

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال سیزدهم، شماره ۳، زمستان ۱۴۰۱، (پیاپی ۵۲): صص ۱۰-۱

علمی - پژوهشی

بهره‌برداری بهینه از سیستم تأمین آب-انرژی یک ریزشبنکه جزیره‌ای با چند حامل انرژی با هدف ارتقاء تاب‌آوری در مقابل حملات سایبری

علیرضا کریمی سعیدآبادی^۱، سید بابک مظفری^{۲*}، سودابه سلیمانی مورچه‌خورتی^۲، حسین محمدنژاد شورکایی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰

چکیده

ریزشبنکه‌های دارای چندین حامل انرژی با تکیه بر امکانات تبدیل انرژی، ساختاری انعطاف‌پذیر و بسیار کارآمد را برای تأمین انرژی مصرفی و آب آشامیدنی فراهم می‌کنند. افزایش تقاضا برای مصرف انرژی به همراه کمبود آب آشامیدنی، از مسائل چالش‌برانگیز در زندگی امروزی به حساب می‌آیند. از آنجاکه زیرساخت‌های تأمین آب آشامیدنی برای بهره‌برداری به انرژی الکتریکی قابل‌توجهی نیاز دارند، این امر منجر به ایجاد وابستگی بین سیستم‌های تأمین آب و انرژی می‌شود. در این مقاله، یک رویکرد مدیریت بهینه آب-انرژی یکپارچه برای یک ریزشبنکه جزیره‌ای شده به منظور تأمین تقاضاهای الکتریکی، گرمایش، سرمایش و آب آشامیدنی، با صرف کمترین هزینه ممکن، پیشنهاد شده است. ریزشبنکه پیشنهادی به منابع تولید هم‌زمان برق و گرمایش، چیلر جذبی، بویلرهای الکتریکی و گازی، توربین بادی، واحد آب‌شیرین‌کن و انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مجهز است. تابع هدف به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی صحیح خطی آمیخته با اعداد صحیح بیان می‌شود. مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به تقاضاهای انرژی و توان تولیدی توربین‌های بادی نیز بر اساس برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو می‌باشد. همچنین به منظور در نظر گرفتن حملات سایبری به توربین‌های بادی در مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی، از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی استفاده می‌شود که بهره‌بردار را قادر می‌سازد با متحمل شدن یک هزینه قابل‌قبول، برنامه‌ریزی تأمین انرژی و آب آشامیدنی را در برابر حملات سایبری به توربین‌های بادی، استوار سازد. در نظر گرفتن نقش حامل‌های انرژی به‌غیر از برق و آب به همراه استفاده از مفهوم تاب‌آوری در بهره‌برداری بهینه از سیستم تأمین آب-انرژی در یک ریزشبنکه جزیره‌ای، از نوآوری‌های مدل پیشنهاد شده هستند. در پایان نتایج عددی نشان می‌دهند که بهره‌بردار می‌تواند اثر حملات سایبری بر هزینه بهره‌برداری را بدون حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز آب-انرژی به میزان ۵/۱ درصد و در حضور این منابع به میزان ۱۰ درصد کاهش دهد که منجر به افزایش تاب‌آوری سیستم در برابر چنین حملاتی خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: ریزشبنکه جزیره‌ای، مدیریت آب-انرژی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، سیستم‌های چندحامل انرژی، واحد آب‌شیرین‌کن.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران - نویسنده مسئول (mofazfari@srbiau.ac.ir)

۳- استاد گروه مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- استادیار گروه مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها از یک روش مقاوم بدون نیاز به تابع چگالی احتمال استفاده می‌شود که طی آن، بهترین و بدترین شرایط ناشی از عدم قطعیت در تقاضای انرژی الکتریکی به ترتیب تحت دو استراتژی ریسک‌پذیر و ریسک‌گریز، به دست می‌آیند. در مرجع [۷]، از برنامه‌ریزی تصادفی برای برنامه‌ریزی روز پیش یک سیستم چند ریزشبکه‌ای در یک محیط غیرقطعی استفاده شده است که در کنار واحدهای تولیدی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، از واحدهای با سوخت زغال‌سنگ نیز استفاده می‌شود که ممکن است دارای مشکلات زیست‌محیطی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای باشند. در مرجع [۸]، یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح برای حل توزیع اقتصادی یک ریزشبکه، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف پیشنهاد شده است. هدف اصلی مدل پیشنهاد شده، یافتن راه‌حل بهینه برای توزیع اقتصادی ریزشبکه‌ها در سیستم‌های قدرت است که در آن محدودیت‌های فنی شبکه در نظر گرفته می‌شود. در مرجع [۹]، نویسندگان به بررسی برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ریزشبکه‌های برق و حرارت متصل به شبکه می‌پردازند که هدف، حل مسئله چندهدفه شامل به حداقل رساندن هزینه‌ها و انتشار آلاینده‌ها با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی به تقاضا و عدم قطعیت‌ها می‌باشد. در مرجع [۱۰]، یک ریزشبکه طراحی شده است که در آن واحد CHP، باد، خورشید، ذخیره‌ساز حرارتی، میکرو توربین و پیل سوختی بارها را تأمین می‌کنند و ارتباط بین برق و حرارت در واحد CHP چندضلعی می‌باشد که جامع‌ترین نمونه در مدل‌سازی این واحدها تاکنون است. در مرجع [۱۱]، یک تابع چندهدفه شامل هزینه‌های خالص مرتبط با ریزشبکه چند حامل انرژی پیشنهاد شده که یک مدل ابتکاری، توسعه یافته و اقتصادی برای برنامه‌های پاسخگویی به تقاضای مبتنی بر قیمت، همراه با برنامه‌های پاسخ به تقاضای داوطلبانه و اجباری، می‌باشد. در مرجع [۱۲]، یک مدل تصادفی برای مدیریت بهینه ریزشبکه‌های مبتنی بر برق و حرارت، با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و قابلیت اطمینان ارائه شده است که در آن عدم قطعیت‌های پیش‌بینی تقاضای بار الکتریکی و توان باد با استفاده از یک رویکرد تصادفی مبتنی بر سناریو، مدل شده‌اند.

