

ارزیابی قابلیت اطمینان یک ریزشکه مبتنی بر تولیدات هماهنگ آبی، بادی و خورشیدی

سید یاسر درخشنده*^۱

چکیده

نفوذ بالای منابع بادی و خورشیدی و عدم قطعیت‌های موجود در میزان تولید این گونه از منابع می‌تواند باعث بروز اشکالاتی در بهره‌برداری یک ریزشکه مبتنی بر این منابع و کاهش سطح قابلیت اطمینان آن گردد. بهره‌گیری همزمان از منابع الکتریکی با سرعت پاسخ بالا (نظیر تولیدات آبی) در کنار منابع دارای عدم قطعیت از جمله راهکارهای کمک به افزایش قابلیت اطمینان سامانه است. در این مطالعه ساختار و روابط حاکم بر یک ریزشکه مبتنی بر تولیدات آبی، بادی و خورشیدی تشریح می‌شود و با در نظر گرفتن مدل خطوط ارتباطی بین ریزشکه و شبکه بالادست، شاخص‌های کلیدی قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌منظور ارزیابی روش ارائه‌شده، نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته بر روی پنج سامانه آزمون ارائه و نتایج حاصل از آن تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی

قابلیت اطمینان، تولیدات آبی، تولیدات خورشیدی، تولیدات بادی، ریزشکه

^۱. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، y_derakhshandeh@eng.sku.ac.ir

مقدمه

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان منابعی جهت تأمین توان الکتریکی در شبکه‌های قدرت از دیرباز مورد توجه بشر قرار داشته است. آلودگی ناشی از منابع فسیلی و کمبود آن‌ها موجب شده است که در سالیان اخیر توجه ویژه‌ای به بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر شود. در این بین تولیدات مبتنی بر منابع آبی نظیر انرژی قابل استحصال از رودخانه‌ها و سدها دارای قدمت بیشتری هستند. از دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر که در سالیان اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند می‌توان به انرژی باد و انرژی خورشید اشاره نمود. مطالعات گسترده‌ای در رابطه با استفاده از این‌گونه منابع در تولید توان الکتریکی صورت گرفته است و پژوهشگران مختلف از دیدگاه‌های متفاوتی به بررسی این مسئله در سامانه‌های قدرت پرداخته‌اند (سودر^۱، ۲۰۰۷)، بلک و استریک^۲ (۲۰۰۷)، لی^۳ و همکاران (۱۹۹۷)، ال هاواری^۴ (۱۹۸۸)، وارما^۵ و همکاران (۲۰۱۵)، شخر^۶ و همکاران (۲۰۱۵). طبیعت تصادفی منابع مبتنی بر باد یا خورشید، استفاده از آن‌ها در سامانه قدرت را با چالش‌های جدی مواجه کرده است؛ لذا بهره‌برداری ایمن از سامانه قدرت نیازمند روش‌های بسیار دقیق برای پیش‌بینی میزان سرعت باد و تابش خورشید است (ماروالی^۷ و همکاران (۱۹۹۸)، بلوژیچ^۸ و همکاران (۲۰۰۸)). با این وجود، هرچقدر هم که روش مورد استفاده برای پیش‌بینی دقیق باشد، به علت وجود عدم قطعیت در سرعت باد و تابش خورشید، روش‌هایی برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها مورد نیاز است. از جمله راهکارهای مدیریت این عدم قطعیت‌ها استفاده هماهنگ از این منابع در کنار تولیدات مبتنی بر منابع

آبی (نیروگاه‌های برق آبی) است. نیروگاه‌های برق آبی به علت سرعت بالا در پاسخ می‌توانند به‌عنوان عاملی کمکی در مدیریت عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار گیرند (کالدلیس^۹ و همکاران (۲۰۰۱)، کاسترونوف^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۴)، کارکی^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۰)).

بسیاری از پژوهشگران و محققین در دهه اخیر، رویکردی جدید به موضوع پیاده‌سازی و بهره‌برداری بخش‌هایی از سامانه قدرت داشته‌اند و با تعریف و گسترش مفهومی به نام ریزشبکه^{۱۲} افق جدیدی در مباحث سامانه‌های قدرت پدید آورده‌اند. ریزشبکه عبارت است از مجموعه‌ای از منابع پراکنده و بارها که از طریق یک سامانه توزیع به هم متصل شده و تحت فرمان یک کنترل‌کننده می‌توانند در دو حالت متصل به شبکه^{۱۳} و یا جدا از شبکه^{۱۴} کار کنند.

ارزیابی قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها از زوایای گوناگون مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه باسو^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی به بررسی تأثیرات اندازه و محل نصب منابع تولید پراکنده بر شاخص‌های قابلیت اطمینان یک ریزشبکه پرداخته‌اند و با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و با در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان و قیود مختلف حاکم بر ریزشبکه، محل و اندازه بهینه تولیدات پراکنده را به دست آورده‌اند. همچنین جویدیپ^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۲) با به‌کارگیری روش شبیه‌سازی مونت کارلو، به ارزیابی نحوه تعیین سایز منابع ذخیره‌کننده انرژی جهت ایجاد حد معینی از قابلیت اطمینان در یک ریزشبکه پرداخته‌اند. فلاحتی^{۱۷} و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی به ارزیابی قابلیت اطمینان یک ریزشبکه هوشمند از دیدگاه تأثیر زیرساخت‌های

¹¹ Karki

¹² Microgrid

¹³ Grid connected

¹⁴ Stand alone

¹⁵ Basu

¹⁶ Joydeep

¹⁷ Falahati

¹ Soder

² Black & Strbac

³ Li

⁴ El-Hawary

⁵ Varma

⁶ Sekhar

⁷ Marwali

⁸ Bludszuweit

⁹ Kaldellis

¹⁰ Castronuovo

مفاهیم اصلی قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان در حالت کلی عبارت است از احتمال عملکرد قابل قبول یک سامانه در یک شرایط کار مشخص برای مدت زمان معین. به طور کلی دو دسته عمده از روش‌ها برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سامانه بکار گرفته می‌شوند:

روش‌های تحلیلی^۳ - روش‌های مشابه‌سازی^۴

با توجه به گستردگی معادلات سامانه تحت مطالعه در این تحقیق، عملاً امکان استفاده از روش‌های تحلیلی وجود نداشته و در ادامه از روش مشابه‌سازی مونت کارلو استفاده خواهد شد. روش‌های مشابه‌سازی می‌توانند به یکی از دو روش ذیل مورد استفاده قرار گیرند:

روش بی‌قاعده - روش پیاپی

روش بی‌قاعده، دوره‌های زمانی طول عمر سامانه را با انتخاب دوره به صورت اتفاقی، شبیه‌سازی می‌نماید و در مواردی که دوره زمانی پایه، تأثیر مهمی روی دوره بعدی داشته باشد نمی‌تواند متمر ثمر باشد. به عنوان مثال، می‌توان به اثرات دوره زمانی بر روی نیروگاه‌های برق آبی اشاره نمود. واضح است که توانایی استفاده از آب در یک دوره زمانی به مواردی نظیر چگونگی استفاده از آب در دوره‌های پیشین، مقدار بارندگی و تأمین آب در این دوره‌ها وابسته است و نمی‌تواند با روشی به جز روش پیاپی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مدل‌سازی تولیدات آبی، بادی و خورشیدی

مدل‌سازی نیروگاه برق آبی

نیروگاه‌های برق آبی می‌توانند مبتنی بر استفاده از سد یا جریان رودخانه باشند. در این پژوهش به بررسی نیروگاه‌های مبتنی بر سد پرداخته شده است. این گونه از نیروگاه‌ها با توجه به سرعت بالای پاسخ می‌توانند گزینه مناسبی جهت هماهنگی با نیروگاه‌های خورشیدی و بادی و مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از آن‌ها باشند.

ارتباطی و شبکه‌های اینترنتی رابط در این گونه شبکه‌ها پرداخته اند و با تقسیم‌بندی زیرساخت‌های موجود به چهار زیرمجموعه، قابلیت اطمینان هر یک از طرح‌ها را بررسی نموده‌اند. تأثیرات سامانه‌های حفاظتی و شرایط متنوع بهره‌برداری در یک ریزشکه بر شاخص‌های قابلیت اطمینان در پژوهشی توسط ژو^۱ و همکاران (۲۰۱۴) مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش با در نظر گرفتن خروج اضطراری کوتاه مدت تجهیزات مختلف موجود در یک ریزشکه، به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر موقعیت جغرافیایی ریزشکه، سامانه‌های حفاظتی و همبستگی بین میزان تولید و مصرف بر شاخص‌های قابلیت اطمینان پرداخته شده است.

ریزشکه‌های مدرن اصولاً مبتنی بر منابع تجدیدپذیری نظیر منابع بادی یا خورشیدی هستند و چنانچه پیش‌از این بیان شد عدم قطعیت‌های ایجاد شده در ریزشکه‌ها را می‌توان به روش‌های متفاوتی مدیریت نمود. از جمله این روش‌ها، بهره‌برداری هماهنگ از این گونه منابع در کنار منابع آبی است. ارزیابی قابلیت اطمینان در یک سامانه قدرت شامل منابع بادی و آبی پیش‌از این توسط کارکی^۲ و همکاران (۲۰۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است اما این مبحث در یک ریزشکه که دارای خطوط ارتباطی با شبکه بالادست بوده و از ظرفیت تولیدات خورشیدی نیز بهره می‌گیرد تاکنون بررسی نشده است. به این ترتیب در این تحقیق به بررسی قابلیت اطمینان یک ریزشکه مبتنی بر تولیدات آبی، بادی و خورشیدی پرداخته می‌شود. به این منظور ابتدا در بخش دوم مفاهیم قابلیت اطمینان مرور و در بخش سوم به مدل‌سازی تولیدات آبی، بادی و خورشیدی پرداخته می‌شود. در بخش چهارم تحقیق، به روش مدل‌سازی و در قسمت پنجم به معرفی سامانه آزمون و تحلیل نتایج می‌پردازیم. در نهایت، برخی از نتایج این پژوهش دسته‌بندی خواهند گردید.

⁴ Simulation methods

¹ Xu

² Karki

³ Analytical methods

$$S_h = \begin{cases} 0 & \text{if } V_{ph} \leq V_{max} \\ V_{ph} - V_{max} & \text{if } V_{ph} > V_{max} \end{cases} \quad (3)$$

$$V_h = \begin{cases} V_{ph} & \text{if } V_{ph} \leq V_{max} \\ V_{max} & \text{if } V_{ph} > V_{max} \end{cases} \quad (4)$$

که در این روابط: V_{ph} = حجم آب موجود در حوضچه در ساعت h قبل از سرریز شدن، V_{max} = بیشینه حجم حوضچه و R_{h-1} = میزان آب مصرفی در ساعت $h - 1$ است.

به این ترتیب بر مبنای حجم آب موجود می توان هد آب در ساعت h (یعنی H_h) را با استفاده از رابطه (۵) محاسبه نمود.

$$V_h = c + b.H_h + a.H_h^2 \quad (5)$$

که a ، b و c ضرایب مدل هستند.

میزان توان الکتریکی تولیدی در ساعت h بر اساس روابط (۶) و (۷) قابل محاسبه است.

$$P_{hydro,h} = \frac{g.\beta.H_h.Q.s}{10^6} \quad (6)$$

$$Q = G.\sqrt{2gH_h} \quad (7)$$

که در آن g = ثابت گرانش برحسب m/sec^2 ، β = بازده کلی یک واحد آبی معادل 0.8 ، Q = نرخ تخلیه توربین آبی با محدودیت حداقل $10/6 m^3/s$ و حداکثر $53 m^3/s$ ، S وزن مخصوص آب معادل $1000 kg/m^3$ و G = ناحیه باز هدایت برای هر توربین آبی و دارای حداکثر مقدار $1/1 m^2$ است. همچنین میزان آب مصرفی جهت تولید برق ساعت h بر مبنای رابطه (۸) حاصل می شود.

