

برنامه‌ریزی پیشگیرانه و امکانی - احتمالاتی ریزش‌بکه‌های الکتریکی در برابر حوادث طبیعی و در حضور خودروهای برقی

امیرحسین نثری، امیر عبداللهی و مسعود رشیدی‌نژاد

h, H : شاخص و تعداد سناریوهای جزیره‌شدن ریزش‌بکه

پارامترها و ثابت‌ها

π_h : احتمال رخداد سناریوی h برای جزیره‌شدن ریزش‌بکه

OC, IC : هزینه بهره‌برداری در شرایط نرمال و جزیره

P_S : احتمال رخداد هر سناریو مربوط به عدم قطعیت منابع

CU_g, CD_g : ثابت هزینه روشن و خاموش‌شدن میکروتوربین g

$VOLL$: هزینه بار تأمین نشده

C_r, C_u, C_v : هزینه توان خریداری شده از منبع تجدیدپذیر r ، شبکه و

پارکینگ v در هر ساعت

$\gamma_v^{PEV,del}, \gamma_v^{PEV,inj}$: بازده شارژ و دشارژ پارکینگ v

$\eta_e^{EV,ch}, \eta_e^{EV,dch}$: بازده شارژ و دشارژ خودرو e

UR_g, DR_g : شیب افزایش و کاهش تولید میکروتوربین g

Δt : دوره زمانی

$P_{e,t}^{EV,ch,max}, P_{e,t}^{EV,dch,max}$: ماکسیمم نرخ شارژ و دشارژ باتری هر

خودرو

$\tilde{R}_{i,t}^{\partial}$: ترم فازی ∂ برای احتمال مجموعه Z -number i در زمان t

$\tilde{A}_{i,t}^{\gamma}$: ترم فازی γ برای تعداد خودروی مجموعه Z -number i در

زمان t

pr : متغیر احتمال

μ : تابع عضویت

$\tilde{N}_{i,t}^{V\gamma G,Z}$: مجموعه Z -number i ، برای تعداد خودرو در زمان t

$E_{e,t}^{EV,max}, E_{e,t}^{EV,min}$: ماکسیمم و مینیمم انرژی ذخیره‌شده در باتری

خودرو e

توابع و متغیرها

F_g : تابع هزینه میکروتوربین g

$f_{V\gamma G}$: تابع توزیع نرمال تعداد خودرو

$E_{e,t}^{EV}$: انرژی ذخیره‌شده در باتری خودرو e در ساعت t

$L_{l,t}^s$: بار l در ساعت t و سناریوی s

$LS_{l,t}^s$: بار تأمین نشده l در ساعت t و سناریوی s

$P_{r,t}^s$: توان تولیدی منبع تجدیدپذیر r در ساعت t و سناریوی s

$P_{g,t}^s$: توان تولیدی میکروتوربین g در ساعت t و سناریوی s

$P_{u,t}^s$: توان انتقالی از شبکه اصلی در ساعت t و سناریوی s

$I_{g,t}^s$: وضعیت روشن و خاموش‌بودن میکروتوربین g در ساعت t و

سناریوی s

$SU_{g,t}^s, SD_{g,t}^s$: هزینه روشن و خاموش‌شدن میکروتوربین g در

ساعت t و سناریوی s

$\gamma_{v,t}^{PEV,del,s}, \gamma_{v,t}^{PEV,inj,s}$: میزان شارژ و دشارژ پارکینگ v در سناریوی

چکیده: این مقاله ساختاری امکانی-احتمالاتی برای برنامه‌ریزی یک روز پیش ریزش‌بکه‌ها در حضور پارکینگ خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده ارائه می‌دهد. برنامه‌ریزی ریزش‌بکه بر اساس عملکرد آن در حالت عادی و حالت جزیره به دلیل رخداد خطا در شبکه اصلی انجام می‌گردد. در این مطالعه ابتدا عدم قطعیت تعداد خودروهای موجود در پارکینگ در هر ساعت با روش Z-number تعیین می‌گردد. در گام بعد میزان توان تولیدی توربین بادی و پنل‌های فتوولتاییک، قیمت بازار و میزان بار به صورت احتمالاتی با استفاده از روش مونت کارلو مدل می‌گردند. همچنین رخداد حوادث در شبکه بالادست که جزیره‌شدن ریزش‌بکه را در پی دارد، به صورت سناریومحور و بر اساس زمان شروع رخداد و مدت‌زمان تأثیرگذاری آن در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، در برنامه‌ریزی بهینه ریزش‌بکه، ساختاری مبتنی بر عدم قطعیت و شارژ و دشارژ خودروهای برقی برای بهره‌برداری از پارکینگ‌ها پیشنهاد شده است. در این مدل، هزینه بهره‌برداری ریزش‌بکه در شرایط عملکرد معمول و هزینه عدم تأمین بار و بهره‌برداری به صورت توأمان در حالت رخداد خطا به عنوان توابع هدف پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصل از اجرای ساختار پیشنهادی بر روی ریزش‌بکه اصلاح‌شده ۳۳ باس IEEE، اهمیت این مدل را در بهبود وضعیت امنیت و بهره‌برداری ریزش‌بکه نشان می‌دهد.

کلیدواژه: برنامه‌ریزی امکانی-احتمالاتی ریزش‌بکه، پارکینگ خودروهای برقی، منابع تجدیدپذیر، Z-number، عدم قطعیت.

فهرست اصطلاحات

شاخص‌ها و مجموعه‌ها

g, NG : شاخص و تعداد منبع قابل کنترل

r, NR : شاخص و تعداد منابع تجدیدپذیر

$e, N_{v,t}^{V\gamma G}$: شاخص و تعداد خودرو موجود در پارکینگ v و در ساعت

t

v, NP : شاخص و تعداد پارکینگ

l, NL : شاخص و تعداد نقاط بار

s, NS : شاخص و تعداد سناریوهای عدم قطعیت منابع

t, T : شاخص و زمان‌های برنامه‌ریزی

این مقاله در تاریخ ۱۷ آبان ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۴ اسفند ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

امیرحسین نثری، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (email: amirhossein9091@gmail.com).

امیر عبداللهی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (email: a.abdollahi@uk.ac.ir).

مسعود رشیدی‌نژاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، (email: mrashidi@uk.ac.ir).

سیستم گرمایش و تهویه خانه‌ها به طور غیر مستقیم و توسط کنترلر اصلی ریزشبهک و سیستم مدیریت انرژی هر خانه به صورت فرایندهای دوره‌ای و بر اساس سیگنال قیمت صورت می‌گیرد. در این مرجع مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در مسئله مورد توجه قرار نگرفته است. مرجع [۱۱] یک مدل بازی تکاملی همراه با در نظر گرفتن واقعیت‌های سیستم برای هدایت سیاست‌های یارانه‌ای ذخیره‌سازهای انرژی در یک ریزشبهک پیشنهاد داده است که می‌تواند برای یک شبکه الکتریکی کوچک توسط یک نهاد تنظیم‌کننده مقررات انجام گردد. در این مطالعه نقش خودروهای برقی و عدم قطعیت‌های مسئله مورد توجه قرار نگرفته است. در [۱۲] ساختار جدیدی برای برنامه‌ریزی مبتنی بر سرمایه‌گذاری در حوزه خودروهای برقی مربوط به یک ریزشبهک ارائه می‌گردد. برنامه‌ریزی پیشنهاد شده به بهره‌بردار ریزشبهک این قابلیت را می‌دهد که در بازار برق سود بیشتری کسب نماید که این امر می‌تواند سرمایه‌گذاری در حوزه خودروهای برقی را بیشتر توجیه کند. در این مطالعه مدل‌سازی هم‌زمان تمامی عدم قطعیت‌های مسئله نادیده گرفته شده است. در [۱۳] ساختاری برای برنامه‌ریزی یک روز پیش ریزشبهک‌ها در حضور توربین‌های بادی، پنل‌های فتوولتائیک، میکروتوربین‌ها و ذخیره‌ساز انرژی پیشنهاد داده شده است. همچنین در این ساختار عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های پخش بار AC نیز در نظر گرفته شده‌اند. عدم قطعیت‌های ریزشبهک تحت مطالعه در این مرجع شامل سرعت باد، شدت تابش، قیمت بازار و میزان تقاضا می‌باشند که با استفاده از روش بازه‌های محدود مدل‌سازی گردیده‌اند. در ساختار پیشنهادی این مرجع، نقش خودروهای برقی در برنامه‌ریزی بهینه ریزشبهک‌ها نادیده گرفته شده است. دسته دوم نیز ریزشبهک‌ها را در حالت جدا از شبکه اصلی (جزیره) مورد مطالعه قرار می‌دهند. در این مطالعات، هدف اصلی این است که منابع محلی ریزشبهک به گونه‌ای برنامه‌ریزی گردند تا میزان بار کاهش یافته حداقل گردد [۱۴]. [۱۵] به نقش خودروهای برقی در تنظیم ولتاژ ریزشبهک در حالت جزیره و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها پرداخته است. برنامه‌ریزی ریزشبهک بر اساس ساختاری کنترلی و پیشگیرانه برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در [۱۶] ارائه شده است. در این مطالعه ذخیره‌سازهای انرژی، سویچ‌ها و منابع تولید پراکنده برای بازیابی بیشینه بار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ساختار پیشنهادی، حوادث به صورت بدبینانه‌ترین حالت در نظر گرفته شده‌اند که این امر باعث گردیده است برنامه پیشنهادی بسیار محافظه‌کارانه همراه با هزینه بالایی صورت گیرد. علاوه بر این نقش خودروهای برقی در برنامه‌ریزی ریزشبهک در نظر گرفته نشده است. مرجع [۱۷] یک برنامه‌ریزی مبتنی بر محدودیت‌های چندگانه احتمالاتی برای بهره‌برداری بهینه از ریزشبهک هنگام جزیره‌شدن پیشنهاد داده است. علاوه بر این، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عدم تعادل توان ریزشبهک از قبیل عدم قطعیت بار، منابع تولید پراکنده، خروج ناگهانی منابع و ذخیره‌ساز انرژی و همچنین جزیره‌شدن ناگهانی ریزشبهک در ساختار پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یکی از خلأهای مطالعاتی این پژوهش، عدم بررسی نقش خودروهای برقی در برنامه‌ریزی ریزشبهک است. سومین دسته از مطالعات انجام شده در حوزه ریزشبهک‌ها، وابستگی متقابل بهره‌برداری یک ریزشبهک را در هر دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه بررسی می‌کنند. بخشی از این مراجع بر روی برنامه‌ریزی متصل به شبکه تمرکز دارند، به طوری که منابع موجود برای تغییر وضعیت ریزشبهک به حالت جزیره‌ای هنگام رخداد اختلال در شبکه اصلی کافی باشند [۱۸] و [۱۹]. در بعضی مطالعات دیگر، مسئله برنامه‌ریزی در حالت‌های متصل به شبکه و جزیره به منظور تعیین ظرفیت مطلوب

s در ساعت t : $P_{e,t}^{EV, ch, s}$, $P_{e,t}^{EV, dch, s}$ میزان شارژ و دشارژ خودروی e در سناریوی s در ساعت t : $Ploss_t^s$: تلفات شبکه در سناریوی s و ساعت t : $\delta_{e,t}^{EV, ch}$, $P_{e,t}^{EV, dch}$, $\delta_{e,t}^{EV, ndch, nch}$ شاخص وضعیت شارژ، دشارژ و عدم شارژ و دشارژ خودرو e در ساعت t و سناریوی s

۱- مقدمه

ریزشبهک‌ها به عنوان اصلی‌ترین جزء شبکه‌های هوشمند معرفی می‌گردند [۱]. بر طبق تعریف وزارت انرژی ایالات متحده، یک ریزشبهک، مجموعه‌ای از بارها و منابع تولید پراکنده به هم متصل شده با مرزهای الکتریکی مشخص است. یک ریزشبهک می‌تواند به عنوان یک واحد قابل کنترل با توجه به شرایط شبکه اصلی در حالت اتصال به شبکه یا جدا از شبکه (حالت جزیره) عمل کند [۲]. به دلیل حضور منابع تجدیدپذیر در ریزشبهک، همیشه این احتمال وجود دارد که میزان توان تولیدی پیش‌بینی شده تحقق نیابد. به منظور کاهش تأثیر کمبود توان الکتریکی تولید شده به خصوص هنگام رخداد حوادثی که منجر به جزیره‌شدن ریزشبهک می‌گردد، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی معمولاً در ریزشبهک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. پارکینگ خودروهای برقی به دلیل قابلیت شارژ و دشارژ خودروهای موجود در آن می‌تواند نقشی همانند ذخیره‌کننده‌های انرژی در یک ریزشبهک داشته باشد، با این تفاوت که میزان توان شارژ و دشارژ خودروها همراه با عدم قطعیت خواهد بود. در مدل‌سازی حضور خودروهای برقی در سطح ریزشبهک معمولاً از روش‌های عددی مانند روش مونت کارلو استفاده شده است [۴] که این روش‌ها بار محاسباتی زیادی دارند. در [۵] یک رویکرد متفاوت اخذ شده و از مدل میکروسکوپی ترافیکی خودروها جهت شبیه‌سازی رفتار خودروهای برقی استفاده گردیده است. این روش علاوه بر نیاز به داده‌های فراوان، حجم محاسباتی بسیار بالایی نیز دارد. از طرف دیگر، ریزشبهک‌ها در دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه عمل می‌کنند. در حالت متصل به شبکه، چالش اصلی بهره‌بردار این است که هزینه‌های بهره‌برداری سیستم را به حداقل رساند. در این راستا، بهره‌بردار می‌بایست به گونه‌ای میزان تبادل توان ریزشبهک با شبکه اصلی و میزان مشارکت منابع محلی را تعیین کند که هزینه‌های بهره‌برداری حداقل شوند [۶]. از سوی دیگر، ریزشبهک باید ظرفیت تولید توان برای تغذیه بارها به میزان کافی و در هر زمان داشته باشد تا بتواند پس از وقوع هر گونه اختلال در شبکه اصلی به حالت جزیره تغییر وضعیت دهد. بنابراین برنامه‌ریزی ریزشبهک ممکن است فقط بر اساس ملاحظات اقتصادی صورت نگیرد و در هنگام برنامه‌ریزی سیستم باید موارد امنیتی نیز مورد توجه قرار گیرد [۷]. مراجعی که برنامه‌ریزی ریزشبهک‌ها را بررسی می‌کنند، به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند. اولین دسته به نقش برنامه‌ریزی ریزشبهک‌ها در حالت متصل به شبکه اصلی می‌پردازد. این موضوع به طور گسترده در مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در این زمینه روش‌های مختلفی ارائه شده است [۸]. مرجع [۹] یک استراتژی دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی ریزشبهک‌ها ارائه می‌کند که در آن رزرو کنترل فرکانس در راستای اطمینان از بهره‌برداری اقتصادی، قابل اعتماد و پایدار به کار گرفته شده است. در این مطالعه به نقش خودروهای برقی در بهره‌برداری بهینه و قابل اعتماد از ریزشبهک‌ها پرداخته نشده است. یک سیستم مدیریت انرژی نامتمرکز برای مجموعه ریزشبهک‌ها در [۱۰] توسعه داده شده است. در این سیستم منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی و همچنین تجهیزات الکتریکی به ویژه

و بر مبنای زمان رخداد حادثه و مدت زمان بازیابی ریزشک. (۴) برنامه‌ریزی توأمان منابع تولید پراکنده و پارکینگ خودروهای برقی در حالت عملکرد معمول و هنگام رخداد خطا در شبکه اصلی با هدف کاهش آسیب‌پذیری در حوادث طبیعی.

ادامه این مقاله به شرح زیر قسمت‌بندی شده است. بخش دوم به بیان مسئله برنامه‌ریزی امکانی - احتمالاتی منابع و پارکینگ خودروهای برقی در یک ریزشک می‌پردازد. در بخش سوم ساختاری برای حل مسئله بیان شده، ارائه و بررسی می‌گردد. بخش چهارم نیز به اجرای مدل پیشنهادی در ریزشک ۳۳ باس IEEE اصلاح شده و بررسی نتایج حاصل از آن خواهد پرداخت. نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری حاصل از این مطالعه ارائه می‌گردد.

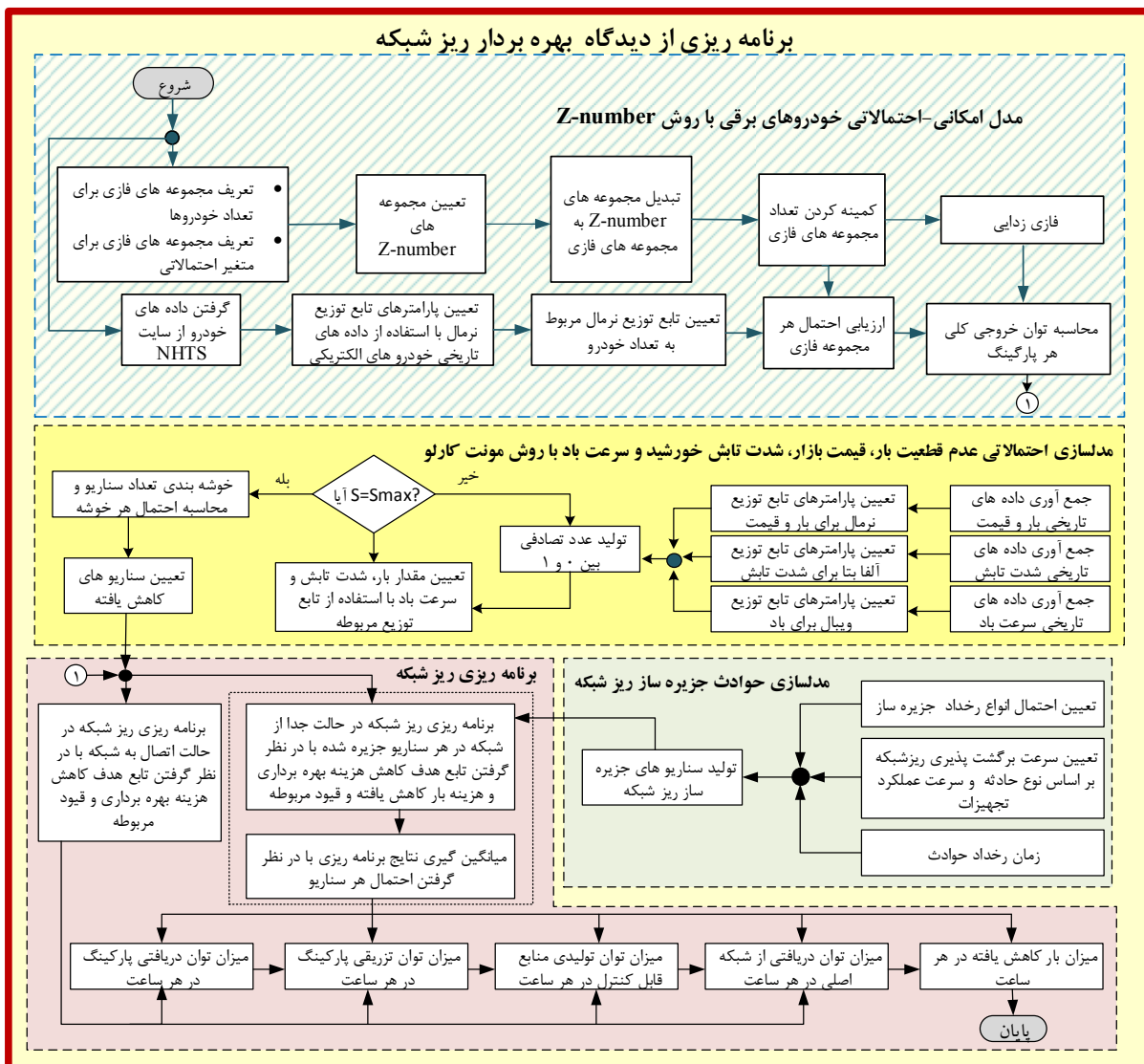
۲- بیان مسئله

ریزشک مورد بررسی در این مقاله شامل منابع تولید پراکنده، پارکینگ خودروهای برقی و بارهای الکتریکی است. بارهای الکتریکی این ریزشک، به دو بخش قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم می‌شوند. بر اساس شرایط بهره‌برداری سیستم، یک بخش یا کل بار تغییرپذیر می‌تواند محدود شود. در مقابل، بهره‌بردار سیستم توانایی کنترل بار غیر قابل تغییر را ندارد و در هر شرایطی می‌بایست آن بار تأمین گردد. لازم به ذکر است که شبکه اصلی قادر به تأمین کامل تقاضای ریزشک یا جذب توان تولیدی مازاد بر نیاز ریزشک را دارد. بنابراین ریزشک در حالت اتصال به شبکه، محدودسازی بار را تجربه نخواهد کرد. از طرف دیگر، هنگام جزیره‌شدن، بهره‌بردار تلاش می‌کند با برنامه‌ریزی بهینه منابع در دسترس در این زمان، بار کاهش‌یافته را حداقل سازد. واحدهای تولید پراکنده موجود در این ریزشک در دو دسته قرار می‌گیرند. گروه اول منابع تغییرپذیر و قابل کنترل هستند که عوامل فنی از قبیل ظرفیت، سرعت افزایش/کاهش میزان توان تولیدی، حداقل زمان روشن و خاموش بودن، عملکرد آنها را محدود می‌نمایند. گروه دیگر شامل منابع تجدیدپذیر هستند که میزان توان تولیدی این منابع غیر قابل کنترل‌اند. در این مطالعه توربین بادی و واحدهای فتوولتائیک به عنوان منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته شده‌اند. از دیگر اجزای ریزشک تحت مطالعه پارکینگ خودروهای برقی است که میزان تبادل توان آنها با ریزشک به رفتار صاحبانشان بستگی دارد. توانایی جزیره‌شدن از ویژگی برجسته ریزشک‌ها محسوب می‌شود. یک ریزشک معمولاً زمانی به حالت جزیره درمی‌آید که در شبکه اصلی یک حادثه‌ای اتفاق افتاده باشد. جزیره‌شدن کمک می‌کند تا اجزای ریزشک محافظت گردند و تقاضای موجود در ریزشک تا حد امکان بدون وقفه تأمین گردد. همچنین جزیره‌شدن می‌تواند یک حفاظت مناسب برای بارهای وابسته به ولتاژ در برابر افت ولتاژهای شدید در شبکه اصلی باشد در صورتی که محافظت سریع دیگری در دسترس نباشد [۲۴]. در شرایط عملکرد عادی یک ریزشک، بهره‌بردار با هدف کمینه‌کردن هزینه بهره‌برداری، به تأمین بارها می‌پردازد. این امر از طریق برنامه‌ریزی بهینه منابع کنترل‌پذیر و مدیریت شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی و میزان تبادل توان با شبکه بالادست بر اساس پیش‌بینی قیمت بازار، میزان تولید منابع تجدیدپذیر و توان تزریقی و دریافتی پارکینگ خودروهای برقی صورت می‌پذیرد. از طرف دیگر هنگام رخداد یک حادثه در شبکه اصلی، ریزشک با تغییر وضعیت کلید در نقطه اتصال به شبکه اصلی به حالت جزیره درمی‌آید که در این حالت بارهای موجود در ریزشک از طریق منابع موجود در آن تأمین می‌گردند. از آنجا که قیمت بالای بازار در ساعات پیک مصرف است، دشارژ خودروهای

سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا سطح مورد اطمینان و از پیش تعیین شده آنها منجر به تغییر حالت موفق ریزشک گردد [۲۰] و، [۲۱]. همچنین [۲۲] مدلی کارآمد برای برنامه‌ریزی بهینه ریزشک با قابلیت بازآرایی پویا پیشنهاد داده است. بازآرایی شبکه باعث می‌گردد که از ریزشک بتوان به صورت مؤثر و محلی پخش بار گرفت. این امر باعث می‌شود در حالت اتصال به شبکه بالادست تلفات کاهش یابد و در حالت جزیره منجر به کاهش میزان بار قطع شده گردد. در این مطالعه مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها مورد توجه قرار نگرفته‌اند. همچنین نقش خودروهای برقی که در آینده اهمیت بسیار زیادی در شبکه‌های الکتریکی خواهند داشت، نادیده گرفته شده‌اند. مرجع [۲۳] نیز ساختاری جدید برای مدیریت انرژی ریزشک‌های جزیره‌شده ارائه می‌کند. این ساختار از دو سطح داخلی و بیرونی ایجاد شده است که هدف از سطح بیرونی آن تبادل اطلاعات و توان مورد نیاز بین ریزشک‌ها است. سطح داخلی این ساختار، وظیفه برنامه‌ریزی هر ریزشک که تحت تأثیر خطا قرار گرفته است به طور مجزا از سایر ریزشک‌ها بر عهده دارد. همچنین در ساختار پیشنهادی، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما در این مرجع برخلاف توسعه روزافزون خودروهای برقی و تأثیرگذاری آنها بر شبکه‌های الکتریکی، نقش آنها در ساختار پیشنهادی در نظر گرفته نشده است.