در مرجع [۱۳]، یک مدل برنامه‌ریزی برای کاهش دادن هزینه مصرف انرژی ریزشبکه آب-انرژی ارائه شده است. همچنین، برای به حداقل رساندن هزینه روزانه انرژی در آن ریزشبکه، یک مدل توزیع اقتصادی روز پیش ارائه شده است که مصرف انرژی سیستم آب با استفاده از برنامه‌ریزی و عملکرد مخزن و پمپ آن، عوامل هیدرولیکی و تقاضای روزانه، به حداقل ممکن می‌رسد. در مرجع [۱۴]، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح، برای توزیع هوشمند تولیدات پراکنده،

در سال‌های اخیر به دلیل مشکلاتی از قبیل افزایش درخواست انرژی مصرفی و درعین حال کمبود منابع انرژی متعارف و نیز قدیمی شدن زیرساخت‌های سیستم توزیع انرژی، شبکه برق با چالش‌هایی مواجه شده است. تولید برق و تأمین بارهای مختلف از طریق منابع انرژی محلی منجر به ظهور مفهوم جدیدی به نام ریزشبکه شده است. ریزشبکه یک سیستم قدرت در مقیاس کوچک است که می‌تواند انرژی مصرف‌کنندگان را تأمین کند و در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه کار می‌کند [۱]. با ادغام منابع با چندین حامل انرژی در یک ریزشبکه، مانند بویلرها، واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP^۱) و چیلرها، می‌توان ریزشبکه‌های با چندین حامل انرژی (MMGs^۲) را تشکیل داد. این ساختار دارای مزایایی مانند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش هزینه‌های تأمین انرژی و افزایش بهره‌وری از طریق اعمال یک مدل سیستم انرژی یکپارچه، است [۲]. MMG می‌تواند تقاضاهای الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی را به طور هم‌زمان برآورده کند. منابع تولید هم‌زمان برق و گرمایش می‌توانند تولید انرژی را در حدود ۳۰ درصد در نیروگاه‌ها افزایش دهند، درحالی‌که انتشار گازهای گلخانه‌ای را تقریباً ۱۸-۱۳ درصد کاهش می‌دهند که نشان‌دهنده مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی چنین منابعی است [۳]. از سوی دیگر، توسعه اقتصادی همراه با رشد سریع جمعیت و شهرنشینی، به طور قابل توجهی بر منابع حیاتی مانند آب و انرژی تأثیر می‌گذارد. طبق آمار، تقاضاهای انرژی و آب تا سال ۲۰۳۵ به ترتیب حدود ۴۰ درصد و ۳۰ درصد رشد خواهند داشت [۴]. سیستم‌های آب و انرژی به طور جدایی‌ناپذیری به یکدیگر وابسته هستند به طوری که مراحل مختلف تولید انرژی نیازمند بهره‌گیری از آب است. این در حالی است که استخراج، تحویل، توزیع و تصفیه آب نیز نیازمند مصرف انرژی است؛ لذا مدیریت و بهینه‌سازی یکپارچه سیستم‌های تأمین آب و انرژی می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های تأمین آب و انرژی، به بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان کمک کند [۵]. سیستم‌های آب-انرژی یکپارچه می‌توانند راه‌حلی امیدوارکننده برای بهبود مدیریت انرژی و منابع آب در جزایر، جوامع روستایی و بسیاری از نقاط جهان، که فاقد زیرساخت‌های بهینه برای تأمین انرژی هستند، باشند.

بسیاری از مراجع بر برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی ریزشبکه‌ها بدون توجه به وابستگی بین حامل‌های آب و انرژی، متمرکز شده‌اند. در مرجع [۶]، برای دستیابی به برنامه‌ریزی بهینه

^۱ Combined heat and power

^۲ Multi-energy microgrids

در مرجع [۲۱]، یک روش بهره‌برداری هماهنگ برای سامانه‌های انرژی منطقه‌ای-ناحیه‌ای، جهت بهبود تاب‌آوری در شرایط بحرانی آب و هوایی پیشنهاد می‌شود که در آن از فناوری برق به گاز، با هدف بهبود تاب‌آوری سیستم تأمین انرژی ترکیبی، استفاده می‌شود. در مرجع [۲۲]، ارزیابی هماهنگ تاب‌آوری و بهبود بهره‌برداری ریزشکه‌های هوشمند به‌صورت جزیره‌سازی مقاوم انجام گردیده است. در [۲۳]، یک روش بهینه‌سازی مقاوم سه سطحی برای بهبود انعطاف‌پذیری شبکه‌های توزیع برق و گاز با توجه به بدترین شرایط (خروج خطوط شبکه) معرفی شده که با استفاده از تئوری دوگان به یک مسئله تک‌سطحی تبدیل شده است.

در مطالعات ذکر شده به‌طور عمده بهینه‌سازی سیستم‌های آب-انرژی با در نظر گرفتن حامل‌های برق و آب، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و نقش دیگر حامل‌های انرژی در توسعه یک سیستم آب-انرژی پر بازده، نادیده گرفته شده است. همچنین در مطالعات ذکر شده بر مفهوم تاب‌آوری در ریزشکه‌های آب-انرژی اشاره قابل‌توجهی نشده است. در این مقاله یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی به‌منظور مدیریت آب-انرژی یک ریزشکه جزیره‌ای در حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز آب، برق، سرمایه‌ش و گرمایش ارائه می‌شود. هدف از مدل پیشنهادی حداقل کردن هزینه تأمین تقاضاهای الکتریکی، سرمایه‌ش، گرمایش و آب آشامیدنی در حضور انواع گوناگونی از فناوری‌های تبدیل انرژی همانند CHP، چیلر الکتریکی و حرارتی، بویلر برقی و گازی و واحد آب‌شیرین‌کن است. بعلاوه به‌منظور افزایش تاب‌آوری سیستم در برابر حملات سایبری به منابع انرژی تجدیدپذیر از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی (IGDT) نیز استفاده می‌شود. این رویکرد بهره‌بردار را قادر می‌سازد که تحت یک هزینه بهره‌برداری تضمین شده، اثر حملات بر برنامه‌ریزی ریزشکه را کاهش دهد. بعلاوه به‌منظور مدل‌سازی عدم قطعیت توان تولیدی باد و تقاضای الکتریکی، از برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو استفاده می‌شود. در نظر گرفتن نقش حامل‌های انرژی به‌غیر از برق و آب به همراه استفاده از مفهوم تاب‌آوری در بهره‌برداری بهینه از سیستم تأمین آب-انرژی در یک ریزشکه جزیره‌ای، از نوآوری‌های مدل پیشنهاد شده هستند.

۲- مدل‌سازی مسئله

۲-۱- مدل‌سازی مسئله بدون لحاظ کردن حملات

سایبری

هدف از مدل پیشنهادی، حداقل کردن هزینه بهره‌برداری

مدیریت انرژی حرارتی ساختمان و تأمین تقاضای آب در یک ریزشکه انرژی-آب جزیره‌ای پیشنهاد شده است. مرجع [۱۵]، یک مدل جزیره‌ای هوشمند را در سیستم قدرت ارائه می‌دهد که شرایط بهینه‌ای را برای تأمین آب موردنیاز ریزشکه، که به واحد آب‌شیرین‌کن نیز مجهز است، فراهم می‌کند. در این روش با استفاده از آب دریا، هزینه‌های موردنیاز تأمین آب در بخش‌های مختلف کاهش یافته است. در مرجع [۱۶]، یک چارچوب برنامه‌ریزی جامع برای افزایش حالت ارتجاعی شبکه توزیع برق و شبکه توزیع آب، با ریزشکه‌های متعدد، در برابر توفان‌ها پیشنهاد شده است. سخت شدن خطوط در شبکه توزیع برق، بالا بردن ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی در ریزشکه‌ها و مخازن آب در شبکه توزیع آب، به‌عنوان سه استراتژی پیشنهادی، در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۷]، یک چارچوب مدیریت جدید برای ریزشکه آب-انرژی ارائه شده است که این برنامه‌ریزی، کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و همچنین هزینه‌های آلاینده‌های زیست‌محیطی را به حداقل ممکن می‌رساند. در مرجع [۱۸]، از واحدهای آب‌شیرین‌کن صنعتی که از برق برای تبدیل آب شور به آب آشامیدنی استفاده می‌کنند، برای رفع کمبود آب شیرین پیشنهاد شده است. همچنین به‌منظور به حداقل رساندن هزینه‌های تأمین انرژی و آب شیرین استخراج شده از مخازن زیرزمینی، از یک روش چندهدفه استفاده شده است.

