

برنامه‌ریزی احتمالی توسعه خطوط انتقال در حضور عدم قطعیت خودروهای برقی متصل به شبکه

سعید نقدی‌زادگان جهرمی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ علیرضا عسکرزاده^۲، دانشیار؛ امیر عبداللهی^۳، دانشیار

۱- پژوهشکده انرژی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان - کرمان - ایران - naghdizadegan144@gmail.com

۲- پژوهشکده انرژی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان - کرمان - ایران - a.askarzadeh@kgut.ac.ir

۳- بخش مهندسی برق - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهید باهنر - کرمان - ایران - a.abdollahi@uk.ac.ir

چکیده: برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال (TEP) یکی از مسائل مهم، به‌خصوص در مواجهه با چالش‌های جدید شبکه هوشمند است. تحت محیط شبکه هوشمند، خودروهای برقی متصل به شبکه (V2Gs) که یکی از دستاوردهای این شبکه‌ها می‌باشند، می‌توانند به‌صورت یک منبع انرژی قابل حمل عمل کنند و بر مسئله TEP تأثیر بگذارند. در این مقاله، به‌منظور تحقیق درباره تأثیر V2G بر TEP، یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی توسعه خطوط انتقال ایستا در حضور خودروهای برقی (P-TEP^{V2G}) معرفی شده است که تابع هدف P-TEP^{V2G} شامل هزینه سرمایه‌گذاری خطوط جدید و هزینه ریسک که با محاسبه EENS به‌دست می‌آید، می‌باشد. به‌منظور مواجهه با عدم قطعیت حضور خودروهای برقی در TEP از روش تحلیل احتمالی مدل چندحالتی مارکوف استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی، قیدهای فراوان، گسسته بودن و غیرخطی بودن مسئله، از الگوریتم بهبودیافته جستجوی کوکو برای حل مؤثر مسئله استفاده شده است. همچنین، حضور یک بهره‌بردار ناوگان خودرو برقی (EV FO)، جهت مدیریت خودروهای برقی، در نظر گرفته شده است. مطالعات انجام‌شده بر روی شبکه ۲۴ باس IEEE نشان می‌دهند که حضور خودروهای برقی در مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال باعث کاهش هزینه ریسک و به تأخیر انداختن برخی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی احتمالی توسعه خطوط انتقال، عدم قطعیت، مدل چندحالتی مارکوف، شبکه هوشمند، خودرو برقی.

Probabilistic Transmission Expansion Planning in the Presence of Plug-in Electric Vehicles Uncertainty

S. Naghdizadegan Jahromi¹, MSc Student; A. Askarzadeh², Associate Professor; A. Abdollahi³, Associate Professor

1- Department of Energy Management and Optimization, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Email: naghdizadegan144@gmail.com

2- Department of Energy Management and Optimization, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Email: a.askarzadeh@kgut.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: a.abdollahi@uk.ac.ir

Abstract: Considering new challenges of smart grids, transmission expansion planning (TEP) is one of the most important issues. Under the smart grid environment, vehicle to grid (V2G) which is one of the achievements of smart grids, can be used as a portable power plant. In this paper, in order to investigate the effect of V2Gs on TEP, a static probabilistic transmission expansion planning model in the presence of V2Gs (P-TEP^{V2G}) is introduced. The objective function in this P-TEP^{V2G} problem consist of investment costs of new lines and risk cost that calculating by EENS. To study the uncertainty of V2Gs availability on the TEP problem, a probabilistic analysis method based on the multi-state Markov model is used. Because P-TEP^{V2G} is a complex, non-linear and integer optimization problem including a number of constraints, an improved cuckoo search algorithm is utilized to effectively solve the problem. In the problem, it is assumed that there is an electric vehicle fleet operator (EV FO) for management of electric vehicles. On the IEEE 24-bus system, simulation results show that the availability of the electric vehicles on the TEP result in decreasing risk cost and deferring construction of new transmission lines.

Keywords: Probabilistic transmission expansion planning, uncertainty, multi-state markov model, smart grid, electric vehicle.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۲ و ۱۳۹۵/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶

نام نویسنده مسئول: امیر عبداللهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - انتهای بلوار ