی انجام گرفته است [۲ و ۳].

از طرف دیگر در سمت تقاضا، با پیشرفت تکنولوژی، وابستگی حامل‌های مختلف انرژی به یکدیگر افزایش پیدا کرده است. نصب منابع پراکنده تولید انرژی در نزدیکی مشترکان یکی از دلایل این وابستگی است. منابع تولید پراکنده می‌توانند از نوع انرژی نو و یا غیر تجدیدپذیر باشند. در برخی منابع انرژی نو مانند سلول‌های خورشیدی و منابع زمین گرمایی، خروجی منبع می‌تواند هم انرژی الکتریکی و هم انرژی گرمایی باشد. در مورد منابع غیر تجدیدپذیر مانند منابع تولید هم‌زمان برق و گرما (CHP)، منبع در سمت ورودی گاز و یا سوخت‌های دیگر را مصرف می‌کند و در سمت خروجی به صورت هم‌زمان برق و گرما تولید می‌کند [۴]. در کنار مبدل‌های مختلف، توسعه و استفاده از انواع ذخیره‌سازها مانند خودروهای برقی، روز به روز در حال گسترش است. با گسترش منابع تولید پراکنده، مبدل‌ها و ذخیره‌سازها در نزدیکی مشترکان، دیگر بررسی مستقل حامل‌های مختلف انرژی در مطالعات مناسب نیست و نیاز به بررسی برهم کنش میان صورت‌های مختلف انرژی و تأثیر آن بر شاخص‌های اقتصادی و قابلیت اطمینان است.

علاوه بر آن، توسعه مبدل‌های انرژی و وابستگی صورت‌های مختلف انرژی به یکدیگر، طرح ایده قطب‌های انرژی^۱ را به دنبال داشت [۵]. یک قطب انرژی، یک سامانه یکپارچه متشکل از چند واحد است که در آن، ذخیره‌سازی انرژی و تبدیل انرژی میان حامل‌های مختلف انرژی ممکن است [۶]. در واقع قطب انرژی واسطه‌ای میان حامل‌های مختلف انرژی مثل برق، گاز و حرارت در ورودی و بارهای مختلف انرژی در خروجی است.

در یک قطب انرژی واحدهایی مثل تولید هم‌زمان برق و حرارت، کمپرسورها، ترانسفورماتورها، باتری‌ها، مبدل‌های گرمایی و مانند آن وجود دارند.

مزایای یک قطب انرژی شامل موارد زیر است:

✓ افزایش قابلیت اطمینان: از آنجا که تأمین بار فقط به تغذیه از یک شبکه وابسته نیست. بنابراین در صورت قطعی یکی از زیرساخت‌های انرژی امکان تأمین بار از طریق سایر زیرساخت‌های انرژی وجود دارد و بنابراین استفاده از این تجهیزات برای تأمین بارهای حساس مانند مراکز نظامی - به عنوان یکی از روش‌های پدافند نوین - ضروری است.

✓ کاهش هزینه‌های بهره‌برداری: با توجه به اینکه امکان تبدیل انرژی از یک شکل به شکل دیگر در این واحدها و همچنین امکان ذخیره انرژی میسر است می‌توان بهره‌برداری از شبکه را به گونه‌ای انجام داد که هزینه‌ها کمینه شود.

مطالعات بسیاری در زمینه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری قطب‌های انرژی ارائه شده است [۷-۹]. همچنین، در مراجع [۱۰-۱۲] روشی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه‌های انرژی چندحاملی^۲ ارائه شده است. در مطالعات ارزیابی سامانه‌های انرژی معمولاً نرخ خرابی تجهیزات بر اساس داده‌های آماری تخمین زده می‌شود و براساس آن کفایت و امنیت سامانه در شرایط عادی ارزیابی می‌گردد [۱۲]. این در حالی است که نیاز به بررسی و ارزیابی پایایی^۳ سامانه‌های تأمین انرژی در شرایط بحرانی اهمیت بسیاری دارد. در این مقاله روشی برای مدل کردن پایایی سامانه انرژی چند حاملی با در نظر گرفتن امکان وقوع شرایط بحرانی ارائه می‌شود. مدل زنجیره مارکوف^۴ کارایی مناسبی در ارزیابی پایایی سامانه‌های مهندسی دارد و در این مقاله نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به شرایط بحرانی امکان خرابی هم‌زمان چند تجهیز در مدل ارائه شده در نظر گرفته می‌شود. همچنین، با توجه به کمبود اطلاعات مربوط به نرخ خرابی در شرایط بحرانی، روشی برای مدل کردن نرخ خرابی تجهیزات با در نظر گرفتن شرایط بحرانی ارائه می‌شود. نتایج انجام مطالعات عددی بر روی یک شبکه نمونه بیانگر کارایی مدل پیشنهادی است.

سایر بخش‌های مقاله به این صورت سازماندهی شده‌اند که در بخش دوم قطب انرژی و اجزای آن مدل می‌شود. در بخش سوم مدل زنجیره مارکوف و نحوه استفاده از آن در مطالعات ارزیابی قابلیت اطمینان شرح داده می‌شود. در بخش چهارم روش پیشنهادی برای ارزیابی پایایی تأمین انرژی بارهای حساس با در نظر گرفتن شرایط بحرانی شبیه‌سازی و نتایج مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در نهایت در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. مدل کردن قطب انرژی و اجزای آن

مراجع زیادی به ارائه مدلی برای یک قطب انرژی پرداخته‌اند. در مطالعات بهره‌برداری عمدتاً هدف از حل مسئله آنست که تعیین شود در یک قطب انرژی از هر یک از ورودی‌های انرژی چقدر انرژی مصرف شود و همچنین درون قطب چگونه صورت‌های مختلف انرژی به یکدیگر تبدیل شوند [۹]. در مطالعات برنامه‌ریزی علاوه بر آنکه سهم هر یک از حامل‌های ورودی مشخص می‌شود باید به صورت هم‌زمان ظرفیت منابع و مبدل‌های مختلف نیز تعیین شود [۱۲]. برای این منظور، فرض شود که شکل (۱) یک سامانه قطب انرژی به عنوان واسطه‌ای میان چند حامل ورودی انرژی و چند حامل انرژی خروجی - که همان بارهای سامانه هستند - را نشان می‌دهد. از یک ماتریس مطابق شکل (۲) برای مدل کردن این سامانه استفاده می‌شود [۵، ۶ و ۹].