بررسی دقیق این مقالات نشان می‌دهد که عدم قطعیت موجود در رخدادهای جزیره‌ساز ریزشک یا نادیده گرفته می‌شوند و یا در مطالعات برنامه‌ریزی، به عنوان بدترین سناریوها مورد توجه قرار می‌گیرند. در حالی که نادیده گرفتن این گونه رخدادهای در مطالعات عملی قابل قبول نیست و در نظر گرفتن بدبینانه این رویدادها باعث می‌شود که برنامه‌ریزی‌های محافظه‌کارانه و پرهزینه‌ای برای بهره‌برداران ریزشک در پی داشته باشد. همچنین برای بهره‌برداری بهینه از ریزشک باید عدم قطعیت‌های مربوط به بار، قیمت بازار، منابع تجدیدپذیر و پارکینگ خودروهای برقی در نظر گرفته شوند. بنابراین یک مدل مناسب برای در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌های مطرح شده در مسئله برنامه‌ریزی ریزشک مورد نیاز است. بر این اساس، مسئله اصلی این مقاله، بررسی چگونگی برنامه‌ریزی یک ریزشک در حالت متصل به شبکه و جزیره، در حضور خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده است که اطلاعات تاریخی کاملی از وضعیت خودروهای برقی در دسترس نباشد با در نظر گرفتن هم‌زمان تمامی عدم قطعیت‌های ریزشک. از این رو، پژوهش حاضر به ارائه یک چارچوب امکانی - احتمالاتی و چندسطحی برای برنامه‌ریزی بهینه پارکینگ خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده در یک ریزشک می‌پردازد که در آن علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت بازار، بار الکتریکی، میزان توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و تعداد خودروی موجود در پارکینگ در هر ساعت، به مدل‌سازی چگونگی وقوع حادثه در شبکه اصلی که جزیره‌شدن ریزشک را در پی دارد نیز پرداخته است. در این مطالعه برنامه شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی و میزان توان تولیدی میکروتوربین‌ها، به عنوان برنامه بهینه بهره‌برداری از ریزشک در حالت متصل به شبکه اصلی و جزیره پیشنهاد داده می‌شود. نوآوری‌های اصلی مقاله عبارتند از:

- ۱) تمامی عدم قطعیت‌های مربوط به بار، قیمت و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر به طور هم‌زمان در مدیریت انرژی ریزشک با استفاده از مدل احتمالاتی مبتنی بر روش مونت کارلو در نظر گرفته می‌شوند.
- ۲) مدل‌سازی عدم قطعیت تعداد خودروهای موجود در پارکینگ در هر ساعت با استفاده از روش Z-number.
- ۳) مدل‌سازی وقوع حوادث طبیعی در شبکه اصلی به شکل سناریومحور



شکل ۱: ساختار پیشنهادی برای برنامه ریزی ریز شبکه.

برقی در این زمان علاوه بر مزایای اقتصادی، امنیت ریز شبکه را در حالت رخداد حوادث برنامه ریزی نشده بالا می‌برند. از آنجا که منابع تولید پراکنده ممکن است نتوانند تمامی بارها را تأمین کنند در نتیجه بارهای کنترل پذیر می‌بایست کاهش داده شوند. این مسئله با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌های مربوط به بار، میزان توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و رفتار صاحبان خودروها پیچیده‌تر می‌گردد. همچنین زمان رخداد و مدت زمان حوادث را نمی‌توان به طور قطعی تعیین کرد. بنابراین یک مدل برنامه ریزی امکانی-احتمالاتی و سناریومحور نیاز است به کار گرفته شود تا بتوان از داده‌های تاریخی در دسترس برای در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌های موجود و برنامه ریزی بهینه ریز شبکه نهایت استفاده را نمود.

موجود در پارکینگ در هر ساعت، چندین مجموعه فازی تعریف می‌گردد. همچنین با تعریف تعدادی مجموعه فازی برای احتمال رخداد مجموعه‌های مربوط به تعداد خودروها، چندین مجموعه Z-number تشکیل می‌شود. در گام بعد با ادغام شدن تأثیر دو قسمت هر متغیر Z-number، مجموعه‌های Z-number که ترکیبی از تعداد خودرو و احتمال می‌باشند، به صورت یک مجموعه فازی حاصل می‌گردند. از آنجا که برخی از مجموعه‌های فازی ایجاد شده ویژگی‌های مشابهی دارند، با هدف کاهش حجم محاسبات و با استفاده از روشی پیشنهادی که در ادامه به آن پرداخته می‌شود، تعداد آنها کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، بر اساس داده‌های تاریخی خودروهای برقی، یک تابع توزیع احتمال برای تعداد خودروهای موجود در پارکینگ در هر ساعت تعریف می‌گردد که برای محاسبه احتمال هر مجموعه فازی کاهش یافته که معادل با تعدادی از مجموعه‌های Z-number است به کار گرفته می‌شود. در نهایت با فازی زدایی مجموعه‌های فازی حاصل و در نظر گرفتن احتمال هر مجموعه، توان تبدیلی پارکینگ محاسبه می‌گردد که به عنوان ورودی برای مرحله چهارم اعمال می‌شود. در مرحله دوم، عدم قطعیت‌های بار، قیمت بازار، شدت تابش و سرعت باد با استفاده از روش احتمالاتی مونت کارلو مدل سازی می‌گردند. برای انجام این امر ابتدا با استفاده از داده‌های تاریخی، پارامترهای تابع توزیع احتمالاتی مناسب با هر متغیر تعیین

۳- ساختار برنامه ریزی امکانی-احتمالاتی ریز شبکه

ساختار کلی مدل پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق با این ساختار یک الگوی چندسطحی برای برنامه ریزی پارکینگ خودروهای برقی، منابع قابل کنترل و میزان کاهش بار در یک ریز شبکه در حالت اتصال به شبکه بالادست و جزیره ارائه می‌گردد. این ساختار از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است. در قسمت اول چارچوب پیشنهادی، عدم قطعیت خودروهای برقی با استفاده از روش امکانی-احتمالاتی Z-number مدل می‌گردد. در این راستا ابتدا بر اساس تعداد خودروهای

تولید سناریوهای جزیره ساز ریز شبکه

تعیین احتمال انواع رخداد جزیره ساز

تعیین سرعت برگشت پذیری ریز شبکه بر اساس نوع حادثه و سرعت عملکرد تجهیزات

زمان رخداد حوادث

میزان بار کاهش یافته در هر ساعت

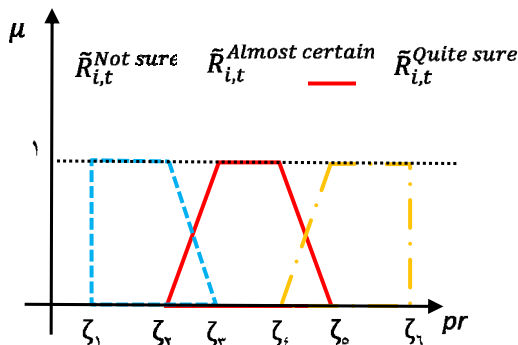
میزان توان دریافتی از شبکه اصلی در هر ساعت

میزان توان تولیدی منابع قابل کنترل در هر ساعت

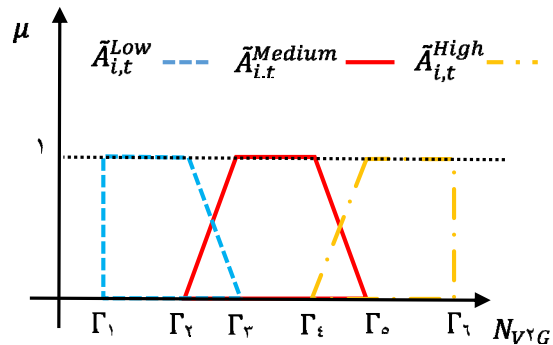
میزان توان تزریقی پارکینگ در هر ساعت

میزان توان دریافتی پارکینگ در هر ساعت

پایان



شکل ۳: تعریف مجموعه‌های فازی مربوط به احتمال.



شکل ۴: تعریف مجموعه‌های فازی مربوط به تعداد خودرو.

۳-۱-۱-۳ روش Z-number

روش Z-number در سال ۲۰۱۱ توسط آقای زاده ارائه شده که نمونه تکامل یافته روش فازی است [۲۵]. در این روش متغیرها به صورت زبانی و بازه‌های فازی تعریف می‌گردند. در روش Z-number از طبیعت امکانی و احتمالاتی متغیرهای غیر قطعی استفاده می‌شود. این امر باعث مدل‌سازی دقیق‌تر متغیر می‌گردد. در روش Z-number برای هر متغیر دو مجموعه فازی تعریف می‌گردد. یکی از مجموعه‌ها مربوط به مقدار متغیر و دیگری بیانگر احتمال آن است. در نهایت متغیر Z-number به صورت $Z = (A, R)$ نشان داده می‌شود که A مجموعه فازی مربوط به مقدار و R مجموعه فازی مربوط به احتمال است. این در حالی است که در روش فازی فقط متغیر اصلی به صورت مجموعه فازی در نظر گرفته می‌شود و احتمال رخداد هر مجموعه فازی لحاظ نمی‌گردد. در ادامه به کاربرد این روش در مدل‌سازی خودروهای برقی پرداخته خواهد شد.

۳-۱-۲ تعریف مجموعه‌های Z-number برای خودروهای برقی

برای مدل‌سازی خودروهای برقی به روش Z-number ابتدا می‌بایست مجموعه‌های فازی مربوط به احتمالات رخداد و تعداد خودروهای موجود در پارکینگ با توجه به تجربه و تعریفی که نسبت به عنوان هر مجموعه وجود دارد تعیین گردند [۲۶]. بنابراین برای تعداد خودرو، سه مجموعه تحت عناوین کم، متوسط و زیاد تعریف می‌شود. شکل ۲ تابع عضویت مجموعه‌ها را نشان می‌دهد.