به‌منظور تأمین پایدار انرژی در ریزشکه‌ها، مفهوم تاب‌آوری اهمیت بسزایی پیدا می‌کند. مفهوم تاب‌آوری به‌صورت «ظرفیت بازگشتن از دشواری پایدار و ادامه‌دار و توانایی ترمیم خود» تعریف می‌شود. این عبارت، تاب‌آوری را شامل مجموعه‌ای از ظرفیت‌هایی می‌داند که در شرایط دشوار به سیستم کمک می‌کنند تا بتواند با حداقل خسارت و آسیب از پیشامدهای غیرمنتظره عبور کرده و با نهایت توان با شرایط بسیار نامطلوب مقابله نماید. در مرجع [۱۹] یک رویکرد دوهدفه/دوسطحی برای مسئله حفاظت اجزای شبکه برق با توجه به سامانه‌های دفاعی مختلف ارائه می‌شود که در آن، مدافع به‌عنوان یک رهبر سعی می‌کند دو هدف، یعنی انتخاب انواع مختلف سامانه دفاعی برای محافظت از امکانات و همچنین کل هزینه برای تأمین خواسته‌های دفاعی را به‌طور هم‌زمان بهینه کند. مهاجم نیز به دنبال به حداکثر رساندن تخریب برای سامانه خدمات است. در مرجع [۲۰]، یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی توسعه سامانه‌های انتقال و ذخیره انرژی الکتریکی برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر حملات تروریستی ارائه شده است که در آن، واحدهای تولید توان و مقدار بار مصرفی، در آفق برنامه‌ریزی مشخص شده‌اند و تغییرات بار روزانه در فصول مختلف نیز در نظر گرفته شده است.

$$0 \leq P_{g,t,s} \leq P_g^{\max} \quad (۲)$$

$$P_{g,t,s} - P_{g,t-1,s} \leq R_g^{up} \quad (۳)$$

$$P_{g,t-1,s} - P_{g,t,s} \leq R_g^{dn} \quad (۴)$$

$$H_{g,t,s} = \frac{P_{g,t,s}(1 - \eta_g - \eta_g^l)}{\eta_g} \quad \forall g \in CHP \quad (۵)$$

در روابط فوق، P_g^{\max} ، R_g^{up} و R_g^{dn} حداکثر توان تولیدی توربین گازی، نرخ تغییرات افزایشی و کاهش میکرورتوربین گازی را نشان می‌دهند. $P_{g,t,s}$ و $H_{g,t,s}$ توان و حرارت تولیدی توسط توربین گازی را نشان می‌دهند. η_g و η_g^l به ترتیب بازده توربین گازی و تلفات در حین تولید حرارت را نشان می‌دهند.

سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی: محدودیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در روابط (۶) و (۷) آمده است. وضعیت سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در رابطه (۸) آمده است. برابری شرایط ابتدایی و انتهایی سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در رابطه (۹) آمده است. در نهایت میزان سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی توسط حداقل و حداکثر مقدار بایستی محدود شود که در رابطه (۱۰) آمده است.

$$0 \leq P_{t,s}^{dis} \leq P_{t,s}^{dis_max} \quad (۶)$$

$$0 \leq P_{t,s}^{ch} \leq P_{t,s}^{ch_max} \quad (۷)$$

$$ES_{t,s} = ES_{t-1,s} + \eta_{es}^{ch} P_{t,s}^{ch} - \frac{P_{t,s}^{dis}}{\eta_{es}^{dis}} \quad (۸)$$

$$ES_{t=24,s} = ES_{t=0,s} \quad (۹)$$

$$ES^{\min} \leq ES_{t,s} \leq ES^{\max} \quad (۱۰)$$

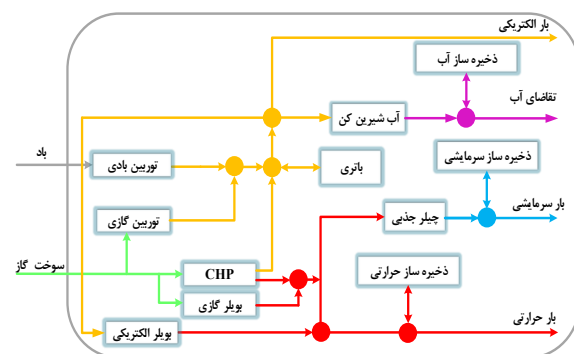
در روابط فوق، $P_{t,s}^{ch}$ توان ذخیره‌ساز الکتریکی در حالت شارژ است. $ES_{t,s}$ سطح انرژی ساعتی ذخیره‌ساز الکتریکی را نشان می‌دهد. ES^{\min} و ES^{\max} حداقل ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی می‌باشند. η_{es}^{ch} و η_{es}^{dis} به ترتیب بازده شارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی هستند.

به‌طور مشابه، قیدهای مربوط به سیستم ذخیره‌ساز گرمایشی نیز به‌صورت زیر قابل بیان است.

$$0 \leq H_{t,s}^{dis} \leq H_{t,s}^{dis_max} \quad (۱۱)$$

$$0 \leq H_{t,s}^{ch} \leq H_{t,s}^{ch_max} \quad (۱۲)$$

ریزشبکه آب-انرژی است. شکل (۱) ارتباط بین حامل‌های انرژی مختلف را نشان می‌دهد. تابع هدف مدل پیشنهادی به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح در (۱) بیان می‌شود که شامل پنج بخش است. بخش اول مصرف گاز ریزشبکه را نشان می‌دهد. بخش دوم تابع هدف هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی را نشان می‌دهد. بخش سوم و چهارم به ترتیب هزینه سیستم‌های ذخیره‌ساز سرمایشی و حرارتی را نشان می‌دهد. بخش پنجم تابع هدف نیز هزینه قطع بار را نشان می‌دهد.