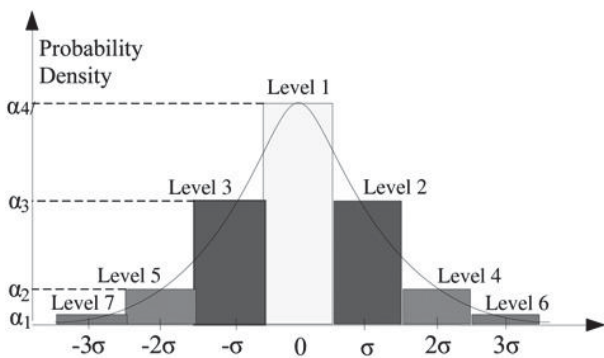
² Multi-Carrier Energy Hubs

³ Reliability

⁴ Markov Chain

¹ Energy Hub

استفاده از منابع انرژی ترکیبی^۱ از قبیل منابع تولید پراکنده سنتی، منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر بادی و خورشیدی می‌باشد [۱۴]. زیرا این منابع دارای ابعاد کوچک بوده و از پراکندگی و تفرقه ذاتی برخوردارند. بنابراین حمله دشمن به آن‌ها با دشواری زیادی مواجه است. علاوه بر این، از دیدگاه پایایی سامانه استفاده از منابع انرژی نو این مزیت را دارد که در صورت قطعی همه منابع انرژی ورودی به قطب، انرژی تأمینی از طریق عوامل طبیعی مانند باد، خورشید و گرمای زمین در همان محل فراهم می‌شود. منابع مختلف انرژی نو شامل باد، تابش خورشید، زمین گرمایی، جریان آب، موج دریا، زیست توده و غیره است. ادوات مربوط به برخی از این منابع مانند توربین بادی و سلول خورشیدی در مقابل تهدیدهای نظامی بیشتر آسیب‌پذیر خواهند بود ولی ممکن است در هنگام وقوع بلایای طبیعی به خوبی مقاومت نمایند. در مقابل، برخی دیگر از منابع مانند زمین گرمایی با توجه به نحوه اختفا و استحکامات آن‌ها در مقابل تهدیدهای نظامی نیز مقاوم خواهند بود. مهم‌ترین مشکل منابع انرژی نو عدم قطعیت در میزان تولید آن‌ها است که باید در مطالعات پایایی توسط تابع‌های توزیع مربوط آن‌ها لحاظ شود. معمولاً از توزیع‌های نرمال و یا ویبال برای تولید سناریوهای مختلف در مورد میزان تولیدی انرژی این منابع استفاده می‌شود. در این مقاله فرض می‌شود برای میزان تولید هر یک از منابع در هر ساعت یک اندازه توان پیش‌بینی شود. میزان اختلاف توان از مقدار پیش‌بینی شده که تابع توزیع احتمال آن‌ها از توزیع نرمال یا گوسی تبعیت می‌کند، مدل می‌شود [۱۵]. شکل (۳) نشان می‌دهد که در این تحقیق میزان نهایی تولید توان منابع تجدیدپذیر یکسان نبوده و بخاطر عدم قطعیت تولید این منابع، برای تعیین مقدار تولید آن‌ها از توابع احتمالاتی استفاده شده است



شکل ۳. نحوه مدل میزان اختلاف تولید انرژی منابع انرژی نو با مقدار پیش‌بینی شده

۳-۲. ذخیره‌سازها

در صورت قطع شدن همه منابع انرژی و بروز کمبود انرژی، تأمین انرژی بارها با استفاده از انرژی ذخیره‌سازها ممکن می‌شود. با توجه به امکان اختفا و استحکام مناسب ذخیره‌سازها در هنگام حملات نظامی



شکل ۱. مدل‌سازی قطب انرژی به عنوان واسطه‌ای میان چند حامل ورودی انرژی و بارهای سامانه

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_{\alpha} \\ L_{\beta} \\ \vdots \\ L_{\omega} \end{bmatrix}}_{\mathbf{L}} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_{\alpha\alpha} & c_{\beta\alpha} & \dots & c_{\omega\alpha} \\ c_{\alpha\beta} & c_{\beta\beta} & \dots & c_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{\alpha\omega} & c_{\beta\omega} & \dots & c_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} P_{\alpha} \\ P_{\beta} \\ \vdots \\ P_{\omega} \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}}$$

شکل ۲. مدل‌سازی قطب‌های انرژی توسط ماتریس ورودی خروجی

هر درایه این ماتریس بیان می‌کند که یک بار (مثلاً حرارت) به چه نسبت از هر یک از ورودی‌ها تأمین می‌شود. اگر یک بار فقط از یکی از ورودی‌های انرژی تأمین شود آنگاه در سطر متناظر با آن بار فقط یک درایه غیر صفر وجود دارد که آن درایه برابر با راندمان سامانه خواهد بود.

در این مسئله بهینه‌سازی، بارها ثابت فرض می‌شوند و متغیرهای مسئله، درایه‌های ماتریس و اندازه هر حامل ورودی انرژی است که باید تعیین شود. در ادامه هر یک از اجزای قطب انرژی و نحوه مدل‌سازی آن‌ها در ارزیابی پایایی سامانه شرح داده می‌شود.