مجموعه‌های فازی مربوط به احتمال رخداد نیز به صورت سه مجموعه کاملاً مطمئن، تقریباً امکان‌پذیر و غیر مطمئن طبق شکل ۳ تعریف می‌گردند [۲۶]. پس از تعیین مجموعه‌های فازی مربوط به تعداد خودرو و احتمال رخداد، مجموعه‌های Z-number با توجه به الگوی پیشنهادی [۲۶] تعیین می‌گردند. در این الگو به ازای هر مجموعه مربوط به تعداد خودرو و احتمال رخداد یک مجموعه Z-number به صورت (۱) تعریف می‌شود. در نهایت نه مجموعه به صورت Z-number برای هر ساعت به دست می‌آید

$$\tilde{N}_{i,t}^{V\gamma G,Z} = (\tilde{A}_{i,t}^{\gamma}, \tilde{R}_{i,t}^{\delta}) \quad (1)$$

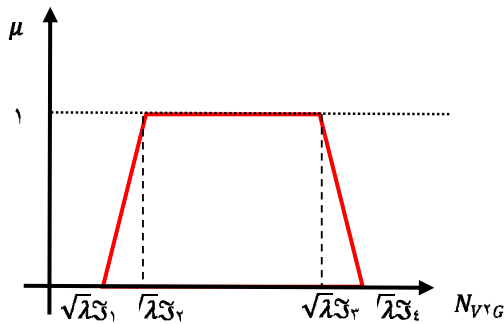
۳-۱-۳ تبدیل مجموعه‌های Z-number به فازی

برای ساده‌سازی محاسبات، تعداد خودروها در هر ساعت که به صورت Z-number در نظر گرفته شده است، با اعمال تأثیر مجموعه‌های احتمالاتی در مجموعه‌های فازی مربوط به تعداد خودرو، مجموعه‌های Z-number به حالت فازی تبدیل می‌گردند. برای این کار ابتدا مجموعه‌های احتمالاتی می‌بایست طبق (۲) فازی‌زدایی گردند

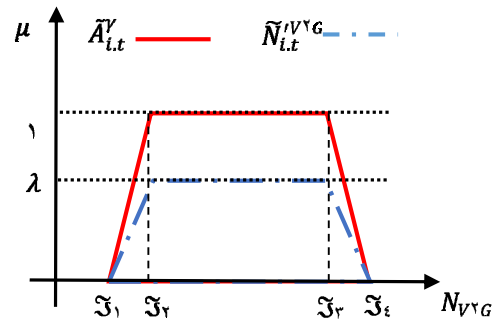
می‌گردند. بر مبنای تابع توزیع حاصل‌شده، سناریوهای متعددی به صورت تصادفی برای هر متغیر با استفاده از روش مونت کارلو حاصل خواهند شد. در گام بعد، از آنجا که برخی از سناریوهای تعریف‌شده نزدیک به هم می‌باشند و مطالعه مجزای آنها تأثیر محسوسی بر نتایج برنامه‌ریزی ریزش‌ها ندارد، بنابراین برای ساده‌سازی مسئله، با استفاده از یک روش کاهش سناریو مانند K-means، سناریوها در چند دسته با احتمال مختلف دسته‌بندی می‌گردند. نهایتاً با در نظر گرفتن احتمال هر دسته و میانگین داده‌های موجود در آن دسته، عدم قطعیت متغیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مرحله سوم چگونگی رخداد حوادث طبیعی در شبکه اصلی و جزیره‌شدن ریزش‌ها بررسی می‌گردد. در این قسمت با توجه به مدت زمان اثرگذاری حادثه، زمان رخداد آن، مدت زمان بازیابی شبکه و همچنین احتمال رخداد هر پیشامد، سناریوهای مختلفی در نظر گرفته می‌شوند. در قسمت چهارم ساختار پیشنهادی، بر مبنای نتایج حاصل از مرحله‌های قبل، برنامه‌ریزی ریزش‌ها در دو حالت متصل به شبکه بالادست و جزیره مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در حالت ایزوله سناریوهای مختلفی در نظر گرفته می‌شود که برای هر سناریو برنامه‌ریزی به صورت مستقل انجام می‌پذیرد. در نهایت با در نظر گرفتن احتمال رخداد هر سناریو، نتایج حاصل از قبیل پروفیل توان تبادلی پارکینگ، توان تولیدی میکروتوربین‌ها، میزان بار کاهش‌یافته و توان دریافتی از شبکه بالادست (در حالت متصل به شبکه) گزارش می‌گردد.

۳-۱-۳ مدل‌سازی امکانی - احتمالاتی عدم قطعیت خودروهای برقی

این مدل زمانی به کار گرفته می‌شود که در کشوری مثل ایران که تجربه پارکینگ خودروهای برقی را نداشته است بخواهیم پیش از احداث یک پارکینگ رفتار آن را در ریزش‌ها (مثلاً پیش‌بینی میزان توان تبادلی با شبکه) بررسی نماییم. برای این امر نیاز به در اختیار داشتن داده‌های تاریخی است. بنابراین می‌توان از داده‌های تاریخی یک پارکینگ خودروهای برقی در کشوری مانند آمریکا استفاده نمود. داده‌های تاریخی تابعی از الگوی استفاده شهروندان از خودروهای برقی است. این الگو وابسته به قیمت بازار برق، ساعات کاری و مدرسه، فرهنگ و ... است. در نتیجه الگوی استفاده از خودرو برقی می‌تواند شباهت‌ها و تفاوت‌هایی در دو کشور داشته باشد. این امر باعث می‌گردد این داده‌ها در کشور ایران تحت عنوان داده‌های ناقص تلقی گردد. برای استفاده مؤثرتر از این داده‌ها از روش Z-number برای پیش‌بینی رفتار پارکینگ خودروهای برقی استفاده می‌شود. در این بخش، ابتدا روش Z-number مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس به کاربرد این روش در مدل‌سازی امکانی - احتمالاتی خودروهای برقی پرداخته خواهد شد.



شکل ۵: تابع عضویت منظم شده مجموعه فازی تبدیل یافته از Z-number.



شکل ۴: تبدیل مجموعه Z-number به فازی.

$$f^{V2G}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\psi)^2}{2\pi^2}} \quad (7)$$

در این رابطه ψ میانگین و σ انحراف معیار مربوط به تابع توزیع نرمال است که با توجه به اطلاعات تاریخی اتخاذ شده از سایت (NHTS) [۲۸] و دستور (Normfit) در نرم افزار Matlab محاسبه می گردند [۲۹]. داده ها NHTS به صورت داده هایی خام از ساعات آغاز و پایان سفرهای خودروها و تاریخ روز گزارش شده، در دسترس می باشند. در داده ها حرکت هر خودرو آغاز سفر و رسیدن آن به مقصد پایان سفر است. در این مقاله، داده ها به صورت روزانه مرتب شده اند. در مرتب کردن داده ها حداقل بازه یک ساعته در نظر گرفته شده است، مثلاً اگر خودرویی سفر خود را در ساعت ۷:۱۵ شروع کرده و ساعت ۷:۴۵ به مقصد رسیده است، این حالت به صورت یک سفر بین ساعت ۷ تا ۸ در نظر گرفته شده است و خودرو در این بازه در دسترس نیست. داده های خودروهای برقی موجود در سایت NHTS پس از تعیین تابع توزیع نرمال، احتمال هر مجموعه فازی مربوط به تعداد خودروها ($prob^{V2G}$) با توجه به (λ) محاسبه می گردند [۳۰].

$$prob^{V2G}(\tilde{A}) = \int_a^d \tilde{A} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\psi)^2}{2\pi^2}} \quad (8)$$

در قسمت بعد تبدیل تعداد خودرو از حالت فازی به عدد قطعی و اعمال تأثیر احتمال محاسبه شده در تعداد خودروهای موجود در پارکینگ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱-۵ فازی زدایی و پیش بینی تعداد خودروی موجود در پارکینگ

برای این که مقدار عددی متناظر با یک مجموعه فازی $\tilde{NT}_{j,t}^{V2G}$ با تابع عضویت μ تعیین گردد از یک روش فازی زدایی استفاده می شود. در این مطالعه، روش مرکز ثقل، طبق (۹) برای فازی زدایی استفاده شده است [۳۱].

$$NT_{j,t}^{V2G} = \frac{\int (pr \mu_{\tilde{NT}_{j,t}^{V2G}}(pr)) dpr}{\int (\mu_{\tilde{NT}_{j,t}^{V2G}}) dpr} \quad (9)$$

که در رابطه بالا $NT_{j,t}^{V2G}$ ، مقدار عددی متناظر با مجموعه فازی $\tilde{NT}_{j,t}^{V2G}$ می باشد.

۳-۲ مدل سازی سرعت باد و توان توربین های بادی

برای مدل سازی عدم قطعیت سرعت باد (v)، از تابع توزیع احتمالاتی ویبال (f_v) برآزش یافته بر روی داده های تاریخی سرعت باد مطابق با (۱۰) استفاده شده است. در این رابطه پارامترهای تابع توزیع ویبال که k و c می باشند در نرم افزار Matlab و با استفاده از داده های تاریخی محاسبه می گردند. اعداد تصادفی تولید شده با استفاده از روش مونت کارلو در هر سناریو با استفاده از (۱۰) به سرعت باد تبدیل می شوند [۳۲].

$$\lambda = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (pr \times \mu_{\tilde{R}}(pr)) dpr}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{R}}(pr) dpr} \quad (2)$$

با توجه به شکل ۴ مقادیر حساب شده در (۲) که ضرایب وزنی نامیده می شوند و با نماد λ نشان داده شده اند، در تابع عضویت مؤلفه اول مجموعه های Z-number طبق (۳) ضرب می گردند. با انجام این عمل، تعداد خودرو از حالت Z-number به حالت فازی تبدیل می گردد [۲۷].

$$\mu_{\tilde{N}_{i,t}^{V2G}}(pr) = (\lambda \times (\mu_{A_{i,t}^{V2G}}(pr))) \quad (3)$$

مجموعه فازی حاصل شده ($\tilde{N}_{i,t}^{V2G}$) دارای تابع عضویت نامنظم است. برای منظم سازی تابع عضویت آن از (۴) استفاده می گردد که منجر به مجموعه فازی استاندارد متناظر با مجموعه Z-number i تحت عنوان $\tilde{N}_{i,t}^{V2G}$ می شود. در این حالت تابع عضویت آنها به صورت شکل ۵ حاصل می گردد [۲۷].

$$\mu_{\tilde{N}_{i,t}^{V2G}}(N_{V2G}) = \mu_{\tilde{N}_{i,t}^{V2G}}\left(\frac{N_{V2G}}{\sqrt{\lambda}}\right) \quad (4)$$

برای کاهش محاسبات و کاهش تعداد مجموعه های فازی، آن دسته از مجموعه های فازی که در حالت Z-number مؤلفه اولشان یکسان بوده، به دلیل این که پس از تبدیل به حالت فازی ناحیه همپوشانی زیادی دارند طبق (۵) به یک مجموعه تحت عنوان ($\tilde{NT}_{j,t}^{V2G}$) تبدیل می گردند

$$\tilde{NT}_{j,t}^{V2G} = \bigcup_i \tilde{N}_{i,t}^{V2G}, \forall j = \begin{cases} 1 & \text{if } \{i = 1, 2, 3\} \\ 2 & \text{if } \{i = 4, 5, 6\} \\ 3 & \text{if } \{i = 7, 8, 9\} \end{cases} \quad (5)$$

رابطه (۶) اشتراک مجموعه های $\tilde{NT}_{j,t}^{V2G}$ و $\tilde{NT}_{j+1,t}^{V2G}$ را تحت عنوان $\tilde{NTC}_{q,t}^{V2G}$ محاسبه می کند

$$\tilde{NTC}_{q,t}^{V2G} = \bigcap_j \tilde{NT}_{j,t}^{V2G}, \forall h = \begin{cases} 1 & \text{if } \{j = 1, 2\} \\ 2 & \text{if } \{j = 2, 3\} \end{cases} \quad (6)$$

پس از این مرحله، برای اعمال تأثیر اطلاعات تاریخی ناقصی که موجود است ابتدا پارامترهای تابع توزیع نرمال مربوط به اطلاعات تاریخی تعیین می شوند. سپس تأثیر آنها به صورت فازی- احتمالاتی در نظر گرفته خواهند شد. این مراحل در قسمت بعد مورد بررسی قرار گرفته اند.

۳-۱-۴ تعیین تابع توزیع نرمال با استفاده از اطلاعات تاریخی

برای تعیین احتمال رخداد هر مجموعه فازی با استفاده از اطلاعات تاریخی می بایست ابتدا یک تابع توزیع احتمال با توجه به اطلاعات تاریخی تعیین گردد. در این مطالعه از تابع توزیع نرمال برای بررسی رفتار احتمالاتی تعداد خودروهای موجود در پارکینگ استفاده شده است. رابطه (۷) تابع توزیع نرمال را نشان می دهد

۳-۴ مدل‌سازی تقاضای بار و قیمت بازار

ماهیت‌های غیر قطعی تقاضای بار و قیمت بازار که برای هر ساعت متفاوت می‌باشند، با استفاده از تابع توزیع نرمال به صورت (۱۶) توصیف می‌گردند. مشابه قبل، مقادیر میانگین μ و انحراف معیار σ ، از اطلاعات گذشته هر یک از این متغیرها به دست می‌آید [۳۳]

$$f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

۳-۵ مدل‌سازی حوادث جزیره‌ساز در شبکه اصلی

مطابق با شکل ۶ حادثه جزیره‌ساز برنامه‌ریزی نشده به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند به صورت تصادفی در هر زمان از افق برنامه‌ریزی رخ دهد. از آنجا که زمان شروع حادثه نامشخص است در نتیجه تمام سناریوهای جزیره‌ساز با احتمال یکسان در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین به ازای هر ساعت از ۲۴ ساعت یک شبانه‌روز که می‌تواند بیانگر زمان شروع حادثه باشد یک سناریو با احتمال یک بیست و چهارم در نظر گرفته خواهد شد. همچنین با توجه به این که حادثه چه مدت زمان باعث قرارگرفتن ریزشک‌ها در حالت جزیره می‌شود، تعدادی سناریو دیگر به ازای هر بازه زمانی محتمل در نظر گرفته می‌شود. در نهایت رخدادهای مختلف برای برنامه‌ریزی منابع ریزشک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این حالت برای هر سناریو، برنامه بهینه‌سازی به طور مستقل اجرا گردیده و میزان تولید هر منبع و میزان بار کاهش‌یافته محاسبه می‌شود.