شکل (۱). مدل ریزشبکه آب-انرژی پیشنهادی

$$\min \sum_{s=1}^{NS} p_s \left(\sum_{t=1}^T \lambda^{gas} P_{s,t}^{gas} + \sum_{t=1}^T \lambda^{es} P_{t,s}^{dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{cs} C_{t,s}^{dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{hs} H_{t,s}^{dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{lsh} L_{t,s}^{lsh} \right) \quad (۱)$$

در روابط فوق، t و s شاخص زمان و سناریوها را نشان می‌دهند. $P_{t,s}^{dis}$ ، $H_{t,s}^{dis}$ ، $C_{t,s}^{dis}$ و $L_{t,s}^{lsh}$ به ترتیب گاز مصرف شده، توان دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی، توان دشارژ ذخیره‌ساز گرمایشی، توان دشارژ ذخیره‌ساز سرمایشی و بار الکتریکی تأمین نشده را نشان می‌دهند. λ^{gas} ، λ^{es} ، λ^{hs} ، λ^{cs} و λ^{lsh} به ترتیب هزینه بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی، حرارتی، سرمایشی، قیمت گاز و تقاضای الکتریکی تأمین نشده را نشان می‌دهند.

توربین‌های گازی: محدودیت‌های مربوط به توربین‌های گازی در روابط (۲) تا (۵) بیان شده‌اند. محدودیت توان تولیدی توربین‌های گازی توسط (۲) قابل بیان است. محدودیت نرخ تغییرات توان توسط روابط (۳) و (۴) بیان می‌شوند. قید (۵) نیز رابطه بین توان و حرارت تولیدی توسط توربین‌های گازی از نوع CHP را نشان می‌دهد.

نشان می‌دهند. $I_{t,s}^{ch}$ و $I_{t,s}^{dis}$ به ترتیب متغیرهای باینری مربوط به وضعیت قرارگیری ذخیره‌ساز در حالت دشارژ و شارژ هستند. $LS_{t,s}$ سطح آب ساعتی ذخیره‌ساز را برحسب متر نشان می‌دهد. LS^{\max} حداکثر ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز است. CS سطح مقطع سیستم ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد.

$$P_{t,s}^d = \eta^d Q_{t,s}^d \quad (21)$$

$$0 \leq Q_{t,s}^d \leq Q^{d,max} \quad (22)$$

$$LS_{t,s} = LS_{t-1,s} + \frac{Q_{t,s}^{ch}}{CS} - \frac{Q_{t,s}^{dis}}{CS} \quad (23)$$

$$0 \leq LS_{t,s} \leq LS^{\max} \quad (24)$$

$$Q_{t,s}^{ch} \leq Q^{ch,max} I_{t,s}^{ch} \quad (25)$$

$$Q_{t,s}^{dis} \leq Q^{dis} I_{t,s}^{dis} \quad (26)$$

$$I_{t,s}^{ch} + I_{t,s}^{dis} \leq 1 \quad (27)$$

$$P_{t,s}^{pump} = Q_{t,s}^{ch} L^G \frac{g\phi}{\eta^{PWL} (3.6 \times 10^6)} \quad (28)$$

چیلر جذبی: در این مقاله از چیلر جذبی^۱ به‌منظور تأمین سرمایه‌ساز سیستم آب-انرژی پیشنهادی استفاده می‌شود. در معادله (۲۹) رابطه بین سرمایه‌ساز تولیدی ($C_t^{chiller}$) و حرارت مصرفی (H_t^c) توسط چیلر جذبی بیان می‌شود. محدودیت تولید سرمایه‌ساز چیلر جذبی (C^{c-max}) توسط رابطه (۳۰) قابل‌بیان است.

$$C_t^{chiller} = \eta^{chiller} H_t^c \quad (29)$$

$$0 \leq C_t^{chiller} \leq C^{c-max} \quad (30)$$

بویلر گازی و الکتریکی: از بویلر گازی و الکتریکی به‌منظور تأمین بخشی از تقاضای گرمایشی استفاده می‌شود. محدودیت تولید حرارت بویلر گازی (H_t^b) توسط معادله (۳۱) بیان می‌شود. معادله (۳۲) رابطه بین برق مصرفی و حرارت تولیدی توسط بویلر الکتریکی (H_t^{eb}) را نشان می‌دهد. حرارت تولید شده توسط بویلر الکتریکی توسط معادله (۳۳) نشان داده می‌شود.

$$0 \leq H_{t,s}^b \leq H^{b-max} \quad (31)$$

$$H_{t,s}^{eb} = \eta^{eb} P_{t,s}^h \quad (32)$$

$$0 \leq H_{t,s}^{eb} \leq H^{eb-max} \quad (33)$$

$$HS_{t,s} = HS_{t-1,s} + \eta_{hs}^{ch} H_{t,s}^{ch} - \frac{H_{t,s}^{dis}}{\eta_{hs}^{dis}} \quad (13)$$

$$HS_{t=24,s} = HS_{t=0,s} \quad (14)$$

$$HS^{\min} \leq HS_{t,s} \leq HS^{\max} \quad (15)$$

در روابط فوق، $H_{t,s}^{ch}$ حرارت ذخیره‌ساز حرارتی در حالت شارژ است. $HS_{t,s}$ سطح انرژی ساعتی ذخیره‌ساز گرمایشی را نشان می‌دهد. HS^{\max} و HS^{\min} حداکثر و حداقل ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز گرمایشی می‌باشند. η_{hs}^{ch} و η_{hs}^{dis} به ترتیب بازده دشارژ و شارژ سیستم ذخیره‌ساز گرمایشی هستند.

مشابه با سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی و گرمایشی، قیود سیستم ذخیره‌ساز سرمایه‌ساز نیز توسط روابط زیر بیان می‌شوند.

$$0 \leq C_{t,s}^{dis} \leq C^{dis,max} \quad (16)$$

$$0 \leq C_{t,s}^{ch} \leq C^{ch,max} \quad (17)$$

$$CS_{t,s} = CS_{t-1,s} + \eta_{hs}^{ch} C_{t,s}^{ch} - \frac{C_{t,s}^{dis}}{\eta_{hs}^{dis}} \quad (18)$$

$$CS_{t=24,s} = CS_{t=0,s} \quad (19)$$

$$CS^{\min} \leq CS_{t,s} \leq CS^{\max} \quad (20)$$

در روابط فوق، $C_{t,s}^{ch}$ سرمایه‌ساز ذخیره‌ساز سرمایه‌ساز در حالت شارژ است. $CS_{t,s}$ سطح انرژی ساعتی ذخیره‌ساز سرمایه‌ساز را نشان می‌دهد. CS^{\max} و CS^{\min} حداکثر و حداقل ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز سرمایه‌ساز می‌باشند. η_{cs}^{ch} و η_{cs}^{dis} به ترتیب بازده دشارژ و شارژ سیستم ذخیره‌ساز سرمایه‌ساز هستند.