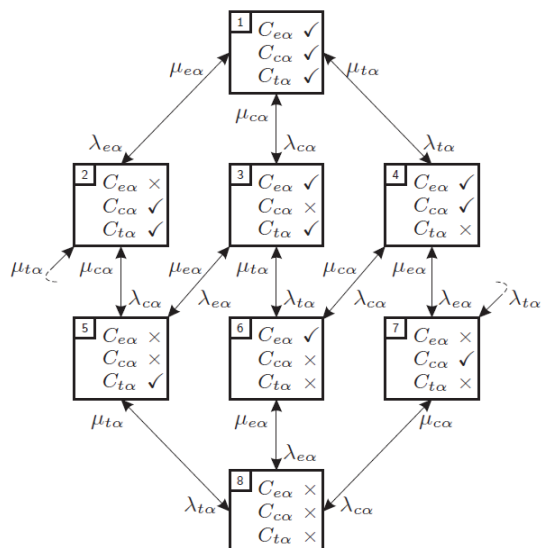
۱-۲. مبدل‌ها

همان‌گونه که گفته شد توسط مبدل‌ها انواع صورت‌های انرژی به یکدیگر تبدیل می‌شوند. استفاده از مبدل‌ها امکان تأمین انرژی در هنگام قطعی یکی از حامل‌های انرژی را از طریق سایر صورت‌های انرژی ممکن می‌کند. مبدل‌ها ممکن است مانند منبع تولید هم‌زمان برق و گرما یک ورودی و چند خروجی داشته باشند و یا مانند یک دیزل ژنراتور که هم با گاز و هم با گازوییل کار می‌کند، چند ورودی و یک خروجی داشته باشند. در مدل قابلیت اطمینان این مبدل‌ها ظرفیت و بازدهی آن‌ها مورد توجه است.

۲-۲. منابع انرژی نو

پدافند غیرعامل شامل طرح‌ریزی‌ها و اقداماتی است که موجب کاهش آسیب‌پذیری، افزایش پایداری، تداوم فعالیت دستگاه‌ها و نهادهای نظام در مقابل تهدیدات خارجی گردیده و مستلزم به‌کارگیری سلاح نباشد. دفاع غیرعامل شامل اعلام خبر، استتار، اختفاء، تفرقه، پراکندگی، اجرای استحکامات، فریب و کنترل خسارت می‌باشد [۱۳]. یکی از اقداماتی که به آن وسیله می‌توان سامانه‌های تأمین انرژی مراکز حساس نظامی را در مقابل حملات دشمن محافظت کرد،

^۱ Hybrid Energy Resources



شکل ۶. فضای حالت سامانه بر مبنای خرابی تجهیزات

با توجه به ساختار شبکه، میزان تقاضای بار و ظرفیت تجهیزات، حالت‌هایی که در آن تقاضای بار تأمین می‌شود به عنوان موفقیت و حالت‌هایی که تقاضای بار تأمین نمی‌شود به عنوان شکست مشخص می‌گردد و به این ترتیب احتمال شکست و موفقیت مشخص می‌شود.

همچنین علاوه بر مدل کردن خرابی تجهیزات در محاسبات قابلیت اطمینان، از زنجیره مارکوف برای مدل کردن رفتار سایر سامانه‌ها نیز استفاده می‌شود. در صورتی که نرخ وقوع حوادث بحرانی (مثلاً تهدید نظامی، سیل و زلزله) و نرخ برطرف شدن این حوادث مشخص باشد می‌توان فضای حالت را به صورت شکل (۷) رسم کرد و احتمال هر حالت را تعیین کرد. در ادامه نحوه مدل کردن و تعیین احتمالات در روش زنجیره مارکوف طبق مرجع [۱۶] شرح داده می‌شود.

در مدل زنجیره مارکوف معمولاً فرض می‌شود که دو اتفاق به صورت دقیقاً هم‌زمان اتفاق نمی‌افتد، بنابراین گذر فقط بین حالت‌هایی از فضای حالت که فقط یک اختلاف دارند در نظر گرفته می‌شود. اگر نرخ گذر از حالت s_i به حالت s_j با نرخ ثابت λ_{ij} نشان داده شود، تابع توزیع احتمال خروج از s_i به s_j در زمان t به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$f_{s_i \rightarrow s_j}(t) = \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} \tag{4}$$

بر اساس بسط تیلور این رابطه، اثبات می‌شود که وقتی یک سامانه در حالت s_i است، احتمال گذر از s_i به s_j که با نماد $(P_{s_i \rightarrow s_j})$ نشان داده می‌شود، بعد از یک مدت زمان خیلی کوچک Δt از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$P_{s_i \rightarrow s_j}(\Delta t) = \lambda_{ij} \Delta t \tag{5}$$

جایگزین مناسبی برای تأمین انرژی خواهند بود. مهم‌ترین عیب ذخیره‌سازها محدود بودن ظرفیت انرژی آن‌ها است که در صورت تداوم قطعی سایر منابع تأمین انرژی نمود، پیدا می‌کند. اگر P_C توان ذخیره‌ساز، P_D توان مصرفی بار و E انرژی تولیدی ذخیره‌ساز باشد در آن صورت قیدهای مربوط به محدودیت انرژی و محدودیت توان این منابع به صورت زیر مدل می‌شود.

$$0 \leq P_C(t) \leq P_{Cmax} \tag{1}$$

$$0 \leq P_D(t) \leq P_{Dmax} \tag{2}$$

$$0 \leq E(t) \leq E_{Max} \tag{3}$$

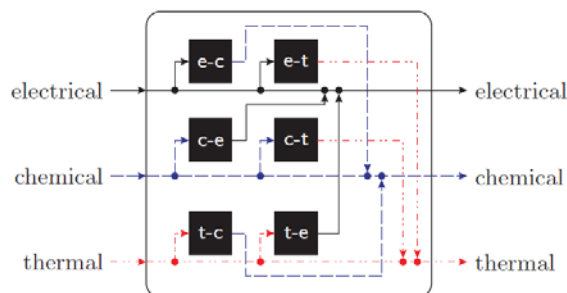
۳. روش پیشنهادی برای ارزیابی قابلیت اطمینان، شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

برای حل مسئله بیان شده در این مقاله از مدل زنجیره مارکوف در دو سطح استفاده می‌شود. یک بار برای مدل کردن فضای حالت شرایط سامانه (شامل شرایط عادی، تهدید نظامی، سیل و ...) و بار دیگر برای مدل کردن فضای حالت خرابی تجهیزات. بنابراین در ادامه نحوه مدل کردن به روش زنجیره مارکوف بیان می‌شود. علاوه بر این، با توجه به پیچیدگی مسئله، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو ترتیبی^۱ در کنار مدل مارکوف برای ارزیابی پایایی سامانه استفاده می‌شود.

