برنامه‌ریزی تصادفی نیروگاه‌های بادی و آبی در برنامه‌ریزی توسعه سیستم تولید انرژی الکتریکی بر اساس قابلیت اطمینان

مهدی نجار[1]، دانشجوی دکتری، حمید فلقی[2]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
mehdinajjar@birjand.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
falaghi@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله برنامه‌ریزی توسعه سیستم تولید انرژی الکتریکی با مشارکت نیروگاه‌های حرارتی، بادی و آبی بررسی شده‌است. مدل چندسطحی برای بار الکتریکی، نیروگاه‌های بادی و آبی معرفی شده و به این ترتیب با کاهش تعداد سناریوها، ارزیابی قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نیروگاه‌های بادی و آبی در برنامه‌ریزی تصادفی لحاظ شده‌است. زمان بازیابی تولید از دست رفته در روابط مسأله در نظر گرفته شده و مشارکت نیروگاه‌های با پاسخ سریع‌تر مانند نیروگاه‌های آبی و گازی جهت بازیابی سریع تولید تعیین شده‌است. مسأله به روش تجزیه بندرز حل شده و تاثیر جریمه آلودگی محیطی و سطح مورد انتظار قابلیت اطمینان در مشارکت نیروگاه‌های بادی و آبی در نظر گرفته شده‌است. با تعیین ظرفیت بهینه‌ی واحدهای بادی و آبی و کاهش مشارکت واحدهای حرارتی علاوه بر کاهش آلودگی محیطی، هزینه کل توسعه سیستم تولید کاهش یافته است. روش ارائه شده برای شبکه ۲۴ شینه IEEE اجرا شده و کارایی آن در تعیین ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های مختلف برای تامین بار پیش بینی شده نشان داده شده‌است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی، توسعه سیستم تولید، مدل چندسطحی، نیروگاه آبی و بادی، قابلیت اطمینان، ظرفیت بهینه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۲/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۹/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول : حمید فلقی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]

۱- مقدمه

با توجه هزینه‌های فراوان توسعه سیستم تولید انرژی الکتریکی، برنامه‌ریزی دقیق در این زمینه اهمیت زیادی دارد. آلودگی حاصل از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها، یک مشکل عمده در اغلب کشورها است و در این راستا، قوانین و محدودیت‌هایی نیز اعمال می‌شود که در برنامه‌ریزی سیستم تولید در لحاظ می‌شود [1, 2]. با تامین بخشی از بار پیش بینی شده توسط منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های آبی و بادی، استفاده از سوخت‌های فسیلی کاهش می‌یابد. البته با توجه به تغییرات سرعت باد و سطح و جریان آب، باید تمهیداتی در برنامه‌ریزی سیستم تولید در حضور منابع تجدیدپذیر صورت گیرد. در این راستا، از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود و عدم قطعیت در متغیرهایی مانند سرعت باد و جریان آب در نظر گرفته می‌شود. برنامه‌ریزی تصادفی به دو روش کلی بر مبنای سناریو و بر مبنای نمونه برداری انجام می‌شود [3]. در [4, 5]، برنامه‌ریزی تصادفی بر مبنای سناریو برای سیستم‌های تولید و انتقال در حضور نیروگاه‌های بادی و حرارتی انجام شده‌است. هر چند تعداد سناریوها کاهش داده شده‌است اما با این‌حال، حل مسأله بزرگ برنامه‌ریزی ترکیبی اعداد صحیح با تعداد زیاد محدودیت‌ها، مشکل و زمان‌بر است. اما در برنامه‌ریزی تصادفی بر اساس نمونه‌برداری، مسأله در چندین سطح حل می‌شود و نیاز نیست که سناریوها در قالب یک مسأله با ابعاد وسیع قرار گیرند. به عنوان مثال، در روش تجزیه بندرز سناریوها در مسأله فرعی لحاظ می‌شوند [6]. در برخی از مقالات از روش ریاضی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت باد استفاده می‌شود [7] و در مقالاتی نیز، قوانینی جهت تعیین حداکثر مشارکت واحدهای بادی در نظر گرفته می‌شود [8].

با توجه به عدم قطعیت در تولید نیروگاه‌های آبی و بادی، در برنامه‌ریزی تولید با حضور این نیروگاه‌ها، ارزیابی قابلیت اطمینان نیز باید لحاظ شود. بررسی قابلیت اطمینان در مقالات به روش‌های ریاضی [9-11]، روش‌های مبتنی به سناریوهای خروج تجهیزات [4] و یا روش‌های ابتکاری [12] انجام می‌شود. خروج تجهیزات را می‌توان با ایجاد سناریوهایی در مسأله لحاظ نمود. مشکل عمده در این روش، تعداد زیاد سناریوها است که حجم مسأله را زیاد می کند. به همین دلیل در برخی از مقالات، تعداد حالت‌های کمتری برای خروج تجهیزات در نظر گرفته می‌شود [13] و یا از روش‌های ابتکاری جهت کاهش سناریوها استفاده می‌شود [5]. در برخی از مقالات توسعه هم‌زمان سیستم‌های انتقال و تولید در نظر گرفته می‌شود [14]. از آنجا که معمولا تعداد خطوط از واحدها خیلی بیشتر است، تعداد سناریوها جهت ارزیابی قابلیت اطمینان افزایش چشم‌گیری می‌یابد و حجم محاسبات قابلیت اطمینان چندین برابر می‌شود.

برنامه‌ریزی بلند مدت نیروگاه‌های بادی و حرارتی در برخی مقالات لحاظ شده‌است [15, 16]. در [15]، واحدهای حرارتی جهت بهبود قابلیت اطمینان در حضور واحدهای بادی در نظر گرفته شده‌اند. در [16]، سناریوهای ترکیب واحدهای آبی و حرارتی ایجاد شده و جهت تعیین پاسخ بهینه، از روش شاخه نزولی (branch descending technique) استفاده شده‌است. در [15, 16]، شاخص‌های قابلیت اطمینان بررسی نشده‌است.