واحد آب‌شیرین‌کن و ذخیره‌ساز آب: توان مصرف شده

توسط واحد آب‌شیرین‌کن ($P_{t,s}^d$) برای حذف نمک از آب دریا و تولید آب آشامیدنی ($Q_{t,s}^d$) توسط معادله (۲۱) بیان می‌شود. ماکزیمم آب آشامیدنی حاصل شده از واحد آب‌شیرین‌کن ($Q^{d,max}$) در هر ساعت توسط (۲۲) محدود می‌شود. مقدار آب موجود در سیستم ذخیره‌ساز در هر ساعت توسط (۲۳) برآورد می‌شود. ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز آب توسط (۲۴) محدود می‌شود. محدودیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز آب توسط معادلات (۲۵) و (۲۶) محدود می‌شود. سیستم ذخیره‌ساز نمی‌تواند هم‌زمان در حالت شارژ و دشارژ باشد که این مسئله توسط معادله (۲۷) بیان شده است. رابطه (۲۸) نیز میزان برق مصرفی جهت پمپاژ آب در طی ذخیره‌سازی آب را نشان می‌دهد. در روابط بیان شده، $Q_{t,s}^{ch}$ و $Q_{t,s}^{dis}$ آب ذخیره‌شده و تخلیه‌شده را

¹ Absorption chiller

$$\max \alpha \quad (39)$$

$$\sum_{s=1}^{NS} P_s \left(\begin{array}{l} \sum_{t=1}^T \lambda^{gas} P_{s,t}^g + \sum_{t=1}^T \lambda^{es} P_{t,s}^{dis} \\ + \sum_{t=1}^T \lambda^{cs} C_{t,s}^{dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{hs} H_{t,s}^{dis} \\ + \sum_{t=1}^T \lambda^{lsh} L_{t,s}^{lsh} \end{array} \right) \quad (40)$$

$$\leq OF_b (1 + \beta)$$

$$P_{t,s}^w = (1 - \alpha) P_{t,s}^w \quad (41)$$

$$(38)-(2) \quad (42)$$

۴- نتایج و بحث

به منظور نشان دادن مزایای رویکرد پیشنهادی، یک ریزشبهه جزیره‌ای با چندین حامل انرژی با حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ریزشبهه مورد مطالعه با در نظر گرفتن منابع تولید انرژی مختلف در شکل (۱) قابل مشاهده است. اطلاعات مربوط به ریزشبهه در مرجع [۲۵] آورده شده است. اطلاعات مربوط به واحدهای تولید توان در مرجع [۲۶] قابل مشاهده است. تقاضاهای برق، سرمایه‌ش، گرمایش و آب آشامیدنی در شکل (۲) قابل مشاهده است. هزینه قطع بار اجباری ۱ دلار بر کیلووات ساعت فرض می‌شود. بیشینه توان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی و ظرفیت آن نیز ۲۰ کیلووات و ۱۰۰ کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود. بیشینه توان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز سرمایه‌ش و ظرفیت آن به ترتیب ۵۰ کیلووات و ۲۰۰ کیلووات ساعت فرض می‌شود. بعلاوه توان شارژ و دشارژ و ظرفیت ذخیره‌ساز آب نیز به ترتیب ۲۸ و ۱۱۲ مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. بازده شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی، گرمایشی و سرمایه‌ش به ترتیب ۰/۹، ۰/۹۵ و ۰/۹۶ فرض می‌شود. قیمت گاز ۰/۰۱ دلار بر کیلووات ساعت فرض می‌شود. هزینه بهره‌برداری منابع ذخیره‌ساز انرژی نیز ۰/۰۱ دلار بر کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود. دیگر اطلاعات مربوط به منابع انرژی در مراجع [۳] و [۲۷] قابل مشاهده است. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت تقاضاهای انرژی و توان تولیدی باد، از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. بدین منظور ۱۰۰۰ سناریو با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تولید و به ۱۰ سناریو با استفاده از ابزار SCENRED در نرم‌افزار گمز کاهش می‌یابند. مسئله پیشنهادی به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح مدل می‌شود که توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل می‌شود.

تبادل آب-انرژی: تعادل توان در سیستم آب-انرژی محلی

پیشنهادی در (۳۴) بیان شده است. تعادل گرمایش، سرمایه‌ش و آب نیز به ترتیب توسط (۳۵) تا (۳۷) بیان می‌شوند.

$$\sum_{g=1}^{NG} P_{g,t,s} + P_{t,s}^w + P_{t,s}^{dis} - P_{t,s}^{ch} \quad (34)$$

$$-C_{t,s}^{ch} - P_{t,s}^d - P_{t,s}^h - d_{t,s}^e + L_{t,s}^{lsh} = 0$$

$$C_{t,s}^{chiller} + C_{t,s}^{dis} = d_{t,s}^c \quad (35)$$

$$\sum_{ch=1}^{NCHP} H_{ch,t,s} + H_{t,s}^b + H_{t,s}^{eb} - H_{t,s}^{ch} + H_{t,s}^{dis} = d_{t,s}^h \quad (36)$$

$$Q_{t,s}^d + Q_{t,s}^{dis} - Q_{t,s}^{ch} = QL_t^d \quad (37)$$

۳-۲- مدل‌سازی مسئله با لحاظ کردن حملات سایبری

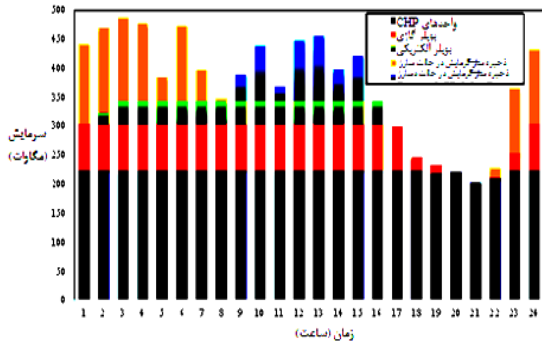
به منظور در نظر گرفتن حملات سایبری به توربین بادی در مدل پیشنهادی، از رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی استفاده می‌شود که به صورت معادله (۳۸) بیان می‌شود [۲۴]. در این معادله، OF_b هزینه بهره‌برداری قبل از شرایط حمله را نشان می‌دهد. OF هزینه بهره‌برداری بعد از لحاظ کردن شرایط حمله را نشان می‌دهد. β به عنوان پارامتر تنظیم معرفی می‌گردد که افزایش آن سبب افزایش محافظه‌کارانه بودن برنامه‌ریزی در برابر حملات می‌شود. α نیز میزان قابل مجاز توان باد ازدست‌رفته تحت شرایط حمله را نشان می‌دهد که هرچه این مقدار بیشتر باشد سیستم در برابر گستره وسیع‌تری از حملات مقاوم خواهد بود و تاب‌آوری سیستم نیز افزایش می‌یابد.

$$\text{Max} \left\{ \alpha : \left(\text{Max} OF \leq (1 + \beta) OF_b \right) \right\} \quad (38)$$

بنابراین در مدل پیشنهادی، بهره‌بردار می‌تواند با افزایش هزینه بهره‌برداری، شبکه را در برابر حملات سایبری به منابع انرژی تجدیدپذیر مقاوم سازد و تاب‌آوری شبکه را در برابر این حملات افزایش دهد. اما از آنجاکه بودجه تخصیص داده شده نمی‌تواند از حدی معین فراتر برود، هدف بهره‌بردار این است که با کمترین افزایش در هزینه بهره‌برداری بیشترین تاب‌آوری را برای شبکه به ارمغان آورد. مدل ریاضی مسئله پیشنهادی با در نظر گرفتن شرایط حمله به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود.