۳-۱. مدل زنجیره مارکوف

در مطالعات بسیاری از روش مارکوف برای ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه استفاده شده است. در این مطالعات ابتدا فضای حالت سامانه را با توجه به حالات سالم و یا خراب بودن هر تجهیز سامانه (مثلاً ژنراتور) رسم می‌شود، سپس بر مبنای نرخ خرابی و تعمیر هر تجهیز، احتمال هر حالت تعیین می‌شود.

شکل (۶) نمودار فضای حالت مارکوف را برای ارزیابی قابلیت اطمینان بار الکتریکی سامانه شکل (۵) نشان می‌دهد. بر اساس نرخ گذر بین حالت‌ها احتمال هر حالت تعیین می‌شود.



شکل ۵. ساختمان یک قطب انرژی و مبدل‌های درون آن

¹ Sequential Monte Carlo Simulation

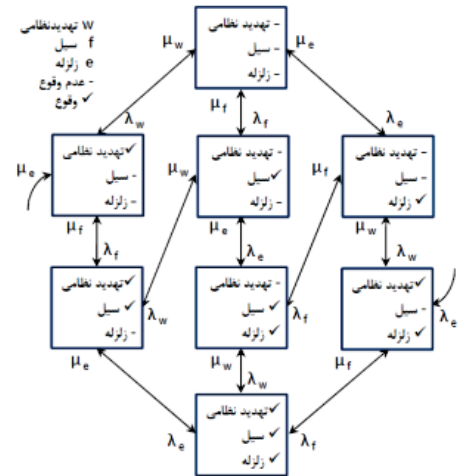
مطالعه سامانه‌هایی که در آن تعداد زیادی متغیر با درجه آزادی های دو به دو مرتبط وجود دارد مفید است.

۳-۳. ویژگی ارزیابی پایایی سامانه انرژی چند حاملی در شرایط بحرانی

در یک سامانه چند حاملی انرژی مبدل‌های انرژی (مانند دیزل ژنراتور، منبع تولید هم‌زمان برق و گرما، هیتر و بویلر)، ذخیره‌سازها و منابع انرژی تجدیدپذیر وجود دارد که از طریق آن‌ها توانایی تبدیل حامل‌های مختلف انرژی به یکدیگر وجود دارد. بنابراین استفاده از سامانه‌های چندحاملی با مزیت افزایش امنیت و قابلیت اطمینان تأمین انرژی بارها همراه خواهد بود. دلیل این امر آن است که در این سامانه‌ها بارها فقط به یک حامل انرژی وابسته نیستند و بنابراین با قطع یکی از حامل‌های انرژی امکان تأمین انرژی بارها از طریق سایر حامل‌ها وجود دارد. همچنین همان‌گونه که گفته شد امکان استفاده از منابع انرژی نو و ذخیره‌ساز در سامانه‌های چند حاملی نیز منجر به افزایش امنیت تأمین انرژی می‌شود.

نگاهی که در این مقاله نسبت به مدل‌سازی پایایی سامانه وجود دارد ارزیابی کفایت سامانه که کاربرد آن در طراحی سامانه است، می‌باشد. برای ارزیابی کفایت سامانه چند شاخص تعریف می‌شود و بر مبنای آن‌ها ظرفیت تجهیزات سامانه باید به گونه‌ای تعیین گردد که این شاخص‌ها از حد معین کمتر نباشند. در طراحی یک سامانه انرژی به ویژه در حضور بارهای حساس، نیاز است تا علاوه بر در نظر گرفتن شرایط عادی، اصول پدافند غیرعامل برای حفظ شریان حیاتی انرژی در شرایط بحرانی در نظر گرفته شوند [۱۸]. برای آنکه امکان وقوع شرایط بحرانی و تأثیر آن بر خرابی تجهیزات در مطالعات ارزیابی دیده شود، نیاز است تا تفاوت مدل‌سازی در شرایط عادی با مدل‌سازی در شرایط بحرانی شامل تهدیدهای نظامی و طبیعی بررسی شود.

در مطالعات ارزیابی پایایی سامانه معمولاً برای هر یک از تجهیزات یک نرخ خرابی و یک نرخ تعمیر در نظر می‌گیرند و فرض می‌شود که وضعیت هر تجهیز از سایر تجهیزات مستقل است. با توجه به مستقل بودن وضعیت تجهیزات، امکان وقوع خرابی دو تجهیز به صورت هم‌زمان برابر با ضرب احتمال خرابی هر یک از آن‌ها بوده و یک عدد بسیار کوچک می‌شود. این در حالی است که در شرایط بحرانی مانند سیل، زلزله، طوفان و تهدیدهای نظامی، امکان وقوع خرابی در برخی از اجزا سامانه به صورت هم‌زمان افزایش می‌یابد. به بیان دیگر اگرچه خرابی تجهیزات مستقل هستند ولی چون نرخ خرابی آن‌ها در شرایط بحرانی نسبت شرایط عادی بسیار بیشتر است احتمال خرابی هم‌زمان آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. مدل کردن این امر نسبت به در نظر گرفتن مستقل خرابی‌ها در شرایط عادی، به نتایج متفاوت در مطالعات ارزیابی کفایت سامانه منجر می‌شود. ممکن است سامانه با خروج دو جزء به صورت غیر هم‌زمان دچار خاموشی نشود ولی احتمال خاموشی در خروج هم‌زمان همان اجزا به مراتب بیشتر است. در ادامه نحوه مدل کردن تأثیر شرایط بحرانی بر نرخ وقوع خرابی تجهیزات شرح داده می‌شود.