نیروگاه‌های آبی تا کنون بیشتر در مطالعات کوتاه‌مدت در نظر گرفته شده‌است. برنامه‌ریزی کوتاه مدت واحدهای آبی و حرارتی در مقالات زیادی بررسی شده‌است. در بیشتر این مقالات، عدم قطعیت نیروگاه‌های آبی لحاظ شده‌است و از روش حل دینامیکی دوگانه (Stochastic Dual Dynamic Programming) استفاده شده‌است [17, 18]. در [19] نیز روشی جهت افزایش قابلیت تولید نیروگاه‌های آبی در پیک بار بیان شده‌است. برنامه‌ریزی بلند مدت نیروگاه‌های آبی، حرارتی و بادی نیز در مقالات معدودی بررسی شده اما برخی از فاکتورهای مهم در این مقالات لحاظ نشده‌است [20-22]. به عنوان مثال در [20]، سناریوهای جریان آب در نظر گرفته شده و ارزیابی قابلیت اطمینان و مدل‌سازی نیروگاه‌های بادی لحاظ نشده‌است. در [21]، برنامه‌ریزی تصادفی و قابلیت اطمینان لحاظ نشده‌اند و در [22]، نیز برنامه‌ریزی تصادفی مد نظر نبوده‌است.

در این مقاله، ترکیب بهینه‌ی نیروگاه‌های آبی، بادی، حرارتی و گازی در نظر گرفته شده‌است. موارد موثر در تعیین ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های بادی و آبی که در مقالات گذشته تجمیع نشده بود، در این مقاله لحاظ شده‌است. مدل چندسطحی هم‌زمان برای نیروگاه‌های بادی و آبی و بار الکتریکی معرفی شده و به این ترتیب، تعداد سناریوها در برنامه‌ریزی تصادفی کاهش می‌یابد. سطح مورد انتظار قابلیت اطمینان در حضور نیروگاه‌های بادی و آبی در نظر گرفته شده‌است. همچنین محدودیت زمان بازیابی تولید از دست رفته، برای تعیین ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های آبی و گازی مورد نیاز لحاظ شده‌است. به این ترتیب توان رزرو بهینه‌ی نیروگاه‌ها در پیک بار تعیین می‌شود و با خروج بخشی از تولید، بازیابی آن در زمان مورد نظر انجام می‌شود. در نتیجه بازه تغییرات فرکانس سیستم کاهش می یابد. جریمه آلودگی محیطی نیز جهت افزایش ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های بادی و آبی در روابط مسأله لحاظ شده‌است. در بندهای (الف) تا (د)، دست‌آوردهای اصلی این مقاله آورده شده‌است:

الف) مدل‌های چندسطحی هم‌زمان برای نیروگاه‌های آبی، بادی و بار الکتریکی در برنامه‌ریزی تصادفی در نظر گرفته می‌شود.

ب) ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های آبی، بادی و حرارتی مورد نیاز با در نظر گرفتن عدم قطعیت و قابلیت اطمینان تعیین می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]

ج) توان رزرو بهینه‌ی نیروگاه‌های آبی، بادی و حرارتی در پیک بار به دست می‌آید.

د) روش پیشنهادی، برای پیش‌بینی ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های آبی و بادی در موارد مطالعاتی بزرگ و عملی قابل پیاده‌سازی است.

ادامه مقاله به این صورت دسته‌بندی شده‌است که در بخش ۲، مشارکت نیروگاه‌های آبی در برنامه‌ریزی سیستم تولید عنوان می‌شود. در بخش ۳، روش خوشه بندی و در بخش ۴، روش ارزیابی قابلیت اطمینان بیان می‌گردد. در بخش ۵، روابط مساله و در بخش ۶، نتایج شبیه‌سازی آورده شده‌اند. در بخش ۷ نیز نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- مشارکت نیروگاه‌های آبی

نیروگاه‌های آبی یکی از منابع پاک و ارزان در تامین انرژی الکتریکی هستند که در مسیر رودخانه و یا در پشت سدها احداث می‌شوند. در حالت اول از انرژی جنبشی و در حالت دوم از انرژی پتانسیل آب استفاده می‌شود. توان خروجی واحد آبی دارای ذخیره سد و در مسیر رودخانه به ترتیب در رابطه‌های (۱) و (۲) آورده شده‌است.

$$P = \eta \rho g h Q \quad (۱)$$

$$P = \frac{1}{2}\,\eta \rho Q V_h^2 \quad (۲)$$

که η راندمان توربین آبی، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل زمین، h ارتفاع سد، Q جریان آب و V_h سرعت آب هستند. عدم قطعیت در تولید نیروگاه‌های آبی، معمولا با استفاده از سناریوهای جریان و سطح آب درنظرگرفته می‌شود [18].

در مطالعات قابلیت اطمینان، خروج واحدهای نیروگاهی در نظر گرفته می‌شود اما زمان بازیابی تولید مد نظر قرار نمی‌گیرد. زمان بازیابی تولید در پایداری فرکانسی سیستم اهمیت ویژه ای دارد و افزایش مشارکت نیروگاه‌های با سرعت پاسخ بالاتر مانند نیروگاه‌های آبی، در کاهش زمان بازیابی تولید موثر است. به عنوان مثال فرض کنید که واحدی با توان P_g به طور ناگهانی از مدار خارج شود. زمان بازیابی تولید خارج شده، مطابق با رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید که H، G و S، به ترتیب، مجموعه واحدهای آبی، گازی و بخاری هستند و نرخ افزایش تولید آنها به ترتیب، rr_h، rr_g و rr_s می باشند. m_h، m_g و m_s به ترتیب، تعداد واحدهای آبی، گازی و بخاری هستند و T_d، زمان مورد انتظار بازیابی تولید است.

$$T_d = P_g \Big/ \left(\sum_{u \epsilon \mathrm{H}} rr_h\, m_h + \sum_{g \epsilon \mathrm{G}} rr_g m_g + \sum_{s \epsilon \mathrm{S}} rr_s m_s \right) \quad (۳)$$

زمان بازیابی تولید باید دربازه قابل قبولی باشد و زیاد بودن آن منجر به بروز نوسانات در فرکانس سیستم می‌شود. حداقل توان رزرو واحدهای آبی و حرارتی برای تامین زمان بازیابی مورد نظر، در رابطه‌های (۴) و (۵) آورده شده‌است. توان رزرو نیروگاه آبی در ساعت h مطابق رابطه‌ی (۶) که مربوط به توازن جریان آب است، به دست می آید.

$$rr_u\, T_d < res_u \quad (۴)$$

$$rr_h\, T_d < res_h \quad (۵)$$

$$res_h = res_h^{initial} + P_h^{in} + P_h^{out} \quad (۶)$$

که $res_h^{initial}$ توان رزرو اولیه، P_h^{in} توان ورودی و P_h^{out} توان خروجی نیروگاه آبی در ساعت h می‌باشند. res_h و res_u نیز توان رزرو واحدهای آبی و حرارتی هستند.

۳- خوشه‌بندی بار الکتریکی، نیروگاه‌های بادی و آبی

با توجه به مزایای فراوان نیروگاه‌های بادی، کاربرد و علاقه به استفاده از انرژی باد در کشورهای مختلف رو به افزایش است. در این مقاله، مشارکت نیروگاه‌های بادی جهت کاهش آلودگی محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی درنظرگرفته شده و مدل خوشه‌بندی جدیدی برای نیروگاه‌های بادی معرفی شده‌است. در این روش، یک مدل واحد برای تمام مزارع بادی به دست می آید. روش‌های خوشه‌بندی مختلفی در مقالات پیشین استفاده شده‌است. در [23]، خوشه‌بندی جهت مدل‌سازی مزارع بادی در برنامه‌ریزی شبکه انتقال استفاده شده‌است. در مقاله حاضر، خوشه‌بندی جهت لحاظ نمودن هم‌زمان عدم قطعیت در نیروگاه‌های آبی و بادی و بار الکتریکی در برنامه‌ریزی سیستم تولید استفاده می‌گردد. در این روش، با کاهش قابل توجه تعداد سناریوها، سرعت حل مسأله به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد، در حالی‌که، دقت در حد قابل قبول حفظ می‌شود. در این روش ثبت داده‌های سرعت باد، جریان آب و بار الکتریکی باید به‌طور هم‌زمان انجام شود. مراحل ذیل جهت خوشه‌بندی داده‌ها مد نظر قرار می‌گیرد.

۱) مقادیر ثبت شده بار ساعتی به صورت نزولی مرتب می‌شود و منحنی زمانی بار (Load Duration Curve) به دست می‌آید.

۲) منحنی زمانی بار به چند سطح تقسیم می‌شود و هر سطح به عنوان یک بلوک بار در نظر گرفته می‌شود.

۳) با استفاده از داده‌های سرعت باد و جریان آب، توان خروجی نیروگاه‌های بادی مطابق مرجع [9] و توان خروجی نیروگاه‌های آبی مطابق رابطه‌ی (۲) یا (۳) محاسبه می‌شود.

۳) توان خروجی نیروگاه‌های بادی، آبی و بار الکتریکی مرتبط با هر بلوک بار در چند سطح خوشه‌بندی می شوند که مقادیر هر سطح و احتمال آن در جدول‌های ۱ تا ۳ آورده شده‌است. در این جداول، مدل‌های چندسطحی بار الکتریکی، نیروگاه‌های بادی و آبی به دست می‌آید.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]

جدول (۱): مدل چندسطحی برای بار الکتریکی

خوشه	بازه تقسیم بندی (مگاوات)	بار الکتریکی (مگاوات)	احتمال وقوع
s_1	$P_{di,t}^{s_1} \le \frac{P_{di,m}}{n}$	$\frac{\sum_{s_2} P_{di,t}^{s_1}}{n_{di}^{s_1}}$	$\frac{n_{di}^{s_1}}{Nd_i}$
...	...	...	...
s_n	$\frac{(n-1)P_{di,m}}{n} < P_{di,t}^{s_n} \le P_{di,m}$	$\frac{\sum_{s_n} P_{di,t}^{s_n}}{n_{di}^{s_n}}$	$\frac{n_{di}^{s_n}}{Nd_i}$

که در بلوک بار i ام، $P_{di,m}$، بیشترین داده بار الکتریکی، $P_{di,t}^{s_n}$، متغیر تصادفی t ام بار در خوشه s_n و $n_{di}^{s_n}$، تعداد متغیرهای تصادفی بار الکتریکی در خوشه s_n می‌باشند. Nd_i نیز، تعداد متغیرهای تصادفی بار در بلوک i ام است.

جدول (۲): مدل چندسطحی برای نیروگاه‌های بادی

خوشه	بازه تقسیم بندی (مگاوات)	بار الکتریکی (مگاوات)	احتمال وقوع
s_1	$P_{wi,t}^{s_1} = 0$	0	$\frac{nw_{si_1}}{Nw_i}$
s_2	$0 < P_{wi,t}^{s_2} \le \frac{P_{wi,m}}{n}$	$\frac{\sum_{s_2} P_{wi,t}^{s_2}}{n_{wi}^{s_1}}$	$\frac{nw_{si_2}}{Nw_i}$
...	...	...	...
s_n	$\frac{(n-1)P_{wi,m}}{n} < P_{wi,t}^{s_n} \le P_{wi,m}$	$\frac{\sum_{s_n} P_{wi,t}^{s_n}}{n_{wi}^{s_n}}$	$\frac{nw_{si_n}}{Nw_i}$

که در بلوک بار i ام، $P_{wi,m}$، بیشترین داده توان خروجی نیروگاه‌های بادی، $P_{wi,t}^{s_n}$، متغیر تصادفی t ام توان خروجی نیروگاه‌های بادی در خوشه s_n و $n_{wi}^{s_n}$، تعداد متغیرهای تصادفی توان خروجی نیروگاه‌های بادی در خوشه s_n می‌باشند. Nw_i تعداد متغیرهای تصادفی توان خروجی نیروگاه‌های بادی در بلوک i ام است.

جدول (۳): مدل چندسطحی برای نیروگاه‌های آبی

خوشه	بازه تقسیم بندی (مگاوات)	توان خروجی توربین بادی (مگاوات)	احتمال وقوع
s_1	$P_{di,t}^{s_1} \le \frac{P_{hi,m}}{n}$	$\frac{\sum_{s_1} P_{hi,t}^{s_1}}{n_{hi}^{s_1}}$	$\frac{n_{hi}^{s_1}}{Nh_i}$
...	...	...	...
s_n	$\frac{(n-1)P_{hi,m}}{n} < P_{hi,t}^{s_n} \le P_{hi,m}$	$\frac{\sum_{s_n} P_{hi,t}^{s_n}}{n_{hi}^{s_n}}$	$\frac{n_{hi}^{s_n}}{Nh_i}$

که در بلوک بار i ام، $P_{wi,m}$، بیشترین داده توان خروجی نیروگاه‌های آبی، $P_{wi,t}^{s_n}$، متغیر تصادفی t ام توان خروجی نیروگاه‌های آبی در خوشه s_n و $n_{wi}^{s_n}$، تعداد متغیرهای تصادفی توان خروجی نیروگاه‌های آبی در خوشه s_n می‌باشند. Nh_i تعداد متغیرهای تصادفی توان خروجی نیروگاه‌های آبی در بلوک i ام است.