۳-۶ برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی

در این مطالعه، برنامه‌ریزی پارکینگ خودروهای برقی بر اساس تعداد خودروهای موجود در آن انجام می‌شود. از آنجا که متناظر با هر خودرو یک ذخیره‌کننده انرژی در نظر گرفته می‌شود، برنامه‌ریزی پارکینگ خودروهای برقی شبیه ذخیره‌کننده انرژی در نظر گرفته شده است. اما از لحاظ ظرفیت شارژ و دشارژ در هر ساعت که متناسب با تعداد خودروهای موجود در پارکینگ است، با ذخیره‌کننده انرژی که ظرفیت ثابتی دارد متفاوت است. بنابراین پس از تعیین عدم قطعیت تعداد خودروهای موجود در پارکینگ در هر ساعت با استفاده از روش Z -number، میزان تبادل توان پارکینگ با شبکه به صورت زیر مدل می‌گردد

$$P_{v,t}^{PEV, inj} \leq N^{V\gamma G} P_{bat}^{dch, max}, \forall v, t \quad (17)$$

$$P_{v,t}^{PEV, del} \leq N^{V\gamma G} P_{bat}^{ch, max}, \forall v, t \quad (18)$$

$$P_{v,t}^{PEV, del} = N^{V\gamma G} P_{bat}^{ch, max} \phi_{v,t}^{PEV, ch} \eta_v^{PEV} \quad (19)$$

$$P_{v,t}^{PEV, inj} = N^{V\gamma G} P_{bat}^{dch} \phi_{v,t}^{PEV, inj} / \eta_v^{PEV} \quad (20)$$

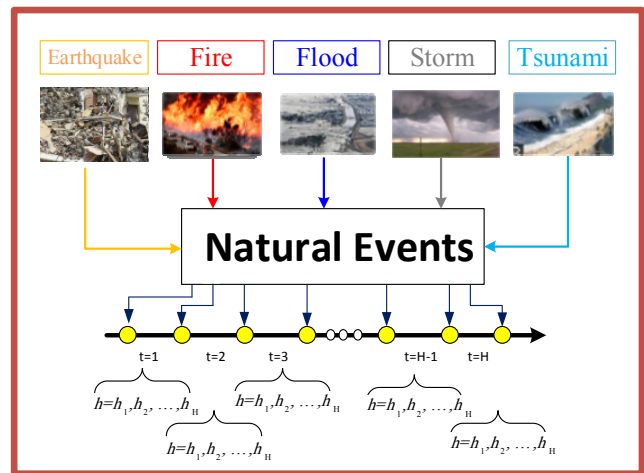
$$P_{e,t}^{EV, ch} \leq \delta_{e,t}^{EV, ch} P_{e,t}^{EV, ch, max}, \delta_{e,t}^{EV, ch} \in \{0, 1\}, \forall e, t \quad (21)$$

$$P_{e,t}^{EV, dch} \leq \delta_{e,t}^{EV, dch} P_{e,t}^{EV, dch, max}, \delta_{e,t}^{EV, dch} \in \{0, 1\}, \forall e, t \quad (22)$$

$$E_{e,t}^{EV, min} \leq E_{e,t}^{EV} \leq E_{e,t}^{EV, max}, \forall e, t \quad (23)$$

$$\delta_{e,t}^{EV, ch} + \delta_{e,t}^{EV, dch} + \delta_{e,t}^{EV, nch \& ndch} = 1, \forall e, t \quad (24)$$

$$E_{e,t+\Delta t}^{EV} = E_{e,t}^{EV} + (\delta_{e,t}^{EV, ch} P_{e,t}^{EV, ch} \eta_e^{EV, ch} \Delta t - \delta_{e,t}^{EV, dch} P_{e,t}^{EV, dch} \Delta t / \eta_e^{EV, dch}), \forall e, t \quad (25)$$



شکل ۶: مدل‌سازی رخداد حوادث.

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (10)$$

توان تولیدی توربین بادی به سرعت باد وابسته است که طبق (۱۱) محاسبه می‌شود [۳۲]

$$P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_{in}^c \text{ or } v \geq v_{out}^c \\ \left(\frac{v - v_{in}^c}{v_{out}^c - v_{in}^c}\right) \times P_R & v_{in}^c \leq v \leq v_R \\ P_R & v_R \leq v \leq v_{out}^c \end{cases} \quad (11)$$

در (۱۱)، P_R توان نامی توربین بادی، P_w توان تولیدی توربین بادی در ساعت t ، v_{in}^c سرعت قطع پایین، v_{out}^c سرعت قطع بالا و v_R سرعت نامی توربین بادی می‌باشند.

۳-۳ مدل‌سازی شدت تابش و توان پنل‌های فتوولتائیک

توان خروجی واحدهای فتوولتائیک با (۱۲) نشان داده می‌شود

$$P_{pv} = p_{STC} \times \frac{S}{S_{STC}} \times [1 + k_{MPT}(T_C - T_a)] \quad (12)$$

که P_{STC} توان اکتیو واحد فتوولتائیک در شرایط تست استاندارد، S_{STC} شدت تابش در شرایط تست استاندارد، T_C دمای سلول فتوولتائیک، K_{MPT} ضریب دمایی حداکثر توان و S و T_a به ترتیب شدت تابش و دمای محیط می‌باشند که با تابع چگالی احتمال بتا مدل می‌گردند. توزیع بتا برای شدت تابش S در بازه زمانی t با استفاده از (۱۳) بیان می‌گردد که شدت تابش در هر سناریو با استفاده از این تابع توزیع احتمالاتی به دست می‌آید

$$f_s(s) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times (s)^{\alpha-1} \times (1-s)^{\beta-1} \quad (13)$$

در این رابطه Γ تابع گاما است و α و β توسط مقادیر میانگین μ_s و انحراف معیار σ_s با استفاده از (۱۴) و (۱۵) تعیین می‌گردند

$$\beta = (1 - \mu_s) \times \left(\frac{\mu_s(1 + \mu_s)}{(\sigma_s)^2} - 1\right) \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\mu_s \times \beta}{(1 - \mu_s)} \quad (15)$$

جدول ۱: مشخصات پارکینگ و خودروهای برقی.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$N_{V,t}^{EV}$	۱۰۰	$P_{e,t}^{EV,dch,max}$ (kW/h)	۱۷
$\gamma_{V,t}^{PEV,inj}$	۰.۹۵	$E_{e,t}^{EV,max}$ (kW)	۷۰
$\eta_e^{EV,dch}$	۰.۹	$P_{e,t}^{EV,ch,max}$ (kW/h)	۱۷
$\eta_e^{EV,ch}$	۰.۹	$E_{e,t}^{EV,min}$ (kW)	۰
$\gamma_{V,t}^{PEV,del}$	۰.۹۵	NP	۱

رابطه (۲۶) هزینه بهره‌برداری سیستم را نشان می‌دهد که شامل هزینه بهره‌برداری منابع کنترل‌پذیر، منابع تجدیدپذیر و هزینه توان تبادل شده با شبکه اصلی است. ترم چهارم این رابطه بیانگر هزینه بهره‌برداری خودروهای برقی و ترم پنجم آن هزینه روشن و خاموش شدن منابع قابل کنترل را نشان می‌دهند. رابطه (۲۷) نیز تعادل توان تولیدی و مصرفی را در هر ساعت نشان می‌دهد. روابط (۲۸) تا (۳۳) محدودیت‌های مرتبط با منابع قابل کنترل را بیان می‌کنند. همچنین (۲۸) محدودیت توان خروجی منابع قابل کنترل، (۲۹) و (۳۰) بیانگر محدودیت نرخ افزایش و کاهش توان خروجی منابع قابل کنترل و (۳۱) و (۳۲) محدودیت روشن و خاموش شدن هر واحد را نشان می‌دهند. در نهایت (۳۳) بیشینه توان در دسترس منابع تولید پراکنده را بیان می‌کند. در این حالت فرض بر این است که توان قابل تبادل با شبکه بالادست محدودیتی ندارد.

۳-۸ برنامه‌ریزی امکانی - احتمالاتی ریزشبکه در حالت جزیره

برای برنامه‌ریزی ریزشبکه در حالت جزیره تابع هدف مسئله به صورت (۳۴) در نظر گرفته می‌شود. این تابع هدف باعث بهینه‌شدن هم‌زمان هزینه بهره‌برداری و هزینه عدم تأمین توان می‌گردد

$$CI = \min(OC + \sum_{s=1}^{NS} P_s \sum_{t=1}^T (\sum_{h=1}^H \Delta t_h \times \pi_h \times (\sum_{r=1}^{NR} LS_{l,t}^{s,h} \times VOLL))) \quad (34)$$

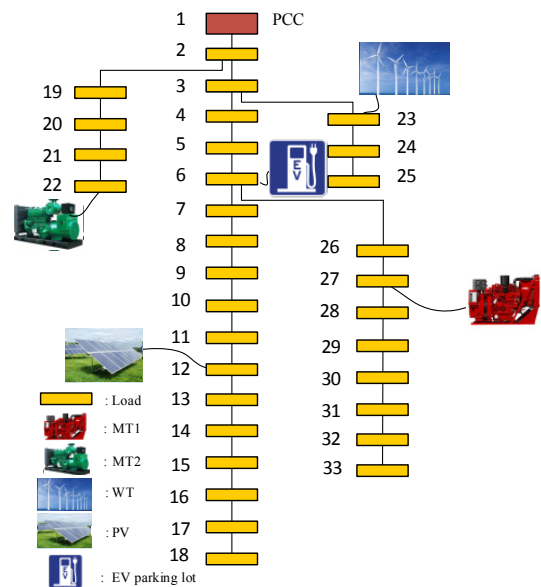
$$\sum_{g=1}^{NG} P_{g,t}^{s,h} + \sum_{r=1}^{NR} P_{r,t}^{s,h} + \sum_{v=1}^{NP} (P_{v,t}^{PEV,inj,s,h} - P_{v,t}^{PEV,del,s,h}) = \sum_{l=1}^{NL} (L_{l,t}^{s,h} - LS_{l,t}^{s,h}), \quad \forall t, s \quad (35)$$

$$0 \leq LS_{l,t}^{s,h} \leq LS_{l,t}^{s,h,max}, \quad \forall l, h, t, s \quad (36)$$

رابطه (۳۵) بیانگر تعادل توان تولیدی و مصرفی در حالت جزیره‌شدن ریزشبکه است و (۳۶) نیز محدودیت میزان کاهش بار را در هر ساعت نشان می‌دهد. سایر محدودیت‌های حالت متصل به شبکه نیز در این حالت برقرار می‌باشند.

۳-۹ تجزیه و تحلیل نتایج

در این مطالعه مدل پیشنهادی بر روی شبکه توزیع اصلاح‌شده ۳۳ باس IEEE اجرا گردیده است [۳۴]. این شبکه با اضافه‌شدن چندین منبع تولید پراکنده و یک پارکینگ خودروهای برقی به صورت شکل ۷ اصلاح شده است. پیش‌بینی میزان بار، توان خروجی توربین بادی و واحد فتوولتاییک در شکل ۸ و قیمت بازار نیز در شکل ۹ برای یک سناریوی نمونه نشان داده شده است. همچنین مشخصات پارکینگ و خودروهای برقی آن در جدول ۱ بیان شده است. قیمت توان تبدالی پارکینگ



شکل ۷: شبکه تحت مطالعه.

رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب محدودیت توان تزریقی و دریافتی یک پارکینگ را نشان می‌دهند. روابط (۱۹) و (۲۰) نیز به ترتیب میزان توان تزریقی و دریافتی یک پارکینگ را بیان می‌کنند. روابط (۲۱) تا (۲۵) نیز محدودیت‌های مربوط به باتری هر خودرو را نشان می‌دهند.

۳-۷ برنامه‌ریزی امکانی - احتمالاتی در حالت عملکرد عادی

برای برنامه‌ریزی امکانی - احتمالاتی ریزشبکه در شرایط عادی، میزان شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی، میزان توان تزریقی منابع تولید پراکنده قابل کنترل و میزان توان تبادل شده با شبکه اصلی به عنوان متغیرهای مسئله در نظر گرفته می‌شوند که با استفاده از تابع هدف و قیود زیر می‌بایست مقدار بهینه آنها تعیین شوند

$$OC = \min \sum_{s=1}^{NS} P_s \sum_{t=1}^T (\sum_{g=1}^{NG} F_g(P_{g,t}^s) + (\sum_{r=1}^{NR} P_{r,t}^s C_r + P_{u,t}^s U_t)) + \sum_{s=1}^{NS} P_s \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^{NP} (P_{v,t}^{PEV,inj,s} - P_{v,t}^{PEV,del,s}) C_v + \sum_{s=1}^{NS} P_s \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{NG} (SU_{g,t}^s + SD_{g,t}^s) \quad (26)$$

$$\sum_{g=1}^{NG} P_{g,t}^s + \sum_{r=1}^{NR} P_{r,t}^s + \sum_{v=1}^{NP} (P_{v,t}^{PEV,inj,s} - P_{v,t}^{PEV,del,s}) + P_{u,t}^s = \sum_{l=1}^{NL} L_{l,t}^s + Ploss_t^s, \quad \forall s, t \quad (27)$$

$$P_g^{min} I_{g,t}^s \leq P_{g,t}^s \leq P_g^{max} I_{g,t}^s, \quad \forall g, t, s \quad (28)$$

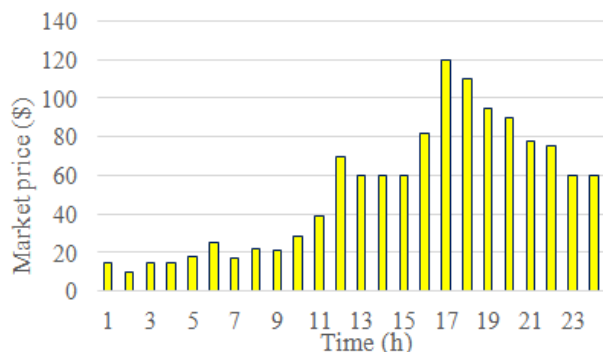
$$P_{g,t}^s - P_{g,t-1}^s \leq UR_g, \quad \forall g, t, s \quad (29)$$

$$P_{g,t-1}^s - P_{g,t}^s \leq DR_g, \quad \forall g, t, s \quad (30)$$

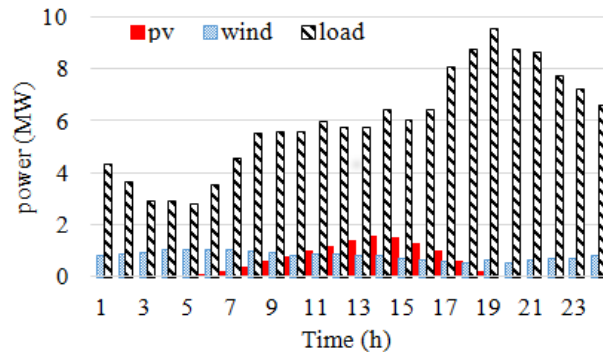
$$SU_{g,t}^s \geq CU_g (I_{g,t}^s - I_{g,t-1}^s), SU_{g,t}^s \geq 0, \quad \forall g, t, s \quad (31)$$

$$SD_{g,t}^s \leq CD_g (I_{g,t-1}^s - I_{g,t}^s), SD_{g,t}^s \geq 0, \quad \forall g, t, s \quad (32)$$

$$0 \leq P_{r,t}^s \leq P_{r,t}^{max} \quad (33)$$



شکل ۹: قیمت بازار برق در یک سناریوی نمونه.



شکل ۸: میزان توان منابع تجدیدپذیر و بار در یک سناریوی نمونه.

جدول ۲: مشخصات منابع کنترل‌پذیر.

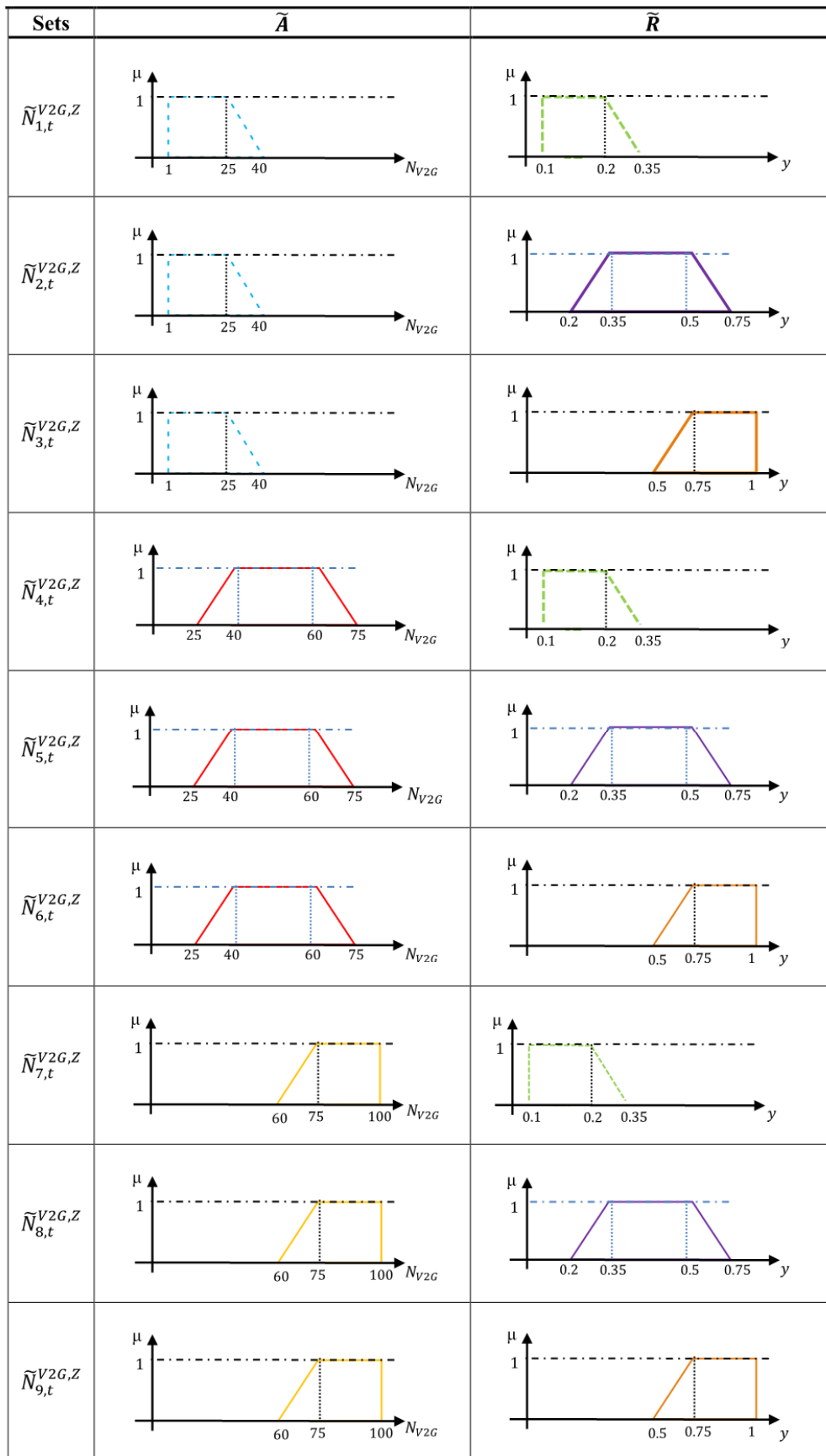
واحد	هزینه بهره‌برداری (\$/MWh)	ظرفیت (MW)	نرخ افزایش و کاهش تولید (MW/h)
۱	۵۱,۸۶	۰-۱,۲	۰,۶
۲	۷۴,۰۹	۰-۱,۸	۰,۹

جدول ۳: سناریوهای جزیره‌شده ریزشکبه.

h	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
π_h	۰,۰۰۶	۰,۰۶۱	۰,۲۴۲	۰,۳۸۲	۰,۲۴۲	۰,۰۶۱	۰,۰۰۶

شکل ۱۱- الف است. در این حالت اجازه تزریق توان به پارکینگ غالباً در ساعت پیک بار داده می‌شود و دریافت توان تنها در ساعت کم‌باری امکان‌پذیر خواهد بود تا عملکرد ریزشکبه بهینه‌ترین شرایط را داشته باشد. در سناریوی دوم مطابق با شکل ۱۱- ب اجازه تزریق توان پارکینگ در اکثر ساعت‌ها داده می‌شود اما بیشتر توان تزریقی در ساعت پیک بار خواهد بود. همچنین توان دریافتی پارکینگ علاوه بر ساعت‌های کم‌باری در برخی ساعت‌های دیگر نیز صورت می‌گیرد تا ساعت‌های بیشتری پارکینگ امکان تزریق توان برای مقابله با حوادث داشته باشد. برنامه‌ریزی توان تولیدی میکروتوربین‌های #۱ و #۲ در دو سناریوی ذکر شده، به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده‌اند. در سناریوی اول میکروتوربین #۱ فقط در ساعت‌های پیک بار وارد مدار شده که نسبت به میکروتوربین #۲ بازه زمانی بیشتری به دلیل قیمت پایین‌تر توان تزریق خواهد کرد. در سناریوی دوم میکروتوربین #۱ علاوه بر ساعت‌های پیک در تمامی ساعت‌های دیگر می‌بایست به یک میزان مشخص توان تزریق نماید تا ریزشکبه بتواند به طور مؤثر و بهینه به مقابله با حوادث مختلف بپردازد. مطابق با شکل ۱۳ برنامه‌ریزی میکروتوربین #۲ در سناریوی #۱ فقط معطوف به بازه زمانی ۲۲-۱۶ خواهد بود که نسبت به میکروتوربین #۱، بازه زمانی کمتری است و دلیل آن همان گونه که قبلاً هم ذکر شد، قیمت بالاتر توان تولیدی این منبع است. در سناریوی #۲ این منبع علاوه بر بازه زمانی ذکر شده که در ماکسیمم ظرفیت خود توان تزریق می‌نماید، در سایر ساعت‌ها نیز می‌بایست به گونه‌ای توان تزریق کند تا توانایی ریزشکبه برای حداقل‌سازی آسیب‌پذیری از حوادث به طور بهینه و با توجه به محدودیت‌های فنی بالا برسد. توان دریافتی ریزشکبه از شبکه بالادست در سناریوی اول در شکل ۱۴ نشان داده شده است. این پروفیل در مقایسه با بار شبکه رفتار تقریباً مشابهی دارد اما در ساعات میانی روز که شدت تابش خورشید بیشتر است کاهش چشم‌گیری پیدا نموده است. همچنین شکل ۱۵ میزان بار تأمین‌نشده را در طول یک روز در مواجهه با حوادث طبیعی نشان می‌دهد. بیشترین بار تأمین‌نشده مربوط به ساعت‌های پیک بار و کمترین آن در ساعت‌های ۷-۲ و ۱۵-۱۱ رخ می‌دهد. متوسط انرژی تأمین‌نشده حدود ۰,۴۵ MW و پیک آن نزدیک