$$R_h = 3600k_a Q \quad (8)$$

جدول (۱): میزان میانگین آب ورودی به حوضچه

| دوره | بارش (Mm^3) | خشک (Mm^3) | عادی (Mm^3) |
|------|-----------------|----------------|-----------------|
| ۱ | ۲۰/۵ | ۱۲ | ۱۲/۵ |
| ۲ | ۳۴ | ۱۴/۵ | ۱۹/۵ |
| ۳ | ۴۶ | ۲۳/۵ | ۳۰ |
| ۴ | ۵۷ | ۲۹ | ۴۲ |
| ۵ | ۳۱ | ۱۴ | ۲۰ |
| ۶ | ۲۴ | ۱۱ | ۱۶ |
| ۷ | ۱۸ | ۸ | ۱۲ |

جهت مدل سازی این گونه از نیروگاهها برای محاسبات قابلیت اطمینان، عموماً از مدل چهارحالتی پیشنهادی قابلیت اطمینان IEEE^۱ استفاده می شود (شکل (۱)). در این مدل، m = متوسط زمان تا خرابی (MTTF)، r = متوسط زمان تا تعمیر (MTTR)، T = متوسط زمان قطع رزرو در دوره نیاز، D = متوسط زمان در سرویس در موقع تقاضا و P_s = احتمال خرابی در راه اندازی است. زمانی که از روش مشابه سازی استفاده شود، انتقال از حالت ۰ و ۱ به حالات ۲ و ۳ بر اساس قرار گرفتن در هر دوره فصلی و بر اساس تقاضای مصرف کننده در طی آن دوره، مشابه سازی می گردند (آلن و رومان^۲ (۱۹۸۹)).

انرژی پتانسیل ذخیره شده در آب پشت سد از طریق توربینها و ژنراتورها به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. این انرژی پتانسیل، تابعی از میزان آب ورودی به حوضچه پشت سد و آب خروجی جهت تولید برق است. عمده آب ورودی به پشت سد از طریق بارش تأمین می شود که خود تابعی از شرایط آب و هوایی در طول سال است. در این تحقیق سه حالت کلی برای شرایط آب و هوایی در طی یک سال در نظر گرفته می شود: شرایط خشک، شرایط معمولی و شرایط بارش. رخداد هر یک از این حالات سه گانه جهت مشابه سازی با احتمال یکسان در نظر گرفته می شود (آلن و رومان^۱ (۱۹۸۹)). به این منظور یک سال به ۱۳ بخش یکسان (هر بخش به طول ۶۷۲ ساعت) تقسیم می شود که در طی هر یک از بخشها شرایط آب و هوایی ثابت در نظر گرفته می شود. میزان آب ورودی به حوضچه (Z_j) دارای توزیع نرمال بوده و مقدار میانگین آن از جدول (۱) به دست می آید (روبینستین^۳ (۱۹۸۱)). به این ترتیب حجم آب ورودی ساعتی به حوضچه از رابطه (۱) به دست می آید:

$$I_h = \frac{Z_j}{672} \quad (1)$$

میزان آب سرریز شده (S_h) و حجم آب ذخیره شده در حوضچه (V_h) در ساعت h طبق روابط (۲) تا (۴) قابل محاسبه است:

$$V_{ph} = V_{h-1} - R_{h-1} + I_h \quad (2)$$

³ Rubinstein

¹ Institute of Electrical and Electronics Engineers

² Allan & Roman

مدل سازی نیروگاه بادی

شبه سازی متوالی یک سامانه تبدیل انرژی بادی^۷ از تولید سرعت ساعتی باد در یک دوره زمانی کافی برای یک سایت معین آغاز می شود. بوکس و جنکینز^۸ (۱۹۷۰) نشان داده اند که در هر مزرعه بادی می توان با به کارگیری مدل میانگین متحرک خودهمبسته^۹ مدل دقیق وزش باد را تخمین زد. سرعت باد در یک مزرعه بادی مشخص بر اساس رابطه (۱۰) تخمین زده می شود (بیلینتون^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۶)).

که در آن $y_h =$ مقدار سری زمان در زمان h ، $\Phi_i (i = 1, 2, 3 \dots n)$ و $\theta_j (j = 1, 2, 3 \dots n - 1)$ پارامترهای مدل خودهمبسته و میانگین متحرک هستند. α_h توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ_α^2 است (به عنوان مثال، $\alpha_h \in NID(0, \sigma_\alpha^2)$ ، که در آن NID نشانگر توزیع مستقل و نرمال است).

مدل خودهمبسته با میانگین متحرک به کار گرفته شده در این تحقیق از مقاله کارکی^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۰)، استخراج و در رابطه (۱۱) نشان داده شده است. بر این مبنا، سرعت باد در ساعت h می تواند به صورت رابطه (۱۲) مشابه سازی شود.

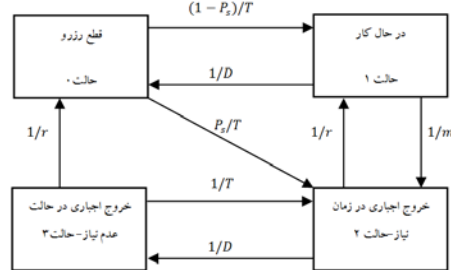
$$SW_h = \mu_h + \sigma_h \cdot y_h \quad (12)$$

که در آن μ_h و σ_h به ترتیب اطلاعات ساعتی مربوط به میانگین و انحراف استاندارد رخداد سرعت باد برای این سایت بادی هستند. به این ترتیب و بر اساس سرعت وزش باد، توان تولیدی از توربین بادی بر اساس رابطه (۱۳) قابل محاسبه خواهد بود. در این رابطه V_{ci} ، V_r و V_{co} به ترتیب سرعت راه اندازی، سرعت نامی و سرعت توقف بادی هستند و ضرایب A ، B و C بر مبنای آن ها قابل محاسبه است (گیرستو^{۱۲} و همکاران (۱۹۸۳)). همچنین P_r در این رابطه توان نامی توربین بادی است.