۴- بررسی قابلیت اطمینان

با توجه به مدل‌های چندسطحی ارائه شده در بخش ۳، جهت بررسی قابلیت اطمینان، باید مراحل ذیل انجام شود.

۱) حالت‌های خروج نیروگاه‌های حرارتی در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب که حداکثر خروج دو واحد حرارتی با هم مد نظر قرار می‌گیرد [9]. زیرا در صورت افزایش تعداد حالت‌های خروج، حل مسأله دشوار می‌شود و در [9] و [13] نشان داده شده‌است که با در نظر گرفتن خروج دو واحد حرارتی نیز دقت قابل قبولی نیز حاصل می گردد.

۲) سناریوهای بار الکتریکی، توان تولیدی نیروگاه‌های بادی و آبی بر اساس مدل های چندسطحی ارائه شده در بخش ۳ تعیین می‌شود.

۳) با در نظر گرفتن سناریوها در بندهای ۱ و ۲، سناریوهای مربوط به خروج تجهیزات و عدم قطعیت متغیرها لحاظ می‌شوند.

۴) با توجه به سناریوهای بند (۳)، امید ریاضی انرژی تامین نشده محاسبه می‌شود.

۵- روابط مسأله

در این مقاله، از روش تجزیه بندرز (Benders Decomposition) استفاده شده‌است که در حل مسائل همراه با عدم قطعیت کارایی زیادی نشان می‌دهد. تابع هدف مسأله در رابطه‌ی (۷)، آورده شده‌است. که موارد اول تا سوم، به ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های حرارتی، آبی و بادی و موارد چهارم تا ششم به ترتیب هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌ها و جریمه‌های آلودگی و انرژی تأمین نشده[1] هستند. ضریب A، جهت تبدیل ارزش سالانه به ارزش حال حاضر است که بر اساس رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید. m_{wi}، m_{hi} و m_{ui} به ترتیب متغیرهای باینری تصمیم‌گیری برای نیروگاه‌های کاندیدای بادی، آبی و حرارتی هستند که اگر یک باشند، واحد i انتخاب شده و در غیر این‌صورت، واحد i انتخاب نشده‌است.

$$\text{Min}\left(\sum_{i\epsilon \text{U}} CI_{ui}\, m_{ui} + \sum_{j\epsilon \text{H}} CI_{hj}\, m_{hj} + \sum_{k\epsilon \text{W}} CI_{wk}\, m_{wk} + \text{A} \times \left(\sum_{i\epsilon \text{U}} (CO_{ui,s} + PE_{ui,s}^{con}) + PE_{EENS}\right)\right) \quad (۷)$$

$$\text{A} = \frac{[(1+q)^w - 1]}{q(1+q)^w} \quad (۸)$$

که H، U، W به ترتیب مجموعه نیروگاه‌های آبی، حرارتی و بادی هستند. CI_{ui} ، CI_{hj} و CI_{wk} به ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری واحد حرارتی i ام، آبی j ام و بادی k ام و $CO_{ui,s}$، PE_{ui}^{con} و PE_{EENS} به

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]

ترتیب هزینه بهره‌برداری، جریمه آلودگی و انرژی تأمین نشده واحد حرارتی i ام هستند. q و w نیز به ترتیب نرخ بهره و عمر نیروگاه می‌باشند. در روش BD، مسأله به دو بخش اصلی و فرعی تقسیم می‌شود، که در ادامه آورده شده‌اند.

۵-۱- مسأله‌ی فرعی

تعداد واحدهای نیروگاهی که در مسأله اصلی تعیین می‌شود، در مسأله فرعی ثابت فرض می‌شود. بنابراین در مسأله فرعی، به ازای واحدهای مشخص، قابلیت اطمینان ارزیابی می‌شود. به این منظور سناریوهای بخش ۴، در مسأله فرعی لحاظ می‌شود. زیرنویس s نشان‌دهنده متغیرها در سناریو s است. تابع هدف مسأله فرعی مطابق رابطه‌ی (۹)، شامل هزینه بهره‌برداری واحدها، جریمه آلودگی و انرژی تأمین نشده می باشد. رابطه‌ی (۱۰)، برقراری توازن تولید و مصرف را تضمین می‌کند. هزینه بهره‌برداری واحدها به طور کلی شامل دو بخش متغیر و ثابت است که بخش متغیر مربوط به هزینه سوخت و بخش ثابت مربوط به هزینه تعمیرات و نگهداری است. هزینه بهره‌برداری واحدها و جریمه آلودگی مطابق (۱۱) و (۱۲) با رابطه‌ی خطی درجه یک نشان داده شده‌است. انرژی تأمین نشده، با توجه به بار تأمین نشده در (۱۳) محاسبه می‌شود و جریمه آن در (۱۴) به دست می‌آید. زمان بازیابی تولید P_g در رابطه‌ی (۱۵) محاسبه می‌شود. روابط (۱۶) و (۱۷) نیز حداقل توان رزرو واحدهای آبی و حرارتی را جهت تامین زمان بازیابی مورد نظر تولید، نشان می‌دهند و همان‌طور که در رابطه‌ی (۱۵) مشاهده می‌شود، مزارع بادی جهت تامین توان رزرو در نظر گرفته نمی‌شوند. روابط (۱۸) و (۱۹) به ترتیب، محدودیت تولید واحدهای حرارتی و آبی را نشان می‌دهد. محدودیت بار تأمین نشده در هر سناریو در (۲۰) آورده شده‌است.