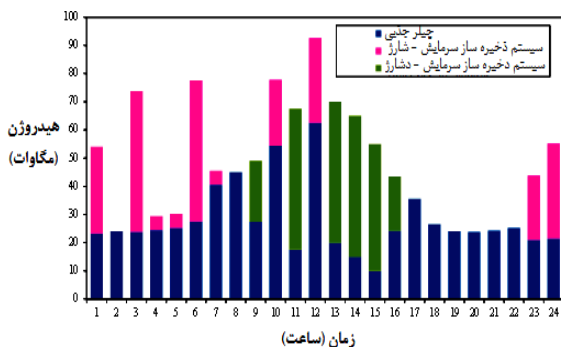
میزان $P_{t,s}^w$ می‌تواند تولیدی قبل از شرایط حمله و $P_{t,s}^w$ میزان توان تولیدی بعد از شرایط حمله را نشان می‌دهند.

ذخیره‌ساز گرمایش نیز به نحوی صورت می‌گیرد که در ساعات اولیه در حالت شارژ و در ساعات پیک تقاضای گرمایش در حالت دشارژ مورد بهره‌برداری قرار گیرد. بنابراین سیستم ذخیره‌ساز گرمایش اقتصادی‌تر است که در ساعات ۹ تا ۱۵ در حالت دشارژ برنامه‌ریزی شود و بخشی از تقاضای گرمایش را تأمین کند.

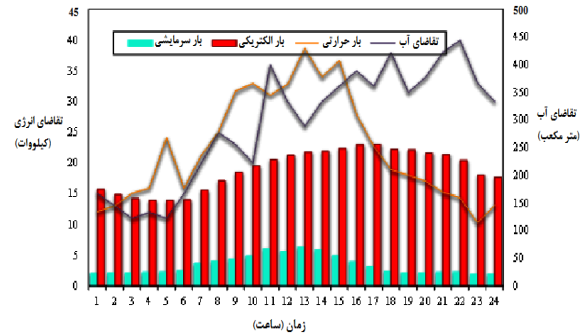


شکل (۴). برنامه‌ریزی بهینه منابع گرمایش

شکل (۵) نیز برنامه‌ریزی بهینه منابع سرمایش را نشان می‌دهد. چیلر جذبی در تمامی ساعات با مقادیر مختلف مشارکت داده می‌شود و بخش عمده‌ای از تقاضای سرمایش را تأمین می‌کند. سیستم ذخیره‌ساز سرمایش نیز در ساعاتی که تقاضای الکتریکی پایین است در حالت شارژ کار می‌کند و در این ساعات به‌عنوان مصرف‌کننده توان در نظر گرفته می‌شود. سیستم ذخیره‌ساز سرمایشی نیز در ساعاتی که تقاضای حرارت بالا است در حالت دشارژ استفاده می‌شود و سبب کاهش تقاضای گرمایش در این ساعات (برای مثال ۱۳ تا ۱۵) می‌شود. در واقع سیستم ذخیره‌ساز سرمایش به نحوی عمل می‌کند که در ساعات کم باری تقاضای برق شارژ و در ساعات پرباری تقاضای گرمایش دشارژ شود و سبب کاهش حرارت مصرف شده توسط چیلر جذبی در ساعت پیک تقاضای گرمایش شود. هزینه بهره‌برداری بدون حضور سیستم ذخیره‌ساز سرمایش به ۲۳۹۰/۷۲ دلار افزایش می‌یابد که اهمیت این فناوری در کاهش هزینه بهره‌برداری را به‌خوبی نشان می‌دهد.

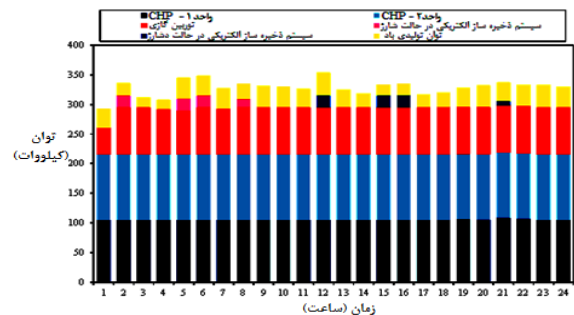


شکل (۵). برنامه‌ریزی بهینه منابع سرمایش



شکل (۲). تقاضاهای آب-انرژی ریزشکه

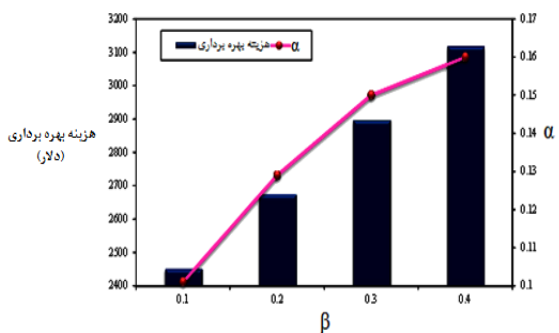
شکل (۳) برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید توان و ذخیره‌ساز الکتریکی را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که واحدهای CHP به‌منظور تأمین بخش فراوانی از تقاضاهای گرمایشی و الکتریکی در تمامی ساعات برنامه‌ریزی مشارکت داده می‌شوند. این منابع به دلیل بازده بالا، اقتصادی‌تر است که در تمامی ساعات مشارکت داده شوند. توربین گازی نیز به‌منظور تأمین بخش قابل توجهی از تقاضای الکتریکی در تمامی ساعات با مقادیر تولیدی متفاوت مشارکت داده می‌شود. قابل مشاهده است که سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در ساعات اولیه که تقاضای انرژی کم‌تر است در حالت شارژ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و سپس در ساعات با تقاضای انرژی بالاتر در حالت دشارژ استفاده می‌شود و از این طریق باعث کاهش هزینه بهره‌برداری و قطع بار در تعدادی از سناریوها می‌شود. هزینه بهره‌برداری مورد انتظار در حضور تمامی منابع برابر با ۲۲۲۷/۴۹ دلار است، درحالی‌که بدون حضور سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی هزینه برابر با ۲۳۳۰/۶۱ دلار می‌شود.