| دوره | بارش (Mm^3) | خشک (Mm^3) | عادی (Mm^3) |
|------|-----------------|----------------|-----------------|
| ۸ | ۱۲ | ۵ | ۸ |
| ۹ | ۱۲ | ۵ | ۸ |
| ۱۰ | ۱۲ | ۴ | ۷ |
| ۱۱ | ۱۸ | ۸ | ۱۰ |
| ۱۲ | ۱۸ | ۱۰ | ۱۶ |
| ۱۳ | ۲۸ | ۱۲ | ۱۸ |

مدل سازی تولیدات خورشیدی

میزان تابش خورشیدی^۱ و خصوصیات سلول خورشیدی از مهم ترین عوامل مؤثر بر توان خروجی سلول های خورشیدی هستند. از جمله راه های مدل سازی عدم قطعیت تابش خورشید، استفاده از تابع توزیع احتمالات بتا^۲ است (سلامه و بوروی^۳ (۱۹۹۴)). تابع تبدیلی که میزان تابش خورشید را به توان الکتریکی تولید شده مرتبط می نماید به صورت رابطه (۹) است (ماروالی^۴ (۱۹۹۸)). در این رابطه $G_h =$ میزان پیش بینی شده تابش خورشید؛ $P_N^{PV} =$ توان نامی سامانه خورشیدی نصب شده و $R_c =$ میزان معین تابش^۵ ($150W/m^2$) هستند. در این تحقیق دسترس پذیری و عدم دسترس پذیری سامانه خورشیدی توسط مدل دو حالت مارکوف مدل سازی شده و خطای پیش بینی تابش خورشیدی توسط تابع توزیع احتمال بتا در شبه سازی ها اعمال می گردد (بیلینتون و آلن^۶ (۱۹۹۶)).



شکل (۱): مدل چهار حالتی پیشنهادی IEEE

⁷ Wind energy conversion system (WECS)

⁸ Box & Jenkins

⁹ Auto-regressive moving average (ARMA)

¹⁰ Billinton

¹¹ Karki

¹² Giorsetto

¹ Solar Irradiance

² Beta Probability Density Function

³ Salameh & Borowy

⁴ Marwali

⁵ Certain Radiation Point

⁶ Billinton & Allan

روش مدل سازی

از جمله دغدغه‌های استفاده از تولیدات بادی و خورشیدی، وجود عدم قطعیت در تولیدات آن‌ها است. از جمله راهکارهای مدیریت رفتار احتمالاتی این‌گونه از منابع، بهره‌برداری هماهنگ این منابع در کنار منابع آبی است. دلیل این مسئله آن است که تولیدات برقی مبتنی بر منابع آبی، دارای پاسخ بسیار سریع بوده و می‌توانند در مواردی که مقدار منابع بادی یا خورشیدی با مقدار پیش‌بینی شده خود متفاوت باشند به‌طور سریع عکس‌العمل مناسب از خود نشان دهند. به این ترتیب عموماً پیشنهاد می‌شود که درصد معینی از تولیدات آبی جهت ایجاد هماهنگی با منابع دارای عدم قطعیت به کار گرفته شوند. تخصیص بیش از حد منابع آبی جهت ایجاد هماهنگی با منابع بادی یا خورشیدی می‌تواند از پتانسیل بالقوه این‌گونه از منابع در تولید توان الکتریکی بکاهد. به این ترتیب یکی از موارد مورد نیاز تعیین درصد منابع آبی است که نیاز است به‌طور هماهنگ با منابع بادی و خورشیدی بهره‌برداری شوند. به این ترتیب مشخص می‌شود تعیین و بررسی قابلیت اطمینان یک ریزشکه مبتنی بر تولیدات آبی، بادی و خورشیدی نیازمند مدل‌سازی دقیق رفتار هماهنگ این منابع است. به این منظور در این بخش روش مدل‌سازی این روند به اختصار و در مراحل معین بیان می‌شود:

(۹)

$$P_{PV} = \begin{cases} P_N^{PV} \frac{G_h}{G_{std} R_c} & 0 < G_h < R_c \\ P_N^{PV} \frac{G_h}{G_{std}} & G_h > R_c \end{cases}$$

$$y_h = \sum_{i=1}^n \Phi_i y_{h-i} + \alpha_h - \sum_{j=1}^{n-1} \theta_j \alpha_{h-j} \quad (10)$$

$$y_h = 0.8782y_{h-1} - 0.0066y_{h-2} + 0.0265y_{h-3} + \alpha_h - 0.216\alpha_{h-1} + 0.0091\alpha_{h-2} \quad (11)$$

$$\alpha_h \in NID(0, 0.55792^2)$$

$$P_{w,h} = \begin{cases} 0, & 0 \leq SW_h < V_{ci} \\ (A + B \times SW_h + C \times SW_h^2) \times P_r, & V_{ci} \leq SW_h < V_r \\ P_r, & V_r \leq SW_h < V_{co} \\ 0, & SW_h \geq V_{co} \end{cases} \quad (13)$$

مرحله اول:

تعیین و تخمین میزان تولیدات بادی ($P_{W,h}$) در طی افق مورد مطالعه بر مبنای پیش‌بینی میزان وزش باد و با استفاده از سری ARMA (روابط (۱۳) - (۱۱)). در این مطالعه افق مورد مطالعه، یک سال (۵۲ هفته - معادل ۸۷۳۶ ساعت) در نظر گرفته شده است.

مرحله دوم:

تعیین و تخمین میزان تولیدات خورشیدی ($P_{PV,h}$) در طی افق مورد مطالعه بر مبنای پیش‌بینی میزان تابش خورشید (رابطه (۹)) و اعمال خطای پیش‌بینی تابش با استفاده از تابع توزیع بتا.

مرحله سوم:

تعیین میزان توان قابل دریافت از طریق خطوط ارتباطی متصل به شبکه بالادست ($P_{lines,h}$). به این منظور با توجه به تعداد خطوط، نرخ خطا و نرخ تعمیرات آن‌ها با استفاده از روش مشابه‌سازی زمانی، در دسترس بودن و یا دسترس‌ناپذیری خطوط ارتباطی مشخص می‌شود. با معلوم بودن ظرفیت خطوط در دسترس در هر ساعت، می‌توان میزان توان قابل دریافت از شبکه بالادست را محاسبه نمود (رابطه (۱۴)).