$$SP = \mathrm{Min}\left(\sum_{i\epsilon \mathrm{U}} (CO_{ui,s} + PE^{con}_{ui,s}) + PE_{EENS}\right) \quad (۹)$$

$$\sum_{i\epsilon \mathrm{U}} P_{ui,s} + \sum_{k\epsilon \mathrm{W}} m_{wk} P_{wk,s} + \sum_{j\epsilon \mathrm{H}} P_{hj,s} + ls_s = P_{d,s} \quad (۱۰)$$

$$CO_{ui,s} = a_{ui} \times P_{ui,s} + b_{ui} \quad , \forall s \in \mathrm{S}, \forall i \in \mathrm{U} \quad (۱۱)$$

$$PE^{con}_{ui,s} = c_{ui} \times P_{ui,s} + d_{ui} \quad , \forall s \in \mathrm{S}, \forall i \in \mathrm{U} \quad (۱۲)$$

$$EENS = \sum_{s\epsilon \mathrm{S}} (ls_s\, T_s\, P_s) \quad (۱۳)$$

$$PE_{EENS} = CE \times EENS \quad (۱۴)$$

$$P_g / \left(\sum_{i\epsilon \mathrm{U}} m_{ui}\, rr_{ui} + \sum_{j\epsilon \mathrm{H}} m_{hj}\, rr_{hj}\right) < T_d \quad (۱۵)$$

$$T_d\, rr_{ui}\, m_{ui} < \bar{P}_{ui} - P_{ui,s} \quad \forall i \in \mathrm{U}, \forall s \in \mathrm{S} \quad (۱۶)$$

$$T_d\, rr_{hj} m_{hj} < \bar{P}_{hj} - P_{hj,s} \quad \forall j \in \mathrm{H}, \forall s \in \mathrm{S} \quad (۱۷)$$

$$m_{ui} P_{ui,min} < P_{ui,s} \le m_{ui} \bar{P}_{ui} \quad \forall i \in \mathrm{U}, \forall s \in \mathrm{S} \quad (۱۸)$$

$$m_{hj} P_{hj,min} < P_{hj,s} \le m_{hj} \bar{P}_{hj} \quad \forall j \in \mathrm{H}, \forall s \in \mathrm{S} \quad (۱۹)$$

$$0 \le ls_s \le P_{d,s} \quad \forall s \in \mathrm{S} \quad (۲۰)$$

که SP پاسخ مسأله فرعی، $P_{ui,s}$، $P_{wk,s}$ و $P_{hj,s}$ به ترتیب، تولید واحد حرارتی i ام، بادی k ام و آبی j ام در سناریو s هستند. $\bar{P}_{ui}$ و $\bar{P}_{hj}$ به ترتیب توان نامی واحد حرارتی i ام و آبی j ام و $P_{ui,min}$ و $P_{hj,min}$، به ترتیب حداقل تولید واحد حرارتی i ام و واحد آبی j ام می‌باشند. a_{ui}، b_{ui}، c_{ui} و d_{ui} به ترتیب هزینه‌های متغیر و ثابت بهره‌برداری و آلودگی نیروگاه حرارتی i ام هستند. ls_s، بار تامین نشده، T_s، تداوم زمانی بار تامین نشده و P_s، احتمال وقوع سناریوی s می باشند. $EENS$، امید ریاضی انرژی تامین نشده و CE ضریب جریمه آن است. rr_{ui} و rr_{hj} به ترتیب نرخ افزایش تولید واحد حرارتی i ام و واحد آبی j ام هستند. T_d، زمان بازیابی تولید P_g می‌باشد. $P_{d,s}$، نیز میزان بار الکتریکی در سناریوی s است.

۵-۲- مسأله‌ی اصلی

تابع هدف مسأله اصلی، مطابق رابطه‌ی (۲۱)، شامل هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های حرارتی، آبی و بادی می‌باشد. رابطه‌ی (۲۲)، پسخورد بهینگی[۲] است که در هر تکرار به مسأله اصلی اضافه می‌شود. در این رابطه، انرژی تأمین نشده از رابطه‌ی (۱۳) در مسأله فرعی به دست می‌آید و β_{si}، و δ_{sk}، ضرایب لاگرانژ مربوط به روابط (۱۸) و (۱۹) هستند. با اعمال پسخورد بهینگی در (۲۲) علاوه بر برقراری ارتباط مسائل اصلی و فرعی، سطح مورد انتظار قابلیت اطمینان نیز تامین می‌شود.

$$\mathrm{Min}\left(\sum_{i\epsilon U} CI_{ui}\, m_{ui} + \sum_{j\epsilon H} CI_{hj}\, m_{hj} \sum_{k\epsilon W} CI_{wk}\, m_{wk}\right) \quad (۲۱)$$

$$EENS + \sum_{s\epsilon \mathrm{S}} (ls_s\, T_s\, P_s)\Big(\sum_{i\epsilon \mathrm{U}} \beta_{si} \times (ls_s\, T_s\, P_s) \times (m_{ui} - \hat{m}_{ui}) + \sum_{j\epsilon \mathrm{H}} \delta_{sj} \times (m_{hj} - \hat{m}_{hj})\Big) < \alpha \quad (۲۲)$$

که $\hat{m}_h$ و $\hat{m}_u$ به ترتیب تعداد واحدهای آبی و حرارتی در تکرار قبل هستند و α، محدودیت امید ریاضی انرژی تامین نشده را نشان می‌دهد.

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، روش پیشنهادی برای شبکه ۲۴ باسه IEEE اجرا می‌شود. مشخصات شبکه، در مرجع [24] آورده شده‌است و از نرم‌افزار MATLAB ۲۰۱۵ استفاده شده‌است. سیستم به‌کار رفته دارای پردازشگر چهار هسته ای ۳/۵ مگاهرتز با ۱۶ گیگابایت رم است. فرض می‌شود که هر نیروگاه دارای ۴ واحد است و مشخصات انواع واحدهای نیروگاهی در جدول ۴ آورده شده‌است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]

جدول (۴): مشخصات انواع واحدهای نیروگاهی

نوع نیروگاه	نرخ تغییر تولید (مگاوات بر دقیقه)	هزینه آلودگی (دلار بر مگاوات ساعت)	هزینه بهره‌برداری (دلار بر مگاوات ساعت)	هزینه سرمایه‌گذاری (هزار دلار بر مگاوات)
بخاری	۶	۱۳	۲۰	۹۸۰
گازی	۱۲	۱۰	۲۵	۹۰۰
سیکل ترکیبی	۱۲	۱۱	۱۵	۱۱۴۰
بادی	-	۰	۰	۱۶۰۰
آبی	۱۰۰	۰	۰	۲۰۰۰

۶-۱- مقایسه‌ی زمان اجرا و تعداد سناریوها برای روش مونت‌کارلو و روش پیشنهادی جدید

یکی از مزایای مهم روش پیشنهادی، سرعت زیاد اجرا در مواجهه با مسائل عملی و بزرگ است. در صورتی‌که روابط مسأله با استفاده از ایجاد سناریو به روش معمول مونت کارلو حل شود، زمان اجرا و تعداد سناریوها مطابق جدول ۵ به طور قابل توجهی افزایش می یابد. با توجه به ابعاد بزرگ مسائل عملی، استفاده از روش مونت کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان در حضور متغیرهای با عدم قطعیت زمان‌بر است و از این جهت، روش پیشنهادی دارای مزیت مهمی است.