شکل ۷. فضای حالت سامانه بر مبنای وقوع حوادث بحرانی

بنابراین اگر یک سامانه m حالت داشته باشد، احتمال ماندن در حالت i بعد از مدت زمان Δt از رابطه (۶) تعیین می‌شود:

$$P_{si \rightarrow sj}(\Delta t) = 1 - \sum_{s=1, s \neq i}^m \lambda_{is} \Delta t \quad (6)$$

به همین صورت احتمال‌های مربوط به گذر بین هر یک از حالات سامانه از ماتریس رابطه (۷) تعیین می‌شود:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 - \sum_{s=2}^m \lambda_{1s} \Delta t & \lambda_{12} \Delta t & \dots & \lambda_{1m} \Delta t \\ \lambda_{21} \Delta t & 1 - \sum_{s=1, s \neq 2}^m \lambda_{2s} \Delta t & \dots & \lambda_{2m} \Delta t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{m1} \Delta t & \lambda_{m2} \Delta t & \dots & 1 - \sum_{s=1}^{m-1} \lambda_{ms} \Delta t \end{bmatrix} \quad (7)$$

بنابراین اگر در زمان t احتمال بودن سامانه در حالت k برابر با P_k^t باشد، پس از مدت زمان Δt احتمال بودن سامانه در حالت k از رابطه (۸) تعیین می‌شود:

$$[P_1^{t+\Delta t} \ P_2^{t+\Delta t} \ \dots \ P_m^{t+\Delta t}] = [P_1^t \ P_2^t \ \dots \ P_m^t] \mathbf{T} \quad (8)$$

۳-۲. مدل مونت کارلو

روش مونت-کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. روش‌های مونت-کارلو معمولاً برای شبیه‌سازی سامانه‌های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی استفاده می‌شوند. از طرف دیگر روش مونت کارلو یک طبقه از الگوریتم‌های محاسبه‌گر می‌باشد که برای محاسبه نتایج خود بر نمونه‌گیری‌های تکرار شونده تصادفی اتکاء می‌کنند. روش‌های مونت کارلو به دلیل اتکاء بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی یا تصادفی کاذب، اغلب به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که توسط رایانه اجرا شوند. گرایش به استفاده از روش‌های مونت کارلو زمانی بیشتر می‌شود که محاسبه پاسخ دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا ناموجه باشد [۱۷]. روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو به ویژه در

۳-۴. مدل کردن تأثیر شرایط بحرانی بر نرخ خرابی تجهیزات

معمولاً نرخ خرابی هر یک از تجهیزات بر اساس داده‌های آماری مربوط به آن تجهیز در گذر زمان تعیین می‌شود که معمولاً داده‌های کافی برای این کار وجود نداشته و تخمین نرخ خرابی با روش‌های داده کاوی انجام می‌شود. در مدل کردن نرخ خرابی تجهیزات معمولاً شرایط بحرانی در نظر گرفته نمی‌شود. حتی در استاندارد IEEE ۱۳۶۶ صراحتاً بیان می‌کند که وقایع صورت گرفته در روزهای بحرانی در شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه نگردند [۱۹]. حتی چنانچه از داده‌های تاریخی مربوط به وقوع شرایط بحرانی در تعیین نرخ خرابی تجهیزات استفاده شده باشد، باز هم همان‌گونه که گفته شد عدم در نظر گرفتن هم زمانی وقوع خرابی‌ها می‌تواند به نتایج متفاوت منجر شود. به عنوان مثال فرض شود وقوع دو روز متوالی سیل در طول ده سال منجر به خروج دو تجهیز از یک سامانه شود و این حادثه در محاسبه نرخ خرابی و تعمیر هر یک از آن تجهیزات لحاظ گردد. از آنجا که در مطالعات پایایی سامانه عملکرد تجهیزات به صورت مستقل بررسی می‌شود احتمال خرابی این دو تجهیز به صورت هم‌زمان بسیار کوچک و نتایج ارزیابی پایایی سامانه نسبت به حالت واقعی کاملاً متفاوت خواهد بود. برای مدل کردن نرخ خرابی تجهیزات با در نظر گرفتن شرایط بحرانی شامل تهدیدهای نظامی و طبیعی، اکثر اوقات داده‌های تاریخی کافی وجود نخواهد داشت. این در حالی هست که داده‌های مربوط به زمان وقوع خود حوادث و زمان برطرف شدن آن‌ها معمولاً به راحتی قابل دسترسی است. بر این اساس، در این مقاله روش جدیدی برای مدل کردن نرخ خرابی تجهیزات با در نظر گرفتن شرایط بحرانی پیشنهاد می‌شود که در صورت کمبود اطلاعات نیز کاربردی خواهد بود و بر اساس آن امکان وقوع هم‌زمان دو خرابی به خوبی مدل می‌شود. در این روش ابتدا با توجه به داده‌های موجود از سوابق تاریخی، نرخ وقوع و نرخ برطرف شدن هر یک از حوادث طبیعی یا تهدیدهای نظامی تعیین می‌شود. سپس با توجه به نبود داده‌های کمی، از نظر کارشناسان خبره استفاده می‌شود و با در نظر گرفتن معیارهای پدافند غیرعامل (شامل اعلام خبر، استتار، اختفا، تفرقه، پراکندگی، استحکامات، فریب، کنترل خسارت) برای هر یک از تجهیزات سامانه به ازای هر یک از انواع حوادث طبیعی یک نرخ خرابی و تعمیر اختصاص داده می‌شود. جدول (۱) به عنوان یک مثال درک جزئیات روش انجام کار را ساده‌تر می‌کند. در این جدول دو ستون نرخ وقوع حوادث و نرخ برطرف شدن آن‌ها براساس اطلاعات تاریخی تعیین می‌شود. همچنین به ازای شرایط عادی، نرخ خرابی و تعمیر هر تجهیز با استفاده از اطلاعات تاریخی و روش‌های داده کاوی تعیین می‌گردد [۲۰]. سپس با استفاده از نظر کارشناس خبره، نرخ خرابی و تعمیر هر تجهیز در صورت بروز هر حادثه به روش تحلیلی سلسله مراتبی^۱ (AHP) و با در نظر گرفتن معیارهای پدافند غیرعامل تعیین می‌شود. بنابراین تعیین نرخ خرابی مربوط به هر یک از شرایط بحرانی بر اساس اطلاعات تاریخی در عمل ممکن نیست. اما با توجه به اطلاعات تاریخی تعیین نرخ وقوع و برطرف شدن هر یک از حوادث بحرانی شامل تهدید نظامی، سیل، زلزله، طوفان و غیره به راحتی قابل تعیین است.

۳-۵. مراحل انجام روش پیشنهادی

۱- زنجیره مارکوف حالات مختلف شرایط سامانه شامل شرایط عادی و یا تهدیدهای نظامی و طبیعی تشکیل شود و بر اساس نرخ وقوع و برطرف شدن هر یک از حوادث نرخ گذر بین حالت‌های مختلف و احتمال هر حالت تعیین گردد.