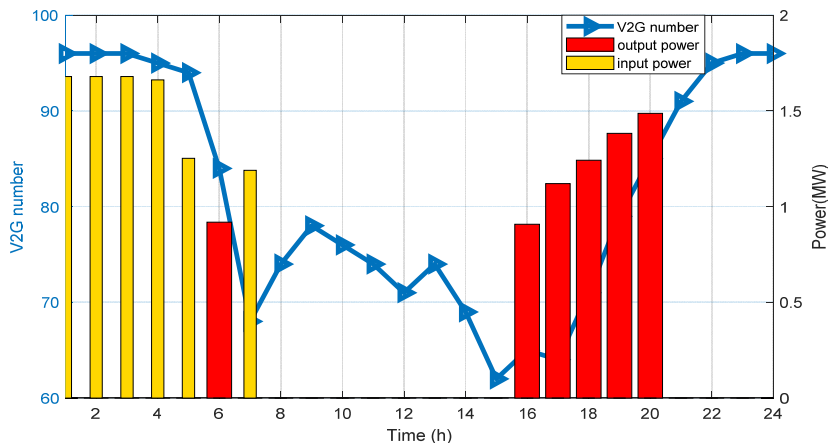
خودروهای برقی با ریزشکبه برابر قیمت بازار در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات منابع کنترل‌پذیر در جدول ۲ بیان گردیده‌اند. هزینه کاهش بار بر اساس [۳۵] در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت پروفیل بار، توان خروجی توربین بادی و واحد فتوولتاییک، از روش مونت کارلو برای تولید ۲۵۰۰ سناریو با احتمال رخداد یکسان استفاده شده که با استفاده از روش K-means تعداد سناریوها به ۵ مورد کاهش داده می‌شوند [۳۶]. مسئله تحت مطالعه به صورت برنامه‌ریزی غیر خطی ترکیب‌شده با اعداد صحیح با استفاده از روش CONOPT در نرم‌افزار GAMS بهینه‌سازی شده است. برای ارزیابی مدل ارائه‌شده دو سناریو در نظر گرفته شده است که عبارتند از:
 سناریوی #۱: در این سناریو برنامه‌ریزی پارکینگ خودروهای برقی و میکروتوربین‌ها در حالت عملکرد عادی ریزشکبه صورت می‌گیرد که به شبکه اصلی متصل می‌باشد.
 سناریوی #۲: این سناریو به برنامه‌ریزی پارکینگ خودروهای برقی و میکروتوربین‌ها در حالتی می‌پردازد که ریزشکبه به دلیل وقوع حادثه در شبکه اصلی از آن جدا شده و به صورت جزیره عمل می‌نماید. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت رخداد حادثه در شبکه بالادست چندین سناریو به صورت جدول ۳ در نظر گرفته شده است. با اجرای مدل ارائه‌شده، برنامه شارژ و دشارژ خودروهای برقی به گونه‌ای خواهد بود که با توجه به امکانات ریزشکبه بهینه‌ترین شرایط را ایجاد نماید. در این سناریو عدم قطعیت تعداد خودروهای برقی موجود در پارکینگ با استفاده از روش Z-number به صورت امکانی-احتمالاتی مدل‌سازی می‌گردد. مجموعه‌های Z-number برای تعداد مجموعه‌های Z-number مربوط به خودروهای موجود در پارکینگ در هر ساعت مطابق با شکل ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از داده‌های تاریخی سایت NHTS [۲۸]، پارامترهای تابع توزیع نرمال در هر ساعت تعیین گردیده و مطابق با مراحل بیان‌شده در قسمت قبل، تعداد خودروهای موجود در پارکینگ در هر ساعت مطابق با شکل ۱۱ پیش‌بینی می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی بهینه پارکینگ خودروهای برقی در حالت اتصال ریزشکبه به شبکه اصلی و عملکرد عادی آن به صورت



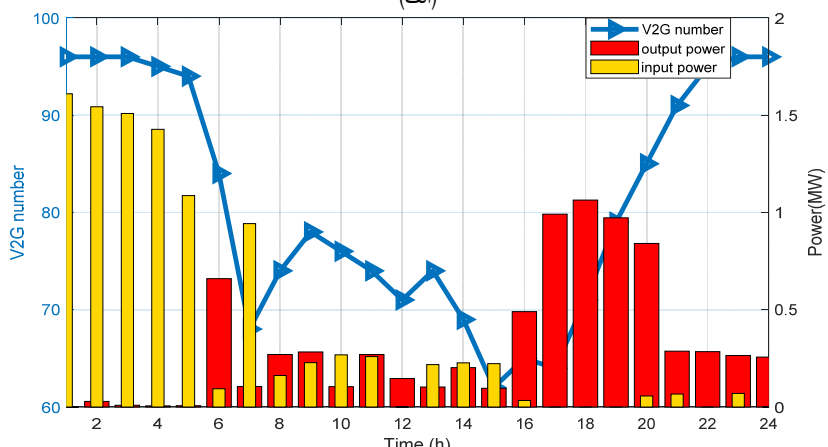
شکل ۱۰: مجموعه‌های Z-number برای تعداد خودروهای موجود در پارکینگ.

Z-number (حالت سوم) برای عدم قطعیت خودروهای موجود در پارکینگ و برای دو حالت متصل به شبکه بالادست و جزیره به ترتیب در شکل‌های ۱۶- الف و ۱۶- ب مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته‌اند. تعداد داده‌های تاریخی، کیفیت آنها و انتخاب روش مناسب نقش مهمی در دقت

به ۰.۹ MW است. برای نشان دادن اهمیت روش پیشنهادی، هزینه بهره‌برداری ریزشکبه در حضور خودروهای برقی و بر مبنای روش‌های مدل‌سازی قطعی (حالت اول) [۳۷] و [۳۸]، فازی (حالت دوم) [۳۹] و روش پیشنهادی

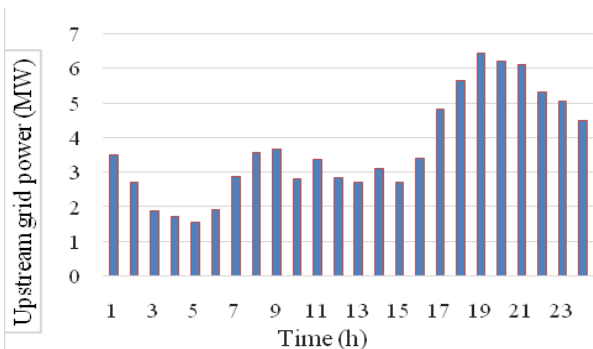


(الف)

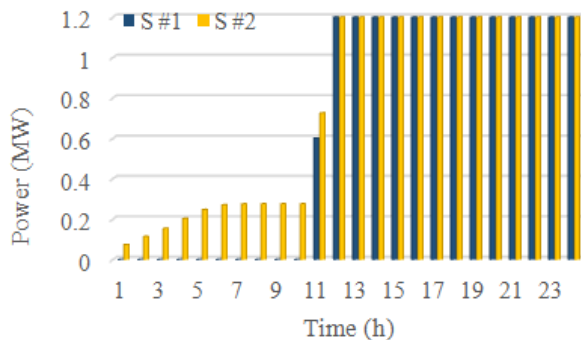


(ب)

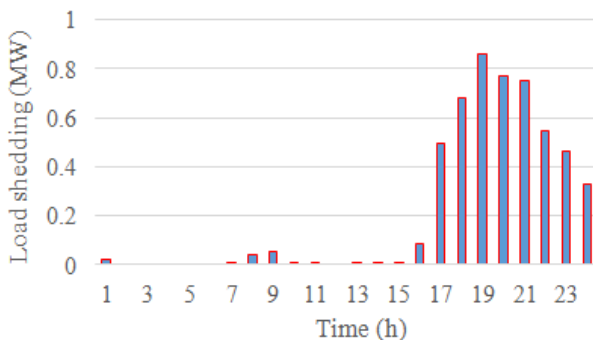
شکل ۱۱: پروفیل توان دریافتی و تزریقی پارکینگ خودروهای برقی، (الف) سناریوی ۱# و (ب) سناریوی ۲#.



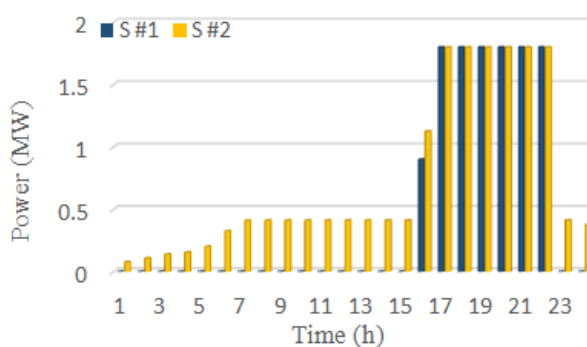
شکل ۱۴: پروفیل توان دریافتی از شبکه اصلی در سناریوی ۱#.



شکل ۱۲: پروفیل توان تولیدی میکروتوربین ۱#.



شکل ۱۵: پروفیل بار قطع‌شده.



شکل ۱۳: پروفیل توان تولیدی میکروتوربین ۲#.

مدل‌سازی عدم قطعیت تعداد خودروهای موجود در پارکینگ در هر ساعت دارد. به همین دلیل در حالت قطعی پیش‌بینی بدبینانه‌تر و محافظه‌کارانه‌تر انجام می‌گردد. در حالت فازی با استفاده از تابع عضویتی که به صورت

مدل‌سازی عدم قطعیت تعداد خودروهای موجود در پارکینگ در هر ساعت دارد. به همین دلیل در حالت قطعی پیش‌بینی بدبینانه‌تر و محافظه‌کارانه‌تر انجام می‌گردد. در حالت فازی با استفاده از تابع عضویتی که به صورت

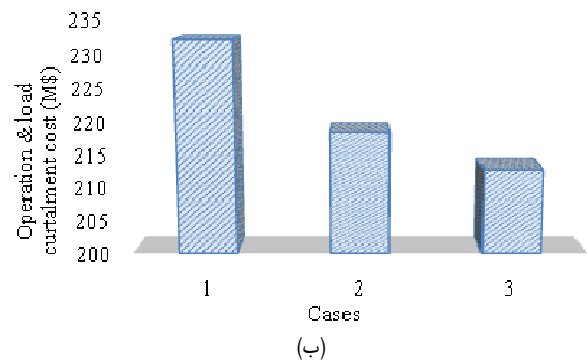
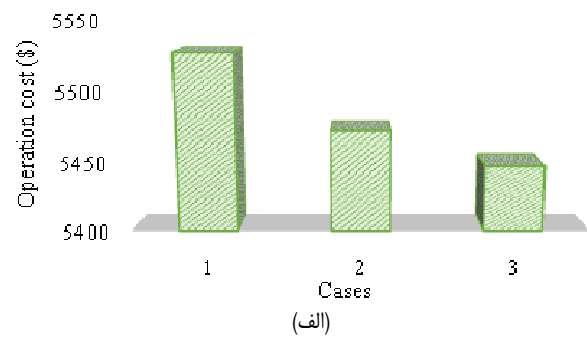
دیگر پیاده‌سازی مدل سناریومحور برای جزیره‌شدن ریزشبه در مواجهه با حوادث طبیعی، علاوه بر در نظر گرفتن بیشتر حالات امکان‌پذیر بر مبنای احتمال آنها، برنامه پیشنهادی برای بهره‌برداری ریزشبه همراه با هزینه کمتری خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

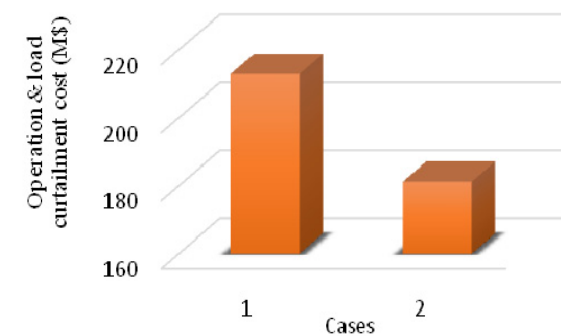
این مقاله یک چارچوب پیشگیرانه، امکانی- احتمالاتی و سناریومحور برای برنامه‌ریزی بهینه پارکینگ خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده داخل یک ریزشبه پیشنهاد داده است. در این مطالعه عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر، قیمت بازار و میزان بار به صورت احتمالاتی با استفاده از روش مونت کارلو، چگونگی رخداد خطا در شبکه اصلی به صورت سناریومحور و عدم قطعیت مربوط به تعداد خودرو موجود در پارکینگ در ساعت‌های مختلف با استفاده از روش امکانی- احتمالاتی Z-number مدل گردیده‌اند. در این ساختار عملکرد ریزشبه در دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه اصلی به دلیل بروز خطا در شبکه اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. نهایتاً مدل پیشنهادی با اجرا در شبکه توزیع ۳۳ باس IEEE که به صورت یک ریزشبه در نظر گرفته شده است، مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد. به کارگیری مدل ارائه‌شده برای برنامه‌ریزی ریزشبه در مواجهه با حوادث طبیعی بر مبنای تصمیم‌گیری برای زمان‌بندی شارژ و دشارژ پارکینگ خودروهای برقی و توان خروجی میکروتوربین‌ها، منجر به کمینه‌کردن تأثیرات حوادث طبیعی بر ریزشبه می‌گردد. کاهش تأثیرپذیری ریزشبه از بلایای طبیعی بر اساس کاهش میزان انرژی تأمین‌نشده به خصوص در ساعت‌های پیک بار که قیمت بازار بیشینه است، نشان داده شده است. برای ادامه این مطالعه می‌توان برنامه‌ریزی پیشگیرانه را به صورت ریسک‌محور تحت مطالعه قرار داد که بر مبنای میزان پذیرش ریسک ناشی از عدم قطعیت منابع تولید پراکنده و پارکینگ خودروهای برقی، برنامه‌ریزی منابع را پیشنهاد می‌کند.