شکل (۳). برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید توان

شکل (۴) مدیریت بهینه منابع تولید گرمایش را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که واحدهای CHP بخش فراوانی از تقاضای گرمایش را پوشش دهند. بویلر الکتریکی نیز در ساعات ۲ تا ۱۶ به دلیل بالا بودن تقاضای گرمایشی مشارکت داده می‌شود و بخشی از تقاضای گرمایش را تأمین می‌کند. بویلر گازی به دلیل پایین‌تر بودن هزینه‌اش نیز در ساعات بیشتری در مقایسه با بویلر الکتریکی مشارکت داده می‌شود. برنامه‌ریزی بهینه سیستم

این بدان معناست که بهره‌بردار برای دستیابی به یک رویکرد محافظه کارانه‌تر در برابر حملات احتمالی به منابع بادی باید هزینه بهره‌برداری بیشتری را متحمل شود اما در عوض می‌تواند محدوده گسترده‌تری از حملات را پوشش دهد و شبکه را در برابر این حملات استوار سازد. برای مثال به ازای β برابر با ۰/۱، هزینه بهره‌برداری روزانه و تابع بهینه α به ترتیب برابر با ۲۴۵۰/۲۴ دلار و ۱۰ درصد می‌باشد. این بدان معناست که با افزایش هزینه بهره‌برداری به میزان ۱۰ درصد، بهره‌بردار می‌تواند تاب‌آوری شبکه را در برابر حملات به میزان ۱۰ درصد افزایش دهد. با افزایش هزینه به میزان ۴۰ درصد، بهره‌بردار می‌تواند تاب‌آوری شبکه را به میزان ۱۶ درصد افزایش دهد. به بیانی دیگر، اگر تحت حمله سایبری به توربین‌های بادی، تنها ۱۶ درصد از میزان توان توربین بادی از دست برود، بهره‌بردار می‌تواند با افزایش ۴۰ درصدی در هزینه بهره‌برداری، تاب‌آوری سیستم تأمین انرژی را تضمین کند. همچنین، بدون حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و آب با افزایش ۴۰ درصد هزینه بهره‌برداری بهره‌بردار تنها می‌تواند ۶/۳ درصد میزان تاب‌آوری شبکه را افزایش دهد که این مسئله اهمیت سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در افزایش تاب‌آوری شبکه را به خوبی نشان می‌دهد.

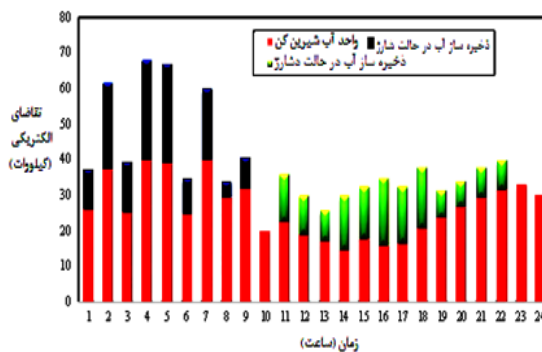


شکل (۸). اثر افزایش هزینه بر تاب‌آوری شبکه در حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

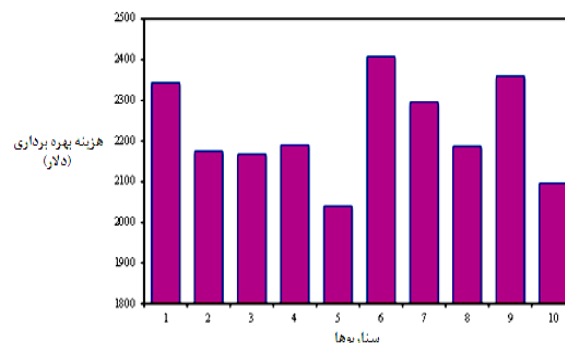
۵- نتیجه‌گیری

این مقاله یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه و بهبود تاب‌آوری یک ریزش‌بکه چندحامل انرژی در حضور توربین‌های بادی را پیشنهاد داد. ریزش‌بکه پیشنهادی به منابع انرژی مختلف همانند واحدهای تولید هم‌زمان برق و گرمایش، توربین بادی، چیلر جذبی، بویلر گازی و الکتریکی، واحد آب‌شیرین‌کن، سیستم‌های ذخیره‌ساز برق، گرمایش، سرمایه‌ش و آب به منظور تأمین انواع مختلفی از تقاضاهای آب-انرژی مجهز بود. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به تقاضاهای انرژی و توان توربین بادی، از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استفاده گردید؛ همچنین، به منظور

برنامه‌ریزی بهینه واحد آب‌شیرین‌کن و سیستم ذخیره‌ساز آب در شکل (۶) قابل مشاهده است. دیده می‌شود که دستگاه آب‌شیرین‌کن در تمامی ساعات به منظور تأمین تقاضای آب آشامیدنی مشارکت داده می‌شود. اما سیستم ذخیره‌ساز آب در ساعات اولیه که تقاضای الکتریکی کم است در حالت شارژ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع در ساعات اولیه میزان برق مصرفی توسط دستگاه آب‌شیرین‌کن افزایش یافته است. اما در ساعات پیک تقاضای برق اگرچه تقاضای آب آشامیدنی نیز بالا است اما میزان برق مصرف شده توسط واحد آب‌شیرین‌کن و میزان آب شیرین شده توسط این واحد کاهش یافته است، زیرا در این ساعات سیستم ذخیره‌ساز آب در حالت دشارژ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد که موجب کاهش مشارکت واحد آب‌شیرین‌کن در تأمین تقاضا می‌شود. شکل (۷) نیز هزینه بهره‌بردار در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که میزان هزینه بهره‌برداری در سناریوهای مختلف متفاوت است، زیرا میزان توان تولید شده توسط توربین بادی و تقاضای انرژی در این سناریوها متفاوت می‌باشد.



شکل (۶). برنامه‌ریزی منابع آب



شکل (۷). هزینه بهره‌برداری در سناریوهای مختلف

به منظور لحاظ کردن شرایط حمله به منابع توربین بادی در مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی از رویکرد IGDT استفاده می‌شود. همان طور که در شکل (۸) قابل مشاهده است، با افزایش پارامتر مقاوم β ، هزینه بهره‌برداری و تابع بهینه α نیز افزایش می‌یابند.

- [9] M. Nazari-Heris, S. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal economic dispatch of FC-CHP based heat and power micro-grids," *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 756-769, 2017.
- [10] H. Shahinzadeh, J. Moradi, G. B. Gharehpetian, M. Abedi, and S. H. Hosseini, "Multi-Objective Scheduling of CHP-Based Microgrids with Cooperation of Thermal and Electrical Storage Units in Restructured Environment," in *2018 Smart Grid Conference (SGC)*, pp. 1-10, 2018.
- [11] V. Amir and M. Azimian, "Dynamic Multi-Carrier Microgrid Deployment Under Uncertainty," *Applied Energy*, vol. 260, p. 114293, 2020.
- [12] P. Pourghasem, F. Sohrabi, M. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Stochastic multi-objective dynamic dispatch of renewable and CHP-based islanded microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 173, pp. 193-201, 2019.
- [13] F. Moazeni and J. Khazaei, "Optimal operation of water-energy microgrids; a mixed integer linear programming formulation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, p. 122776, 2020.
- [14] F. Moazeni and J. Khazaei, "Dynamic economic dispatch of islanded water-energy microgrids with smart building thermal energy management system," *Applied Energy*, vol. 276, p. 115422, 2020.
- [15] M. A. Mohamed, A. Almalaq, E. M. Awwad, M. A. El-Meligy, M. Sharaf, and Z. M. Ali, "An Effective Energy Management Approach within a Smart Island Considering Water-Energy Hub," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020.
- [16] J. Najafi, A. Peiravi, A. Anvari-Moghaddam, and J. M. Guerrero, "Resilience improvement planning of power-water distribution systems with multiple microgrids against hurricanes using clean strategies," *Journal of cleaner production*, vol. 223, pp. 109-126, 2019.
- [17] M. Roustaei, T. Niknam, S. Salari, H. Chabok, M. Sheikh, A. Kavousi-Fard, et al., "A scenario-based approach for the design of Smart Energy and Water Hub," *Energy*, vol. 195, p. 116931, 2020.
- [18] M. J. V. Pakdel, F. Sohrabi, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Multi-objective optimization of energy and water management in networked hubs considering transactive energy," *Journal of Cleaner Production*, p. 121936, 2020.
- [19] A. M. F. Fard and M. Hajiaghaei-Keshteli, "A bi-objective partial interdiction problem considering different defensive systems with capacity expansion of facilities under imminent attacks," *Applied Soft Computing*, vol. 68, pp. 343-359, 2018.
- [20] H. Davarikia and M. Barati, "A tri-level programming model for attack-resilient control of power grids," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, pp. 918-929, 2018.
- [21] M. Yan, Y. He, M. Shahidehpour, X. Ai, Z. Li, and J. Wen, "Coordinated regional-district operation of integrated energy systems for resilience enhancement in natural disasters," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, pp. 4881-4892, 2018.