۲- با توجه در دسترس بودن یا نبودن عناصر سامانه (به جز منابع انرژی نو) شامل شبکه برق و گاز، مبدل‌های سنتی و ذخیره سازها زنجیره مارکوف آرایش مختلف تجهیزات شبکه تشکیل شود.

توجه شود که نرخ خرابی و تعمیر تجهیزات بستگی به شرایط سامانه متفاوت است و بنابراین نرخ گذر بین حالات مارکوف در این مرحله مشخص نیست.

۳- برای منابع انرژی نو چند سناریو تشکیل شود و احتمال هر کدام محاسبه شود.

۴- شروع از یک حالت سامانه (معمولاً سامانه در شرایط عادی و همه تجهیزات سالم) در ساعت اول و تعیین حالت سامانه و تجهیزات در ساعت بعد بر اساس نرخ گذر بین حالت‌ها. برای هر ساعت با توجه به وضعیت خرابی و سالم بودن تجهیزات و همچنین تعیین میزان تولید منابع تولید پراکنده به صورت تصادفی، میزان توان در دسترس در آن ساعت مشخص می‌شود و در صورت عدم تأمین هر یک از بارها با هر حساسیتی، میزان قطعی بارها در شاخص‌های پایایی شامل مدت زمان قطعی^۲ (LOLE) هر یک از بارها و میزان مورد انتظار انرژی تأمین نشده^۳ (EENS) سامانه محاسبه می‌گردد.

۵- تکرار مرحله سوم به ازای ساعت‌های بعدی و انجام این برای یک مدت زمان طولانی.

۳-۶. شبیه‌سازی و نتایج عددی

برای محک زنی مدل پیشنهادی نتایج شبیه‌سازی بر روی یک شبکه نمونه در این بخش ارائه می‌شود. در شبکه نمونه مطابق شکل (۸) سه مرکز مصرف وجود دارد که تقاضای برق آنها می‌تواند از طریق شبکه سراسری برق، توربین بادی، سلول خورشیدی، ذخیره ساز انرژی الکتریکی (باتری) و یا از طریق دیزل ژنراتور تأمین شود. سوخت مورد نیاز برای تغذیه دیزل ژنراتور از طریق شبکه گاز و یا مخزن ذخیره ساز سوخت تأمین می‌گردد. داده‌های مربوط به نرخ خرابی و تعمیر این تجهیزات در جدول (۱) و داده‌های مربوط به ظرفیت در جدول (۳) آورده شده است. در این شبکه بارها از نظر الویت تأمین به سه دسته بارهای با حساسیت بالا، حساسیت متوسط و حساسیت کم تقسیم می‌شوند. جدول (۲) میزان تقاضای مراکز مصرف و سهم بارهای با حساسیت بالا، متوسط و کم را در هر یک نشان می‌دهد. بر طبق توضیحات بیان شده ابتدا فضای حالت زنجیره مارکوف برای بیان شرایط مختلف سامانه شامل شرایط عادی و بحرانی تشکیل می‌شود.

² Loss of Load Expectation

³ Expected Energy Not Supplied

¹ Analytical Hierarchy Process

جدول ۱. داده های مربوط به نرخ وقوع و نرخ برطرف شدن حوادث و همچنین نرخ خرابی و تعمیر مربوط به تجهیزات به ازای وقوع هر حادثه [۲۰]

احتمال وقوع خرابی هر تجهیز در صورت رخداد حادثه												حوادث بحرانی			
شبکه سراسری برق		شبکه سراسری گاز		مبدل های سنتی (ژنراتور)		سلول خورشیدی		توربین بادی		ذخیره ساز گازوییل		نوع حادثه			
μ	λ	μ	λ	μ	λ	μ	λ	μ	λ	μ	λ	μ	λ		
۱۴۶۰	۱۲	۷۳۰	۳	۱۴۶۰	۳	۳۶۵	۱	۱۸۲	۵	۳۶۵	۰/۵	-	-	شرایط عادی	
۷۳	۱۴۶	۱۸۲	۱۲	۳۶	۱۲	۳۶	۷۳	۲۴	۱۸۲	۳۶	۶	۷۳	۰/۱۵	تهدید نظامی	
۳۶۵	۷۳	۱۸۲	۲۴	۲۹۲	۳	۷۳	۱۲	۷۳	۱۲	۱۴۶	۱	۱۸۲	۰/۱۵	سیل	
۳۶۵	۷۳	۱۴۶	۱۴۶	۳۶	۳۶	۷۳	۱۲	۷۳	۲۴	۲۴	۳۶	۷۳۰	۰/۰۴	زلزله	
۷۳	۱۴۶	۲۹۲	۲	۱۴۶	۳	۳۶	۱۲	۱۲	۷۳	۱۴۶	۱	۳۶۵	۰/۲	طوفان	
۷۳۰	۲۴	۱۸۲	۶	۱۴۶	۱۴	۱۴۶	۲۴	۱۴۶	۲۴	۷۳	۱۲	۱۴۶۰	۰/۲	سایر مخاطرات	

همان گونه که از نتایج عددی مشخص است افزودن این ذخیره ساز اگر چه تا حدی به بهبود شاخص ها انجامیده اما تأثیر شگرفی بر این شاخص ها نداشته است. به همین ترتیب، با افزودن توربین بادی و سلول خورشیدی در مراحل چهارم و پنجم شاخص LOLE، ۷۸ و ۴۴ ساعت شده و شاخص ENS، ۸۲۴۹ و ۳۶۸۴ کیلووات ساعت شده اند.

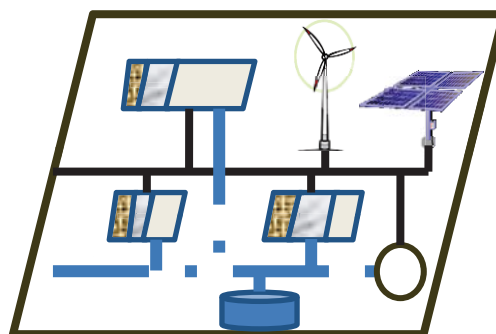
جدول (۵) فضای حالت شرایط مختلف سامانه را نشان می دهد. احتمال این حالات به دو روش تحلیلی و شبیه سازی مونت کارلو به دست آمده که مشاهده می شود شبیه سازی مونت کارلو با تقریب مناسبی عمل کرده است. نکته قابل توجه از حل شبیه سازی عددی آنست که با آنکه احتمال وقوع شرایط بحرانی بسیار کوچک بوده ولی سهم احتمال در قطعی سامانه قابل توجه است. به عنوان نمونه با آنکه احتمال وقوع تهدید نظامی برابر با ۰/۰۰۲ است ولی سهم آن در مقدار LOLE مرحله پنجم ۱۱ ساعت از ۴۴ ساعت و در LOLE مرحله اول ۱۷ بار از ۸۴ بوده است.