جدول (۵): مقایسه روش مونت کارلو و مدل‌سازی چندسطحی در ایجاد سناریو

روش ایجاد سناریو	زمان اجرا (دقیقه)	تعداد سناریو
روش پیشنهادی	۱۹	۱۵۵۲
مونت کارلو	۴۷	۱۸۷۵۱

۶-۲- تعیین نیروگاه‌های جدید بدون درنظرگرفتن واحدهای آبی و بادی

در این بخش، نیروگاه‌های بادی و آبی در نظر گرفته نمی‌شوند و محدودیت انرژی تامین نشده ۷۰۰ مگاوات ساعت در سال فرض می‌شود. به این ترتیب، خطوط و واحدهای نیروگاهی جدید مطابق جدول ۷ به دست می‌آید. مشاهده می‌شود که از آنجا که هزینه بهره‌برداری نیروگاه‌های سیکل ترکیبی کمتر از نیروگاه‌های گازی و بخاری است، ظرفیت بیشتری از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی انتخاب شده‌است. البته محدودیت قابلیت اطمینان در انتخاب واحدها تاثیر زیادی دارد. هر چه تعداد واحدهای بزرگ‌تر بیش‌تر باشد، قابلیت اطمینان سیستم کم‌تر می‌شود. زیرا با خروج واحدهای بزرگ‌تر، توان تولیدی بیش‌تری از دست می رود و در نتیجه شاخص‌های قابلیت اطمینان مانند انرژی تامین نشده افزایش می‌یابد.

۶-۳- درنظرگرفتن نیروگاه بادی

در این بخش، دو نیروگاه بادی کاندیدا مطابق جدول ۶ در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱، مشارکت بهینه مزارع بادی به ازای سرعت‌های مختلف باد در مناطق کاندیدا نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که سرعت باد عامل مهمی در تعیین ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های بادی است و با افزایش سرعت باد، مشارکت نیروگاه‌های بادی به طور قابل ملاحظه‌ای زیاد می‌شود. در شکل ۲، هزینه کل توسعه سیستم تولید و هزینه آلودگی به ازای مقادیر مختلف مشارکت بهینه‌ی مزارع بادی نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که با افزایش مشارکت بهینه مزارع بادی، هزینه کل و میزان آلودگی محیطی کاهش می‌یابند. به این ترتیب در نواحی با سرعت باد زیاد، احداث مزارع بادی بزرگ ضروری به نظر می‌رسد زیرا علاوه بر کاهش میزان آلودگی، هزینه‌ی کل سیستم را کم می کند.

جدول (۶): مشخصات نیروگاه‌های بادی کاندیدا

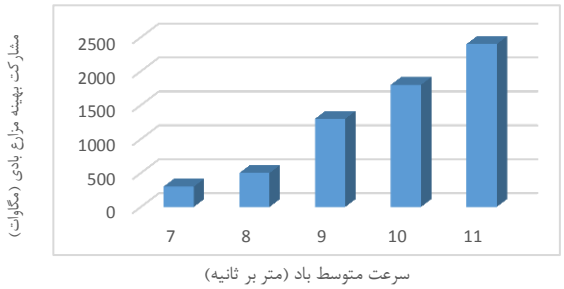
شماره شینه	ظرفیت نیروگاه کاندیدا (مگاوات)	متوسط سرعت باد (متر بر ثانیه)	انحراف معیار سرعت باد (متر بر ثانیه)
۱۴	۱۲۵۰	۹/۵	۳/۲
۱۷	۱۲۵۰	۸/۵	۲/۵

جدول (۷): نیروگاه‌های جدید بدون واحدهای بادی و آبی

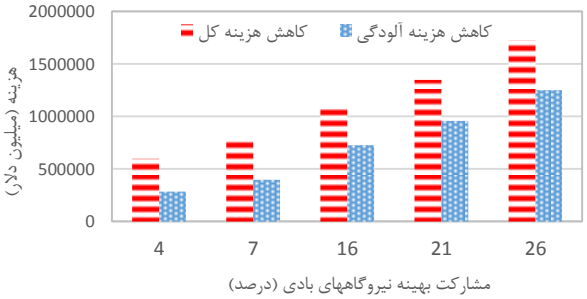
شماره شینه	نوع نیروگاه	ظرفیت کاندیدا (مگاوات)	ظرفیت انتخاب شده (مگاوات)	مجموع هزینه (میلیون دلار)
۱	بخاری	۵۷۶	۰	.
۲	بخاری	۵۷۶	۵۷۶	۱،۸۱۶،۴۷۳،۶۰۰
۷	بخاری موجود	۹۰۰	۹۰۰	۲،۸۳۸،۲۴۰،۰۰۰
۱۳	سیکل	۱۷۷۳	۱۱۸۰	۴،۱۷۴،۵۵۶،۸۰۰
۱۵	گازی	۶۴۵	۰	.
۱۶	گازی	۴۶۵	۰	.
۱۸	سیکل	۱۲۰۰	۸۰۰	۲،۸۳۰،۲۰۸،۰۰۰
۲۱	سیکل	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۲،۹۰۱،۳۱۲،۰۰۰
۲۲	بخاری	۹۰۰	۹۰۰	۲،۸۳۸،۲۴۰،۰۰۰
۲۲	سیکل	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۳،۵۳۷،۷۶۰،۰۰۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]