لحاظ کردن مفهوم تاب‌آوری و در نظر گرفتن حملات سایبری به منابع انرژی تجدیدپذیر، در مدل‌سازی برنامه‌ریزی پیشنهادی از رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی استفاده شد. نتایج عددی نشان داد که سیستم‌های ذخیره‌ساز آب-انرژی منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری به میزان ۱۳/۵ درصد شدند. به علاوه بهره‌بردار توانست با افزایش هزینه بهره‌برداری به میزان ۱۰ و ۴۰ درصد، تاب‌آوری شبکه را در برابر حملات در حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز آب-انرژی به میزان ۱۰ درصد و ۱۶ درصد افزایش دهد. درحالی‌که بدون حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز آب-انرژی، میزان تاب‌آوری شبکه به ترتیب ۵/۱ و ۶ درصد افزایش یافت که اثر این منابع در بهبود تاب‌آوری را به خوبی نشان می‌دهد.

۶- مراجع

- [1] Y. Li, Y. Zou, Y. Tan, Y. Cao, X. Liu, M. Shahidehpour, et al., "Optimal stochastic operation of integrated low-carbon electric power, natural gas, and heat delivery system," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, pp. 273-283, 2017.
- [2] E. Guelpa, G. Mutani, V. Todeschi, and V. Verda, "Reduction of CO2 emissions in urban areas through optimal expansion of existing district heating networks," *Journal of Cleaner Production*, vol. 204, pp. 117-129, 2018.
- [3] A. Mansour Saatloo, M. A. Mirzaei, B. Mohammadi-Ivatloo, and K. Zare, "A risk-averse hybrid approach for optimal participation of power-to-hydrogen technology-based multi-energy microgrid in multi-energy markets," *Sustainable Cities and Society*, vol. 63, p. 102421, 2020.
- [4] F. Jalilian, M. A. Mirzaei, K. Zare, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, and A. Anvari-Moghaddam, "Multi-energy microgrids: An optimal dispatch model for water-energy nexus," *Sustainable Cities and Society*, vol. 77, p. 103573, 2022.
- [5] Q. Sui, F. Wei, X. Lin, and Z. Li, "Optimal energy management of a renewable microgrid integrating water supply systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, p. 106445, 2021.
- [6] S. Nojavan and K. Jermsittiparsert, "Risk-Based Performance of Combined Heat and Power Based Microgrid Using Information Gap Decision Theory," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 93123-93132, 2020.
- [7] F. H. Aghdam, N. T. Kalantari, and B. Mohammadi-Ivatloo, "A stochastic optimal scheduling of multi-microgrid systems considering emissions: A chance constrained model," *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, p. 122965, 2020.
- [8] F. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, and D. Nazarpour, "Network constrained economic dispatch of renewable energy and CHP based microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 110, pp. 144-160, 2019.

- [25] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, S. Ghasemzadeh, and E. Reihani, "Risk-based optimal scheduling of reconfigurable smart renewable energy based microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 101, pp. 415-428, 2018.
- [26] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, and Anvari-Moghaddam, "Optimal chance-constrained scheduling of reconfigurable microgrids considering islanding operation constraints," *IEEE Systems Journal*, vol. 14, pp. 5340-5349, 2020.
- [27] M. Jadidbonab, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, and P. Siano, "Short-term self-scheduling of virtual energy hub plant within thermal energy market," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 68, pp. 3124-3136, 2020.
- [22] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziargyriou, "Power systems resilience assessment: Hardening and smart operational enhancement strategies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, pp. 1202-1213, 2017.
- [23] C. He, C. Dai, L. Wu, and T. Liu, "Robust network hardening strategy for enhancing resilience of integrated electricity and natural gas distribution systems against natural disasters," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 5787-5798, 2018.
- [24] M. A. Mirzaei, M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, K. Zare, M. Marzband, and S. A. Pourmousavi, "Robust Flexible Unit Commitment in Network-Constrained Multicarrier Energy Systems," *IEEE Systems Journal*, 2020.

Optimal Operation of the Water-Energy Supply System in an Islanded Microgrid with Several Energy Carriers to Improve Resilience Against Cyber Attacks

A. Karimi Saeedabadi, B. Mozaffari*, S. Soleimani, H. Mohammadnejad Shorakai

Abstract

Multi-energy microgrids, rely on energy conversion facilities, supply a flexible and highly efficient framework to meet a variety of water and energy needs. The increase in the energy demand and the shortage of potable water are major concerns in today's world. As water infrastructure requires significant energy to operate, This resulting in increased interdependence between water and energy systems. This paper provides an integrated water-energy management solution for an islanded microgrid to meet the demands of electricity, heating, cooling, and potable water with minimum cost. The proposed microgrid is equipped with combined power and heat units, absorption chillers, electric and gas boilers, wind turbines, desalination units, and various energy storage devices. The cost function is expressed as a mixed integer programming problem. Scenario-based stochastic programming is used to model uncertainties related to energy demand and wind power generation. In addition, to account for cyber attacks on wind turbines, the suggested scheduling model utilizes information-based decision theory, which allows the operator to make his schedule robust against cyber attacks on wind turbines at an acceptable cost. Considering the energy carriers other than electricity and water along with the Utilization of the concept of resilience to optimally operate the water-energy supply system in an islanded microgrid is the innovation of the proposed model. Numerical results show that the operator can reduce the effect of cyber attacks on the operation cost without the presence of water-energy storage systems by 1.5% and in the presence of these resources by 10%, which will increase the system's resilience against such attacks.

Key Words: *Islanded Microgrid, Water-Energy Management, Energy Storage Systems, Multicarrier Energy Systems, Desalination Unit*

* Associate Professor, Islamic Azad University, Tehran Science and Research Unit, Department of Electrical Engineering, Tehran, Iran. (mozaffari@srbiau.ac.ir) - Writer-in-Charge