مراجع

- [1] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 8, no. 1, Jan./Feb. 2010.
- [2] U. S. Department of Energy, *DOE Microgrid Workshop Report*, Off. Electr. Deliv. Energy Reliab. Smart Grid R&D Program, San Diego, California, USA, pp. 1-32, 2011.
- [3] Y. Xu and C. Singh, "Power system reliability impact of energy storage integration with intelligent operation strategy," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 1129-1137, Mar. 2014.
- [4] X. Lu, K. Zhou, S. Yang, and H. Liu, "Multi-objective optimal load dispatch of microgrid with stochastic access of electric vehicles," *J. Clean. Prod.*, vol. 195, pp. 187-199, Sept. 2018.
- [5] M. D. Galus, R. A. Waraich, and G. Andersson, "Predictive, distributed, hierarchical charging control of PHEVs in the distribution system of a large urban area incorporating a multi-agent transportation simulation," in *Proc. 17th Power Syst. Comput. Conf.*, 7 pp. 2011.
- [6] H. Wang and J. Huang, "Joint investment and operation of microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 833-845, Mar. 2017.
- [7] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, and J. Kim, "Decentralized energy management system for networked microgrids in grid-connected and islanded modes," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 1097-1105, Mar. 2016.
- [8] W. Su, J. Wang, and J. Roh, "Stochastic energy scheduling in microgrids with intermittent renewable energy resources," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1876-1883, Jul. 2014.
- [9] Y. Wu, G. J. Lim, and J. Shi, "Stability-constrained microgrid operation scheduling incorporating frequency control reserve," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1007-1017, Mar. 2020.
- [10] G. Liu, T. Jiang, T. B. Ollis, X. Zhang, and K. Tomsovic, "Distributed energy management for community microgrids



شکل ۱۶: مقایسه هزینه بهره‌برداری ریزشبه بر مبنای مدل‌های مختلف عدم قطعیت خودروهای برقی، (الف) حالت متصل به شبکه بالادست و (ب) حالت جزیره.



شکل ۱۷: مقایسه هزینه بهره‌برداری ریزشبه بر مبنای مدل‌های مختلف حوادث جزیره‌ساز.

تجربی تعریف می‌شود، مدل‌سازی عدم قطعیت از دقت بیشتری نسبت به حالت قطعی برخوردار است اما نسبت به حالت Z-number که از اطلاعات تاریخی ناقص و تعریف تابع عضویت به صورت هم‌زمان استفاده شده است، دقت کمتری دارد. بنابراین با توجه به نقش بیشتری که برای خودروهای برقی در ریزشبه با استفاده از روش Z-number پیش‌بینی می‌گردد، هزینه بهره‌برداری ریزشبه در این حالت نسبت به سایر روش‌های ذکرشده کمتر خواهد بود. از طرف دیگر بیشترین هزینه بهره‌برداری مربوط به حالتی است که عدم قطعیت تعداد خودروها به صورت قطعی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۷ هزینه بهره‌برداری و عدم تأمین توان ریزشبه در حالت جزیره، در [۴۰] (حالت اول) که بر مبنای بدترین حالت در نظر گرفته شده است و این مطالعه (حالت دوم)، مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است در نظر گرفتن بدبینانه حادثه علاوه بر در پی داشتن بهره‌برداری بسیار محافظه‌کارانه از ریزشبه، هزینه‌های مربوط را نیز افزایش می‌دهد. از آنجا که احتمال جزیره‌شدن ریزشبه بر اساس بدترین حالت بسیار کم هست، در نتیجه در نظر گرفتن این حالت برای برنامه‌ریزی ریزشبه منطقی نیست. از طرف

- [32] L. Dong, W. Cheng, H. Bao, and Y. Yang, "Probabilistic load flow analysis for power system containing wind farms," in *Proc Asia-Pacific, Power Energy Eng. Conf.*, 4 pp., Chengdu, China, 28-31 Mar. 2010.
- [33] H. Haddadian and R. Noroozian, "Multi-microgrids approach for design and operation of future distribution networks based on novel technical indices," *Appl. Energy*, vol. 185, pp. 650-663, Jan. 2017.
- [34] M. Chis, M. M. A. Salama, and S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies," *IEEE Proc.-Generation, Transm. Distrib.*, vol. 144, no. 3, pp. 225-230, May 1997.
- [35] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghaie, "Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2869-2879, Nov. 2016.
- [36] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghaie, "Developing a stochastic approach for optimal scheduling of isolated microgrids," in *Proc. 23rd Iran. Conf. Electr. Eng.*, vol. 10, pp. 1671-1676, 10-14 May 2015.
- [37] F. H. Pereyra Zamora, et al., "Evaluation of the impact of electric vehicles on distribution systems combining deterministic and probabilistic approaches," *IET Conf. Publ.*, Article ID 0861, Stockholm, Sweden, 10-13 Jun. 2013.
- [38] R. Wegmann, V. Doge, J. Becker, and D. U. Sauer, "Optimized operation of hybrid battery systems for electric vehicles using deterministic and stochastic dynamic programming," *J. Energy Storage*, vol. 14, pp. 22-38, Dec. 2017.
- [39] Y. Jingwei, L. Diansheng, Y. Shuang, and H. Shiyu, "Charging load forecasting for electric vehicles based on fuzzy inference," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 484, pp. 585-594, Nov. 2014.
- [40] A. Khodaei, "Resiliency-oriented microgrid optimal scheduling," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1584-1591, Jul. 2014.
- considering network operational constraints and building thermal dynamics," *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 83-95, Apr. 2019.
- [11] W. Chen, Y. Zeng, and C. Xu, "Energy storage subsidy estimation for microgrid: a real option game-theoretic approach," *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 373-382, Apr. 2019.
- [12] E. Mortaz, A. Vinel, and Y. Dvorkin, "An optimization model for siting and sizing of vehicle-to-grid facilities in a microgrid," *Appl. Energy*, vol. 242, pp. 1649-1660, May 2019.
- [13] M. R. Ebrahimi and N. Amjadi, "Adaptive robust optimization framework for day-ahead microgrid scheduling," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 107, pp. 213-223, May 2019.
- [14] D. E. Olivares, C. A. Canizares, and M. Kazerani, "A centralized energy management system for isolated microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1864-1875, Jul. 2014.
- [15] S. Singh, S. Jagota, and M. Singh, "Energy management and voltage stabilization in an islanded microgrid through an electric vehicle charging station," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, pp. 679-694, Aug. 2018.
- [16] S. Cai, Y. Xie, Q. Wu, and Z. Xiang, "Robust MPC-based microgrid scheduling for resilience enhancement of distribution system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, Article ID 106086, Oct. 2020.
- [17] A. Sefidgar-Dezfouli, M. Joorabian, and E. Mashhour, "A multiple chance-constrained model for optimal scheduling of microgrids considering normal and emergency operation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 112, pp. 370-380, Nov. 2019.
- [18] A. Khodaei, "Microgrid optimal scheduling with multi-period islanding constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1383-1392, Nov. 2014.
- [19] C. Gouveia, J. Moreira, C. L. Moreira, and J. A. Pecos Lopes, "Coordinating storage and demand response for microgrid emergency operation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1898-1908, Apr. 2013.
- [20] S. Bahramirad, W. Reder, and A. Khodaei, "Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2056-2062, Dec. 2012.
- [21] J. Mitra and M. R. Vallem, "Determination of storage required to meet reliability guarantees on island-capable microgrids with intermittent sources," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 2360-2367, Aug. 2012.
- [22] A. Kavousi-Fard, A. Zare, and A. Khodaei, "Effective dynamic scheduling of reconfigurable microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 5, pp. 5519-5530, Mar. 2018.
- [23] S. E. Ahmadi and N. Rezaei, "A new isolated renewable based multi microgrid optimal energy management system considering uncertainty and demand response," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 118, Article ID 105760, Jun. 2020.
- [24] A. Khodaei, "Provisional microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1107-1115, Mar. 2015.
- [25] L. A. Zadeh, "A note on Z-numbers," *Inf. Sci.*, vol. 181, no. 14, pp. 2923-2932, Jul. 2011.
- [26] A. Soroudi and T. Amraee, "Decision making under uncertainty in energy systems: State of the art," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 376-384, Dec. 2013.
- [27] B. Kang, D. Wei, Y. Li, and Y. Deng, "A method of converting Z-number to classical fuzzy number," *Inf. Comput. Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 703-709, Mar. 2012.
- [28] "NHTS Home Page." [Online]. Available: <http://nhts.ornl.gov/>. [Accessed: 07-Jul-2017].
- [29] S. Han, S. Han, and K. Sezaki, "Estimation of achievable power capacity from plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation: case studies for market participation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 632-641, Dec. 2011.
- [30] R. Coppi, P. D'Urso, P. Giordani, and A. Santoro, "Least squares estimation of a linear regression model with LR fuzzy response," *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 51, no. 1, pp. 267-286, Nov. 2006.
- [31] H. Zhang and D. Liu, *Fuzzy Modeling and Fuzzy Control*, Birkhäuser, 2006.

امیرحسین نثری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۶ از دانشگاه شهید باهنر کرمان به پایان رسانده است و هم اکنون دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت دانشگاه شهید باهنر کرمان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های هوشمند، تاب‌آوری، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری، منابع انرژی تجدیدپذیر.

امیر عبداللہی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق قدرت، به ترتیب در دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۳۸۶ و دانشگاه صنعتی شریف در سال ۱۳۸۸ به پایان رسانده است. وی تحصیلات تکمیلی خود را در مقطع دکتری در دانشگاه تربیت مدرس ادامه داد و در سال ۱۳۹۱ موفق به اخذ مدرک دکتری در رشته مهندسی برق از این دانشگاه گردید. دکتر عبداللہی بلافاصله بعد از اتمام مقطع دکتری در سال ۱۳۹۱، به عضویت هیأت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان درآمد و در حال حاضر دانشیار بخش برق است. زمینه‌های علاقمندی ایشان، بازار برق، شبکه‌های هوشمند، برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، و مدیریت انرژی می‌باشد.

مسعود رشیدی‌نژاد در سال ۱۳۶۵ مدرک کارشناسی و در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت نمود طی سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۶ نام‌برده به عنوان مربی به عضویت هیأت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان درآمد و به تدریس مشغول بود و پس از آن به دوره دکتری در دانشگاه برونل انگلستان وارد گردید و در سال ۱۳۸۰ موفق به اخذ درجه دکتری و پس از آن درجه پسادکتری از همان دانشگاه در سال ۱۳۸۲ در رشته مهندسی برق گردید. دکتر رشیدی‌نژاد در حال حاضر استاد بخش برق دانشگاه شهید باهنر کرمان است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان، برنامه‌ریزی توسعه و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، بازار برق، تجدید ساختار سیستم‌های قدرت، ادوات FACTS و مدیریت انرژی می‌باشد.