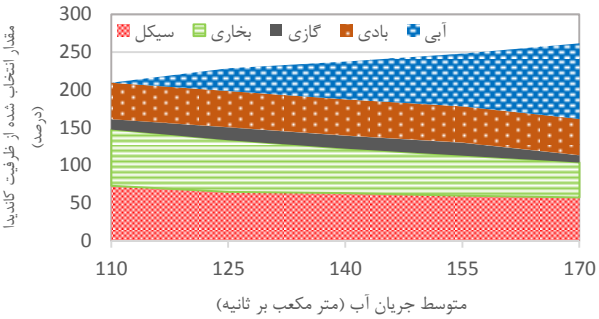
شکل (۱): ظرفیت بهینه مزارع بادی در سرعت‌های مختلف باد



شکل (۲): کاهش هزینه کل توسعه سیستم تولید و کاهش هزینه آلودگی با مشارکت مزارع بادی

۶-۴- درنظرگرفتن نیروگاه‌های آبی

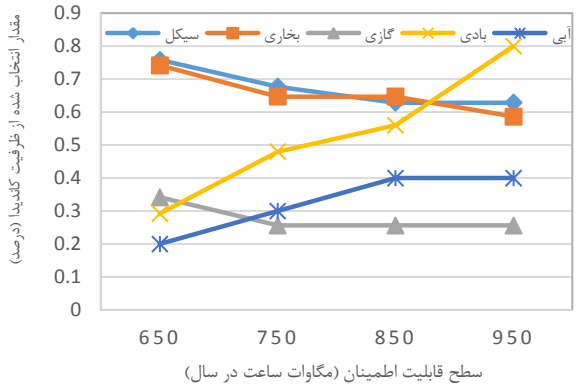
در این بخش، علاوه بر نیروگاه‌های بادی، یک نیروگاه‌های آبی کاندیدای ۲۰۰۰ مگاواتی با انحراف معیار ۳/۲ مترمکعب بر ثانیه برای جریان آب، در شینه ۴ در نظر گرفته می‌شود. خروج تولید به میزان ده درصد مجموع بار و زمان بازیابی تولید، دو دقیقه فرض می‌شوند. به ازای مقادیر مختلف متوسط فلوی آب، ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های مختلف در شکل ۳ آورده شده‌است. جهت ارزیابی بهتر، ظرفیت نیروگاه‌ها بر حسب درصدی از ظرفیت کاندیدا نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که با افزایش متوسط جریان آب، ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های آبی به طور چشم‌گیری افزایش می یابد و به ازای مقادیر زیاد متوسط جریان آب، مشارکت نیروگاه‌های آبی حتی از نیروگاه‌های حرارتی بیشتر است.



شکل (۳): ظرفیت بهینه¬ی نیروگاه‌ها به ازای مقادیر مختلف متوسط جریان آب

۶-۵- تاثیر سطح قابلیت اطمینان

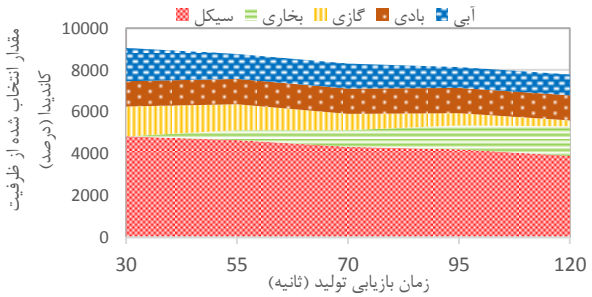
با کاهش سطح قابلیت اطمینان، نیاز به قدرت رزرو کم می‌شود. از طرفی با توجه به عدم قطعیت نیروگاه‌های آبی و بادی، با کاهش سطح قابلیت اطمینان مشارکت این نیروگاه‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۴، قدرت بهینه‌ی نیروگاه‌ها را به ازای مقادیر مختلف سطح قابلیت اطمینان مورد انتظار، نشان می دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح قابلیت اطمینان، ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های بادی و آبی افزایش می‌یابد اما ظرفیت سایر نیروگاه‌ها کم می‌شود.



شکل (۴): ظرفیت بهینه نیروگاه‌ها به ازای سطوح مختلف قابلیت اطمینان

۶-۶- توان رزرو انواع نیروگاه‌ها در بار پیک

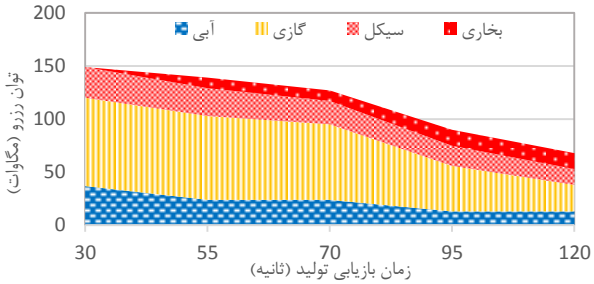
در این بخش، تاثیر زمان مورد انتظار بازیابی تولید، بر ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌ها ارزیابی می‌شود. شکل ۵، ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌ها را به ازای مقادیر مختلف زمان بازیابی تولید نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جهت کاهش زمان بازیابی تولید، ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های بخاری که پاسخ کندتری دارند، کاهش می‌یابد و در صورتی که بازیابی سریع تولید مد نظر باشد، نیاز به ظرفیت بیشتری از نیروگاه‌های آبی، گازی و سیکل ترکیبی است و در مجموع ظرفیت تولید بیشتری مورد نیاز است.



شکل (۵): ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌ها برای مقادیر مختلف زمان بازیابی تولید

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]

در برنامه‌ریزی سیستم تولید در این مقاله، قدرت رزرو بهینه واحدها در پیک بار به دست می‌آید. به این ترتیب مشخص می‌شود که کدام نیروگاه‌ها برای تامین توان رزرو در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۶، توان رزرو بهینه‌ی نیروگاه‌ها در پیک بار به ازای زمان‌های مختلف بازیابی تولید نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که با کاهش زمان بازیابی تولید، سهم رزرو واحدهای گازی، سیکل ترکیبی و آبی که سرعت پاسخ بیش‌تری دارند، افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با توجه به این‌که هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های گازی کم‌تر و هزینه‌ی تولید آنها بیش‌تر است، درصد بیش‌تری از این نیروگاه‌ها، جهت تامین رزرو در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۶): قدرت رزرو بهینه‌ی نیروگاه‌ها در پیک بار به ازای مقادیر مختلف زمان بازیابی تولید