دسترس هستند ($k_{coord,a}$) مشخص می‌گردد. رابطه (۱۵) مدل کننده جملات اخیر است.

به این ترتیب و بر اساس رابطه (۶)، توان خروجی از هر یک از واحدهای آبی در دسترس و هماهنگ شده، طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

مرحله پنجم:

تعیین میزان نیاز به استفاده از سایر واحدهای آبی جهت مشارکت در تأمین بار در هر ساعت.

با مشخص شدن میزان توان تولیدی توسط واحدهای بادی و خورشیدی، توان انتقالی توسط خطوط و توان تولیدی توسط واحدهای آبی هماهنگ شده، در این مرحله تعداد واحدهای آبی مورد استفاده جهت مشارکت در تأمین بار (k_{peak}) و میزان تولید آن‌ها ($P_{peak,hydro,h}$) مشخص می‌شود.

اگر میزان توان تولیدی توسط واحدهای بادی، خورشیدی و آبی در مراحل پیشین همراه با توان انتقالی از طریق خطوط در هر ساعت، از بار پیش‌بینی شده آن ساعت بیشتر باشد، نیازی به استفاده از واحدهای آبی پیک وجود ندارد. در غیر این صورت، به تعداد k_{peak} عدد از واحدهای آبی به کار گرفته می‌شوند (رابطه (۱۷)). در این رابطه k_{hydro} تعداد کل واحدهای آبی نصب شده و $P_{l,h}$ بار پیش‌بینی شده ریزشکه در ساعت h است. با مشخص شدن میزان کمبود توان، به تعداد لازم از واحدهای آبی پیک (k_{peak}) جهت تأمین توان بکار گرفته می‌شوند. میزان توان تولیدی توسط هر یک از این واحدها با استفاده از رابطه (۱۸) و بر مبنای رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

به این ترتیب کل توان قابل تولید در هر ساعت، توسط رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. یادآوری می‌شود که فرض بر این است که میزان خطا در بار پیش‌بینی شده از یک تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کند (بیلینتون و آلن^۱ (۱۹۹۶)).

$$\begin{cases} k_{coord,a} \leq k_{coord} & \text{if } P_{w,h} + P_{pv,h} < F \times (C_{wind} + C_{pv}) \\ k_{coord,a} = 0 & \text{if } P_{w,h} + P_{pv,h} \geq F \times (C_{wind} + C_{pv}) \end{cases} \quad (15)$$

لازم به یادآوری است که جهت مدل‌سازی خطوط از مدل دو حالت مارکوف استفاده و رخداد خطا در هر یک از خطوط حادثه‌ای مستقل فرض می‌شود.

$$P_{lines,h} = \sum_{i=1}^{N_{line}} P_{line,i} * state_{i,h} \quad (14)$$

که در این رابطه $P_{line,i}$ ظرفیت خط شماره i و $state_{i,h}$ در دسترس بودن یا نبودن این خط در ساعت h را نشان می‌دهد.

مرحله چهارم:

تعیین نیاز یا عدم نیاز به استفاده از واحدهای آبی هماهنگ شده با تولیدات بادی و خورشیدی در هر ساعت.

چنانچه در ابتدای این بخش بیان شد تعدادی از واحدهای آبی، به منظور جبران عدم قطعیت‌های ناشی از تولیدات بادی و خورشیدی به کار گرفته می‌شوند. در این مرحله مشخص می‌شود که در چه ساعاتی نیاز به استفاده از این گونه واحدها وجود دارد. بدین منظور شاخصی به نام شاخص هماهنگی (F) تعریف می‌گردد (کارکی و همکاران (۲۰۱۰)). این شاخص در حقیقت بیان‌کننده درصدی از مجموع توان نصب شده تولیدات بادی و خورشیدی ($G_{wind} + G_{pv}$) است. در این مطالعه این شاخص برابر نسبت میانگین بلندمدت توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی به توان نصب شده در نظر گرفته شده است. در هر ساعت اگر توان پیش‌بینی شده تولیدات بادی و خورشیدی کمتر از میزان معین شده توسط شاخص باشد بایستی تعداد مناسبی از واحدهای آبی (k_{coord}) جهت ایجاد هماهنگی وارد مدار شوند. بدیهی است که در هر ساعت این احتمال وجود دارد که تعدادی از این واحدها به علت خطا در مدار نبوده و امکان بهره‌برداری از آن‌ها وجود نداشته باشد. به این ترتیب و بر اساس مشابه سازی زمانی که در ابتدای بخش (۳) بیان گردید، تعداد واحدهای آبی هماهنگ شده که در

¹ Billinton & Allan

$$P_{coord,hydro,h} = \begin{cases} \frac{g\beta H_h Q_s}{10^6} & \text{if } P_{w,h} + P_{PV,h} < F \times (C_{wind} + C_{PV}) \\ 0 & \text{if } P_{w,h} + P_{PV,h} \geq F \times (C_{wind} + C_{PV}) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} k_{peak} \leq k_{hydro} - k_{coord} & \text{if } P_{w,h} + P_{PV,h} + P_{lines,h} + k_{coord} \times P_{coord,hydro,h} < P_{l,h} \\ k_{peak} = 0 & \text{if } P_{w,h} + P_{PV,h} + P_{lines,h} + k_{coord} \times P_{coord,hydro,h} \geq P_{l,h} \end{cases} \quad (17)$$

$$P_{peak,hydro,h} = \begin{cases} \frac{g\beta H_h Q_s}{10^6} & \text{if } P_{w,h} + P_{PV,h} + P_{lines,h} + k_{coord} \times P_{coord,hydro,h} < P_{l,h} \\ 0 & \text{if } P_{w,h} + P_{PV,h} + P_{lines,h} + k_{coord} \times P_{coord,hydro,h} \geq P_{l,h} \end{cases} \quad (18)$$

$$P_{g,h} = P_{w,h} + P_{PV,h} + P_{lines,h} + k_{coord,a} \times P_{coord,hydro,h} + k_{peak} \times P_{peak,hydro,h} \quad (19)$$

مرحله ششم:

که در این روابط LOLE^۳ = میزان بار تأمین نشده انتظاری، LOEE^۴ = میزان انرژی تأمین نشده انتظاری، AWE = میزان متوسط آب مصرفی جهت تولید برق و AVolume = حجم متوسط آب موجود در پشت سد، N = تعداد سال‌های افق مورد مطالعه.