جدول ۲. داده های مربوط به تقاضای بارها (kW) بر مبنای حساسیت هر یک از آن ها

حساسیت کم	حساسیت متوسط	حساسیت بالا	
۲۱۰	۷۵	۳۰	بار ۱
۹۰	۵۰	۴۰	بار ۲
۸۰	۱۰۰	۷۵	بار ۳
۳۸۰	۲۲۵	۱۴۵	جمع

جدول ۳. داده های مربوط به ظرفیت تجهیزات سامانه

ظرفیت	تجهیز
۳۰۰۰ kWh	ذخیره ساز گازوییل
۲۰۰ kW	توربین بادی
۲۰۰ kW	سلول خورشیدی
۵۰۰ kW	ژنراتور
۱۰۰۰ kW	شبکه سراسری گاز
۱۰۰۰ kW	شبکه سراسری برق



شکل ۸. شبکه نمونه شامل سه بار

با توجه به در نظر گرفتن ۵ تهدید بر طبق جدول (۱)، ۳۲ حالت وجود دارد. برای حالت هایی که در آن ها یک یا دو حادثه مثلاً تهدید نظامی و سیل همزمان رخ می دهد، نرخ خرابی تجهیزات مربوط به آن حوادث با هم جمع شده و نرخ تعمیر تجهیزات برابر با کمترین مقدار آن دو در نظر گرفته می شود. همچنین فضای حالت سامانه بر اساس آرایش سالم بودن و یا خرابی تجهیزات رسم می شود که در این شبکه با توجه به وجود ۶ تجهیز، ۶۴ آرایش وجود دارد. روش شبیه سازی مونت کارلو به ازای یک بازه ۱۲۰ ساله اجرا می شود و شاخص های پایایی سامانه (LOLE و ENS) تعیین می شود. نتایج در جدول (۴) به صورت گرد شده نشان داده شده است. شاخص ها به ازای بارهای با حساسیت های مختلف به تفکیک بیان شده اند. در مرحله اول از شبیه سازی فرض می شود که تقاضای الکتریکی بارها فقط از طریق شبکه سراسری برق تأمین می شود. در این سناریو با هر قطعی همه بارهای قطع خواهند شد و بنابراین همان گونه که مشاهده می شود LOLE برای انواع بارها با حساسیت های مختلف یکسان و برابر ۸۴ ساعت در سال است. در مرحله دوم یک ژنراتور به سامانه اضافه می شود تا در هنگام قطعی بار از طریق شبکه گاز میزان تقاضای برق تا ظرفیت ۵۰۰ کیلووات را تأمین کند. در این حالت شاخص های سامانه به مقدار ۸۱ ساعت و ۲۰۲۳۶ کیلووات ساعت کاهش پیدا کرده اند. در مرحله سوم یک ذخیره ساز گازوییل به سامانه اضافه می شود تا در صورت قطعی شبکه برق و گاز، سوخت ژنراتور از این طریق تأمین شود.

¹ Energy Not Supplied

جدول ۴. نتایج حاصل از شبیه سازی (LOLE بر مبنای ساعت و ENS بر مبنای کیلووات ساعت)

مرحله اول:		مرحله دوم:		مرحله سوم:		مرحله چهارم:		مرحله پنجم:		
فقط شبکه برق		افزودن ژنراتور و گاز		افزودن ذخیره ساز		افزودن توربین بادی		افزودن سلول خورشیدی		
ENS	LOLE	ENS	LOLE	ENS	LOLE	ENS	LOLE	ENS	LOLE	
۱۲۱۶۹	۸۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	بار ۱
۱۸۸۸۳	۸۴	۹۱	۱	۱۰۵	۱	۶۳	۱	۰	۰	بار ۲
۳۱۸۹۱	۸۴	۲۰۱۴۵	۸۰	۱۹۸۸۶	۷۹	۸۰۷۵	۷۸	۳۶۸۴	۴۴	بار ۳
۶۲۹۴۳	۸۴	۲۰۲۳۶	۸۱	۱۹۹۹۱	۸۰	۸۲۴۹	۷۸	۳۶۸۴	۴۴	جمع

جدول ۵. شرایط مختلف سامانه و احتمال وقوع هر یک از حالت ها (۱: وقوع، ۰: عدم وقوع)

حالت	سایر	طوفان	زلزله	سیل	تهدید نظامی	احتمال (تحلیلی)	احتمال (مونت کارلو)
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹۹۶۳۹۰۴۴	۰/۹۹۶۴۳۲۶۴
۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۲۰۴۷۳۸	۰/۰۰۲۰۹۰۹۴
۳	۰	۱	۰	۰	۰	۰/۰۰۰۸۲۱۲۰	۰/۰۰۰۷۵۵۳۳
۴	۰	۰	۱	۰	۰	۰/۰۰۰۰۵۴۶۰	۰/۰۰۰۰۵۵۱۷
۵	۰	۰	۰	۱	۰	۰/۰۰۰۵۴۵۹۷	۰/۰۰۰۵۳۰۸۲
۶	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۰۰۰۱۳۶۴۹	۰/۰۰۰۱۳۳۱۸
۷	۱	۱	۰	۰	۰	۰/۰۰۰۰۰۱۶۹	۰/۰۰۰۰۰۱۹۰
۸	۱	۰	۱	۰	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۱۱	۰
۹	۱	۰	۰	۱	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۴	۰
۱۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۱۱۲	۰
۱۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۴۵	۰
۱۲	۰	۱	۰	۱	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۳	۰
۱۳	۰	۱	۰	۰	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۸	۰
۱۴	۰	۰	۱	۱	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۱	۰
۱۵	۰	۰	۱	۰	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱	۰
۱۶	۰	۰	۰	۱	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۷	۰
۱۷	۱	۱	۱	۰	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۱۸	۱	۱	۰	۱	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۱۹	۱	۱	۰	۰	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۲	۱	۰	۰	۱	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۳	۰	۱	۱	۱	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۴	۰	۱	۱	۰	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۵	۰	۱	۰	۱	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۶	۰	۰	۱	۱	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۷	۱	۱	۱	۱	۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۸	۱	۱	۱	۰	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۲۹	۱	۱	۰	۱	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۳۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۳۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰
۳۲	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۰