۷- نتیجه

در این مقاله، روشی جدید جهت برنامه‌ریزی سیستم تولید با درنظرگرفتن نیروگاه‌های بادی و آبی معرفی شد. مدل چندسطحی هم‌زمان برای بار الکتریکی و نیروگاه‌های بادی و آبی به دست آمد و به این ترتیب با کاهش تعداد سناریوها، سطح مورد انتظار قابلیت اطمینان در روابط مسأله در نظر گرفته شد و نشان داده شد که با کاهش سطح قابلیت اطمینان، ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های بادی و آبی افزایش و ظرفیت بهینه سایر نیروگاه‌ها کاهش می یابد. مشاهده شد که افزایش سرعت متوسط باد و جریان متوسط آب، سبب افزایش چشم‌گیر ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های بادی و آبی می‌شود. همچنین مشخص شد که تعیین ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های بادی و آبی اهمیت زیادی دارد و هزینه کل و آلودگی محیطی را کاهش می‌دهد. همچنین تاثیر زمان بازیابی تولید مد نظر قرار گرفت و نشان داده شد که با کاهش زمان مورد انتظار بازیابی تولید، ظرفیت بهینه‌ی نیروگاه‌های آبی، گازی و سیکل ترکیبی و توان رزرو آنها در پیک بار افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] Park, H., Baldick, R., *"Multi-year stochastic generation capacity expansion planning under environmental energy policy"*, Appl. Energy, Vol. 183, pp. 737–745, 2016.

[2] Rajesh K., Kannan S., Thangaraj C., *"Least cost generation expansion planning with wind power plant Incorporating emission using Differential Evolution Algorithm"*, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 80 pp. 275–286, 2016.

[3] Queiroz A.R., *"Stochastic hydro-thermal scheduling optimization: An overview"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 65, pp. 382–395, 2016.

[4] Bakirtzis G.A., Biskas P.N., Chatziathanasiou V., *"Generation Expansion Planning by MILP considering mid-term scheduling decisions"*, Electr. Power Syst. Res., Vol. 86, pp. 98– 112, 2012.

[5] Youa, S., Hadleyb, W., Shankarb, M., Liua, Y., *"Co-optimizing generation and transmission expansion with wind power in large-scale power grids-Implementation in the US Eastern Interconnection"*, Electr. Power Syst. Res., Vol. 133, pp. 209–218, 2016.

[6] Hong S., Cheng H., Zeng P., *"N-K constrained composite generation and transmission expansion planning with interval load"*, IEEE Access, Vol. 5, pp. 2779 –89, 2017.

[7] Ahmadi A., Mavalizadeh H., Zobaa A.F., Shayanfar H. A., *"Reliability-based model for generation and transmission expansion planning"*, IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 31, No. 2, pp. 1-8, 2016.

[8] Zhang N, Hu Z, Shen B, Dang S, Zhang J, Zhou Y.A., *"source–grid–load coordinated power-planning model considering the integration of wind power generation"* Appl Energy, 168, 13–24, 2016.

[9] Moeini-Aghtaie M, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M., *"Incorporating large-scale distant wind farms probabilistic transmission expansion planning—part I: theory and algorithm"* IEEE Trans. Power Syst., Vol. 27, pp. 1585-93, 2012.

[10] Arabali A., , Ghofrani M., Etezadi-Amoli M., Sami Fadali M., Moeini-Aghtaie M., *"A multi-objective transmission expansion planning framework in deregulated power systems with wind generation"*, IEEE Trans. on Power Syst., Vol. 29, No. 6, pp. 3003-3011, 2014.

[11] Aghaei J., Akbari M.A., Roosta A., Baharvandi A., *"Multi objective generation expansion planning considering power system adequacy"*, Electric Power Systems Research, Vol. 102, pp. 8– 19, 2013.

[12] Jadidoleslam M., Ebrahimi A., *"Reliability constrained generation expansion planning by a modified shuffled frog leaping algorithm"*, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, pp. 743–751, 2015.

[13] Pineda, S., Morales, J.M., Ding, Y., Østergaard, J., *"Impact of equipment failures and wind correlation on generation expansion planning"*, Electr. Power Syst., Res., Vol. 116, pp. 451–458, 2014.

[14] Alizadeh B., Jadid S., *"A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems"*, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 65, pp. 408–418, 2015.

[15] Brandi B.S., Ramosa T.P., David P.A.M., *"Maximizing hydro share in peak demand of power systems long-term operation planning"*, Electr. Power Syst. Res., Vol. 141, pp. 264–271, 2016.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]

[16] Kamalinia S., Shahidehpour M., *"Generation expansion planning in wind-thermal power systems Maximizing hydro share in peak demand of power systems long-term operation planning"*, IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 4, No. 8, pp. 940–951, 2010.

[17] Takigawa F.Y.K., da Silva E.L., Finardi E.C., Rodrigues R.N., *"Solving the hydro-thermal scheduling problem considering network constraints"* Electr. Power Syst. Res. Vol. 88, pp. 89–97, 2012.

[18] Rebennack S., Flach B., Pereira M.V.F., Pardalos P.M., *"Stochastic hydro-thermal scheduling under CO2 emissions constraints"* IEEE Trans. Power Syst. Vol. 27 No.1, pp. 58–68, 2012.

[19] Xie, K., Dong, J., Singh, C., Hua, B., *"Optimal capacity and type planning of generating units in a bundled wind-thermal generation system"*, App. Energy, Vol. 164, pp. 200–210, 2016.

[20] Rebennack S., *"Generation expansion planning under uncertainty with emissions quotas"*, Electr. Power Syst. Res., Vol. 114, pp. 78–85, 2014.

[21] Pereira, S., Ferreira, P., Vaz, A., *"Generation expansion planning with high share of renewables of variable output"*, Appl. Energy, Vol. 190, pp. 1275–1288, 2017.

[22] Javadi, M.S., Saniei, M., Mashhadi, H.R., Gutiérrez-Alcaraz G., *"Multi-objective expansion planning approach: distant wind farms and limited energy resources integration"*, IET Renew. Power Gener., Vol. 7, pp. 652–668, 2013.

[23] Ugranli, F., Karatepe, E., *"Transmission expansion planning for wind turbine integrated power systems considering contingency"*, IEEE Trans. Power Syst., Vol. 31, pp. 1476-1485, 2016.

[24] IEEE Committee Report, *"IEEE reliability test system"*, IEEE Trans. Power Apparatus and Sys., pp. 2047-2054, 1979.

زیرنویس‌ها

۱ Expected Energy Not Supplied

۲ Optimality cut

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.6.2]