سامانه آزمون و مطالعات صورت گرفته

معرفی سامانه آزمون

به منظور ارزیابی و بررسی روش ارائه شده، از یک ریزش‌بکه مبتنی بر تولیدات آبی، خورشیدی و بادی استفاده شده است. ریزش‌بکه از طریق سه فیدر توزیع مستقل به شبکه بالادست متصل است. ظرفیت هر یک از این خطوط برابر ۲ MW، نرخ خرابی آن‌ها ۰/۰۴ f/year و مدت زمان تعمیر هر یک ۲ ساعت خواهد بود (چاودهاری^۵ و همکاران (۲۰۰۳)). اطلاعات بار پیش‌بینی شده جهت سال آینده در شکل (۲) نمایش داده شده است و فرض بر این است که میزان خطا در بارپیش‌بینی شده از یک تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کند (بیلینتون و آلن^۶ (۱۹۹۶)).

در ریزش‌بکه مورد مطالعه به میزان ۱۰ MW توربین بادی نصب شده است و مقادیر V_{ci} ، V_r و V_{co} به ترتیب برابر ۴، ۱۰ و ۲۲ متر بر ثانیه هستند. سایر اطلاعات مورد نیاز جهت

با معلوم بودن توان مصرفی و توان قابل تولید در هر ساعت، میزان کمبود توان در هر ساعت قابل محاسبه است و شاخص‌های متداول قابلیت اطمینان یعنی میزان از دست رفتن بار (LOL) و از دست رفتن انرژی (LOE) به صورت زیر برای هر ساعت محاسبه می‌شوند:

$$LOL_h = \begin{cases} 0 & \text{if } P_{g,h} \geq P_{l,h} \\ 1 & \text{if } P_{g,h} < P_{l,h} \end{cases} \quad (20)$$

$$LOE_h = \begin{cases} 0 & \text{if } P_{g,h} \geq P_{l,h} \\ P_{l,h} - P_{g,h} & \text{if } P_{g,h} < P_{l,h} \end{cases} \quad (21)$$

در نهایت و با استفاده از محاسبات انجام شده برای کل ساعات سال، شاخص‌های زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$LOLE = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^{8736 \times N} LOL_h \quad (22)$$

$$LOEE = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^{8736 \times N} LOE_h \quad (23)$$

$$AWE = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^{8736 \times N} R_h \quad (24)$$

$$AVolume = \frac{1}{8735 \times N} \sum_{h=1}^{8736 \times N} V_h \quad (25)$$

⁵ Chowdhury

⁶ Billinton & Allan

¹ Loss of Load

² Loss of Energy

³ Loss of Load Expectation

⁴ Loss of Energy Expectation

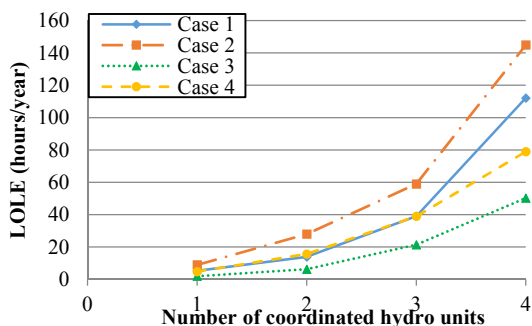
واحد تا چهار واحد تغییر داده شده و تأثیرات آن بر پارامترهای مختلف مدل شده است.

علاوه بر این، مطالعه شماره پنج جهت ارزیابی تأثیر حضور منابع آبی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان صورت پذیرفته است. در این مطالعه، تولیدات آبی حذف شده و برابر با میزان ظرفیت آبی حذف شده، ظرفیت نصب شده تولیدات بادی و خورشیدی افزایش یافته است.

جدول (۲): مطالعات انجام شده بر روی شبکه

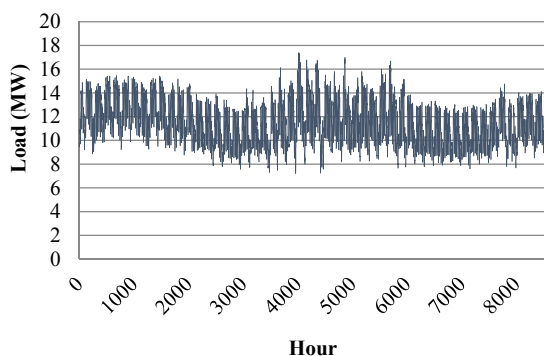
| شماره مطالعه | تولیدات بادی | تولیدات آبی | تولیدات خورشیدی | تعداد خطوط رابط |
|--------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|
| ۱ | ✓ | ✓ | ✗ | ۳ |
| ۲ | ✓ | ✓ | ✗ | ۲ |
| ۳ | ✓ | ✓ | ✓ | ۳ |
| ۴ | ✓ | ✓ | ✓ | ۲ |
| ۵ | ✓ | ✗ | ✓ | ۳ |

شکل‌های (۳) تا (۶)، نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش ارائه شده بر روی شبکه آزمون را نمایش می‌دهند. محور افقی در این نمودارها، تعداد واحدهای آبی هماهنگ شده با تولیدات بادی و خورشیدی را نمایش می‌دهد.



شکل (۳): میزان بار تأمین نشده انتظاری

پیش‌بینی میزان تولید توربین بادی از تحقیق گریستو^۱ و همکاران (۱۹۸۳) قابل استخراج است. میزان ظرفیت خورشیدی نصب شده به صورت دو مجموعه هر یک به میزان MW ۲/۵ با نرخ خروج اجباری برابر ۲٪ مدل سازی شده است. جهت مدل سازی تولیدات آبی از اطلاعات مندرج در تحقیق کارکی^۲ و همکاران (۲۰۱۰) استفاده شده است. حجم حوضچه حوضچه ذخیره آب برابر ۱۰۰ Mm³، بیشینه هد آب برابر ۱۸۰m و ضرایب a, b و c در رابطه (۵) برابر با ۰/۰۰۲۴۱، ۰/۱۱۱ و ۲ هستند. فرض شده است که نیروگاه آبی دارای ۶ واحد تولیدی و یک حوضچه ذخیره آب مشترک است. نرخ خروج اجباری هر یک از واحدها ۲٪ است (کارکی و همکاران (۲۰۱۰)).