۴. نتیجه گیری

در این مقاله ارزیابی پایایی سامانه تأمین انرژی یک قطب انرژی در محیط چند حاملی و با در نظر گرفتن شرایط بحرانی مورد مطالعه قرار گرفت. برای در نظر گرفتن شرایط بحرانی، نرخ خرابی و نرخ تعمیر تجهیزات در صورت وقوع هر یک از تهدیدهای نظامی و طبیعی متفاوت با شرایط عادی در نظر گرفته شد. همچنین احتمال وقوع هر یک از تهدیدها به روش مارکوف و بر اساس نرخ وقوع آنها مدل شد. مدل نهایی از ترکیب "زنجیره مارکوف وقوع هر یک از شرایط بحرانی" با "زنجیره مارکوف نمایانگر خرابی تجهیزات" تشکیل شد. با توجه به پیچیدگی سامانه، روش مونت کارلو ترتیبی برای شبیه سازی رفتار در طول زمان ارائه گردید. در روش پیشنهادی احتمال وقوع هم‌زمان خرابی تجهیزات بخوبی مدل می‌شود. در شبیه سازی انجام شده بارهای سامانه از نظر حساسیت دسته بندی شده و شاخص‌های پایایی سامانه به ازای هر یک جداگانه تعیین گردید. همچنین در این تحقیق احتمال وقوع حالات بحرانی طبیعی و نظامی به دو روش تحلیلی و شبیه سازی مونت کارلو استخراج شد. نتایج نشان دادند که روش مونت کارلو پیشنهادی، دقیق تر از روش تحلیلی می‌باشد. نکته قابل توجه آنست که با آنکه احتمال وقوع شرایط بحرانی بسیار کوچک است ولی سهم احتمال در قطعی سامانه قابل توجه می‌باشد.

۵. مراجع

- [5] Krause, T.; Andersson, G.; Fro, K.; Vaccaro, A. "Multiple-Energy Carriers: Modeling of Production, Delivery, and Consumption"; Proc. IEEE 2011, 99, 1, 15-27.
- [6] Geidl, M.; Koepfel, G.; "Energy Hubs for the Future"; IEEE Power and Energy Magazine 2007, 5, 1, 24-30.
- [7] Bozchalui, M. C.; AhsanHashmi, S.; Hassen, H.; Cañizares, C. A.; Bhattacharya, K. "Optimal Operation of Residential Energy Hubs in Smart Grids"; IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3, 4, 1755-1766.
- [8] Krause, T.; Kienzle, F.; Art, S.; Andersson, G. "Maximizing Exergy Efficiency in Multi-Carrier Energy Systems"; IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010.
- [9] Geidl, M.; Andersson, G. "Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers"; IEEE Trans. Power Syst. 2007, 22, 1, 145-155.
- [10] Koepfel, G. "Reliability Considerations of Future Energy Systems: Multi-Carrier Systems and the Effect of Energy Storage"; Ph.D. Thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2007, Diss. ETH No. 17058.
- [11] Koepfel G, Andersson G. "Reliability Modeling of Multi-Carrier Energy Systems"; Energy 2009, 34, 235-244.
- [12] Shahmohammadi, A.; Dalvand, M. M.; Ghazizadeh, M. S.; Salemnia, A. "Structural and Operational Optimization of Multi-Carrier Energy Systems Considering Reliability Constraints"; 26th Int. Power System Conf., 2011.
- [13] Kia, M.; Aalami, H. A. "A New Approach for Optimal Location of Power Dispatching Centers Based on Passive Defence Criteria Using EAHP"; Passive Defence Sci. & Tech. 2014, 5, 19-29 (In Persian).
- [14] Amoshahi, H., Aalami, H. A. "Online Smart Load Shedding in Micro Grid with Presence of Wind Turbine"; Passive Defence Sci. & Tech. 2014, 5, 159-166 (In Persian).
- [15] Niknam, T.; Kavousifard, A.; Aghaei, J. "Scenario-Based Multiobjective Distribution Feeder Reconfiguration Considering Wind Power Using Adaptive Modified Particle Swarm Optimization"; IET Renew. Power Gener. 2012, 6, 236-247.
- [16] Billinton, R.; Allan, R. N. "Reliability Evaluation of Engineering Systems"; 2nd Ed. New York, London, Plenum Press, 1992.
- [17] Andrieu, C. "Particle Markov chain Monte Carlo method"; J. Royal Statistical Society 2010, 72, 269-342.
- [18] Passive Defence Organization of the Country "Passive Defence in Security and Access Control"; Centre of Passive Defence, 2010, 2nd Ed. (In Persian).
- [19] IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices; IEEE Std 1366, 2001.
- [20] Čepin, M. "Assessment of Power System Reliability: Methods and Applications"; 1st Ed. London, Springer Press, 2011.
- [1] Munoz, J.; Jimenez-Redondo, N.; Perez-Ruiz, J.; Barquin, J. "Natural Gas Network Modeling for Power Systems Reliability Studies"; Proc. IEEE/Power Eng. Soc. General Meeting, 2003, 4, 23-26.
- [2] Li, T.; Eremia, M.; Shahidehpour, M. "Interdependency of Natural Gas Network and Power System Security"; IEEE Trans. Power Syst. 23, 4, 2008.
- [3] Liu, C.; Shahidehpour, M.; Fu, Y. "Security-Constrained Unit Commitment With Natural Gas Transmission Constraints"; IEEE Trans. Power Syst. 2009, 24, 3, 1523-1526.
- [4] Ramezani, H.; Aalami, H. A. "Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions"; Passive Defence Sci. & Tech. 2012, 3, 231-241 (In Persian).