شکل (۲): منحنی بار پیش‌بینی شده

مطالعات و شبیه‌سازی‌ها

جهت بررسی و ارزیابی قابلیت اطمینان یک ریزشکه مبتنی بر تولیدات آبی، بادی و خورشیدی مطالعات گوناگونی بر ریزشکه آزمون صورت پذیرفت. مطالعات صورت گرفته بر روی ریزشکه جهت بررسی تأثیر عوامل مختلف در جدول (۲) به اختصار معرفی شده‌اند. در مطالعات شماره یک و دو، تولیدات خورشیدی لحاظ نشده است. همچنین جهت ارزیابی اثر تعداد خطوط رابط با شبکه بالادست در مطالعات مختلف، تعداد این خطوط تغییر یافته است. علاوه بر این در هر مطالعه تعداد واحدهای آبی هماهنگ شده با تولیدات بادی از یک

² Karki

¹ Giorsetto

صرف این مسئله شده و در نتیجه شاخص‌های LOLE و LOEE دچار افزایش می‌شوند. از سوی دیگر شکل‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهند که نصب تولیدات خورشیدی و افزایش تعداد خطوط ارتباطی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش شاخص‌های LOLE و LOEE داشته باشند.

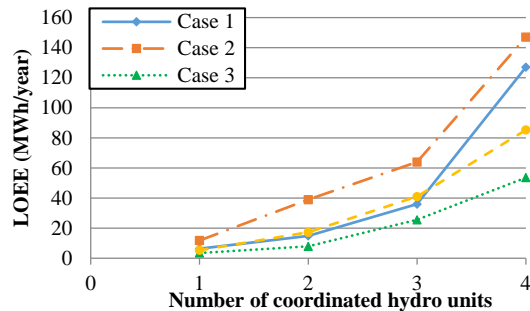
به‌عنوان نمونه در شکل (۳) به ازای دو واحد هماهنگ آبی، با افزایش تعداد خطوط ارتباطی از دو خط به سه خط، شاخص LOLE از ۲۸ ساعت بر سال به ۱۳/۸۵ ساعت بر سال کاهش یافته است.

شکل (۵) نشان‌دهنده میزان متوسط آب مصرفی جهت تولید برق است. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش واحدهای هماهنگ، میزان آب مصرفی افزایش یافته است. از سوی دیگر افزایش تعداد خطوط ارتباطی و یا نصب تولیدات خورشیدی باعث می‌گردد که حجم کمتری از آب ذخیره‌شده در پشت سد، صرف تولید برق گردد. شکل (۶) از نمای دیگری این نکته را نشان می‌دهد. به‌بیان‌دیگر، با افزایش تعداد واحدهای هماهنگ، حجم آب ذخیره‌شده در پشت سد با کاهش فراوانی روبرو خواهد بود.

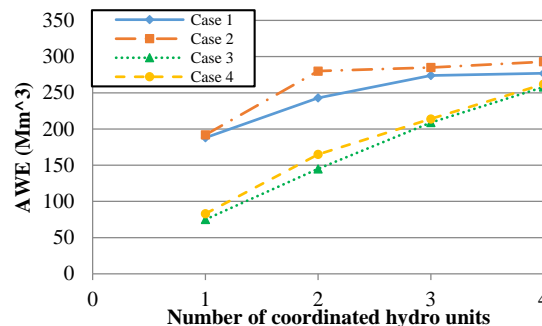
چنانچه در بخش‌های پیشین توضیح داده شد حضور تولیدات آبی با سرعت پاسخ بالا می‌تواند عدم قطعیت‌های ناشی از منابع خورشیدی و بادی را مدیریت نموده و شاخص‌های قابلیت اطمینان را بهبود بخشد. چنانکه در جدول (۳) نشان داده می‌شود، عدم حضور تولیدات آبی (مطالعه ۵) باعث افزایش شاخص‌های LOLE و LOEE در مقایسه با مطالعه ۳ گردیده است.

جدول (۳): بررسی تأثیر تولیدات آبی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان

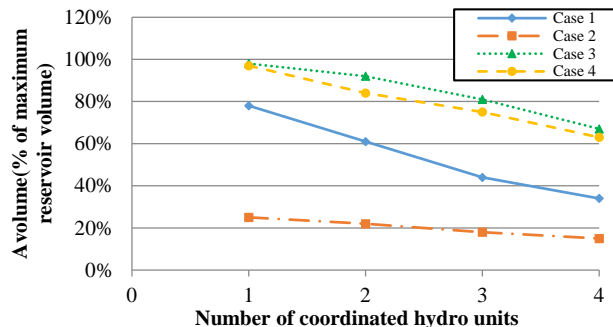
| شماره مطالعه | LOLE (hours/year) | LOEE (MWh/year) |
|--------------|-------------------|-----------------|
| ۳ | ۵۰,۳ | ۵۳,۶ |
| ۵ | ۱۲۴,۹ | ۱۳۱,۴ |



شکل (۴): میزان انرژی تأمین نشده انتظاری



شکل (۵): میزان متوسط آب مصرفی جهت تولید برق



شکل (۶): حجم متوسط آب موجود در پشت سد

چنانچه در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود با افزایش تعداد واحدهای هماهنگ آبی، میزان بار و انرژی تأمین نشده انتظاری افزایش می‌یابد. این نتیجه به این دلیل است که میزانی از ظرفیت نصب‌شده به علت مشارکت در کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از تولیدات بادی و خورشیدی، به کار گرفته نمی‌شود. به عبارتی با افزایش تعداد واحدهای هماهنگ، علیرغم اینکه عدم قطعیت در تولیدات بادی و خورشیدی به‌طور چشمگیری مدیریت می‌شود ولی بخشی از ظرفیت نصب‌شده

energy.” *Microelectronics Reliability*. 36(9), 1253–1261.

- 5- Black, M. and Strbac, G. (2007). “Value of bulk energy storage for managing wind power fluctuations.” *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 22(1), 197–205.
- 6- Bludszweit, H., Domínguez-Navarro, J. A. and Llombar, A. (2008). “Statistical analysis of wind power forecast error.” *IEEE Transactions on Power Systems*. 23(3), 983–991.
- 7- Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. (1970). “Time Series Analysis: Forecasting and Control.” San Francisco, CA: Holden Day.
- 8- Castronuovo, E. D. and Lopes, J. A. P. (2004). “On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant.” *IEEE Transactions on Power Systems*. 19(3), 1599–1606.
- 9- Chowdhury, A. A., Agarwal, S. K. and Koval, D. O. (2003). “Reliability modeling of distributed generation in conventional distribution systems planning and analysis.” *IEEE Transactions on Industry Applications*. 39(5), 1493–1498.
- 10- El-Hawary, M. E. and Ravindranath, K. M. (1988). “Effects of hydro models on optimal operation of variable head hydro-thermal systems.” *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*. 13(3-4), 112–119.
- 11- Falahati, B., Yong, F. and Lei, W. (2012). “Reliability Assessment of Smart Grid Considering Direct Cyber-Power Interdependencies.” *IEEE Transactions on Smart Grid*. 3(3), 1515–1524.
- 12- Giorsetto, P. and Utsurogi, K. F. (1983). “Development of a New Procedure for Reliability Modeling of Wind Turbine Generators.” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 102(1), 134–143.

جمع‌بندی

در این تحقیق به بررسی و ارزیابی پارامترهای مختلف مرتبط با قابلیت اطمینان یک ریزشبکه مبتنی بر تولیدات آبی، بادی و خورشیدی پرداخته شد. به این منظور، اصول کلی مدل‌سازی این‌گونه از ریزشبکه‌ها بیان و فرمول‌بندی مربوطه ارائه گردید و با انجام مطالعات مختلف تأثیر موارد متعدد بر شاخص‌های قابلیت اطمینان ارزیابی شد. همچنین نشان داده شد که افزایش تعداد واحدهای آبی هماهنگ شده با تولیدات بادی و خورشیدی علیرغم اینکه می‌تواند عدم قطعیت‌های ناشی از منابع بادی و خورشیدی را مدیریت نماید، باعث کاهش شاخص‌های اصلی قابلیت اطمینان یک ریزشبکه (LOLE و LOLE می‌گردد. همچنین میزان استفاده از آب ذخیره‌شده در پشت سد جهت تولید برق، با افزایش تعداد واحدهای هماهنگ شده آبی، افزایش چشمگیری خواهد یافت. علاوه بر این نشان داده شد که افزایش تعداد خطوط رابط با شبکه بالادست و نصب تولیدات خورشیدی، علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان، تأثیر بسزایی در کاهش استفاده از منابع آبی خواهد داشت.

مراجع

- 1- Allan, R. N. and Roman, J. (1989). “Reliability assessment of generation systems containing multiple hydro plant using simulation techniques,” *IEEE Transactions on Power Systems*. 4(3), 1074–1080.
- 2- Basu, A. K., Chowdhury, S. and Chowdhury, S. P. (2010). “Impact of Strategic Deployment of CHP-Based DERs on Microgrid Reliability.” *IEEE Transactions on Power Delivery*. 25(3), 1697–1705.
- 3- Billinton, R. and Allan, R. N. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*. New York: Plenum.
- 4- Billinton, R., Chen, H., and Ghajar, R. (1996). “Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind

- 19- Salameh, B. and Borowy, Z. (1994). "Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/PV system." *IEEE Transactions on Energy Conversions*. 9(3), 482-488.
- 20- Sekhar, P. C., Mishra, S. and Sharma, R. (2015). "Data analytics based neuro-fuzzy controller for diesel-photovoltaic hybrid AC microgrid." *Generation, Transmission & Distribution, IET*. 9(2), 193-207.
- 21- Soder. L. (2007). "Experience from wind integration in some high penetration areas." *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 22(1), 4-12.
- 22- Varma, R. K., Rahman, S. A. and Vanderheide, T. (2015). "New Control of PV Solar Farm as STATCOM (PV-STATCOM) for Increasing Grid Power Transmission Limits During Night and Day." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 30(2), 755-763.
- 23- Xu, X., Mitra, J., Wang, T. and Mu, M. (2014). "Evaluation of Operational Reliability of a Microgrid Using a Short-Term Outage Model." *IEEE Transactions on Power Systems*. 29(5), 2238-2247.
- 13- Joydeep, M. and Mallikarjuna, V. (2014). "Determination of storage required to meet reliability guarantees on island-capable microgrids with intermittent sources." *T & D Conference and Exposition*. pp. 14-17 April 2014.
- 14- Kaldellis, J. K. and Kavadias, K. A. (2001). "Optimal wind-hydro solution for Aegean sea islands' electricity-demand fulfillment." *Applied Energy*. 70(4), 333-354.
- 15- Karki, R., Po, H. and Billinton, R. (2010). "Reliability Evaluation Considering Wind and Hydro Power Coordination." *IEEE Transactions on Power Systems*. 25(2), 685-693.
- 16- Li, C., Svoboda, A. J., Chung-Li T., Johnson, R. B. and Hsu, E. (1997). "Hydro unit commitment in hydro-thermal optimization." *IEEE Transactions on Power Systems*. 12(2), 764-769.
- 17- Marwali, M. K. C., Haili, M., Shahidehpour, S. M. and Abdul-Rahman, K. H. (1998). "Short term generation scheduling in photovoltaic-utility grid with battery storage." *IEEE Transactions on Power Systems*. 13(3), 1057-1062.
- 18- Rubinstein, R. Y. (1981). *Simulation and the Monte Carlo Method*, 2nd edition. New York: Wiley, ISBN: 978-0-470-17794-5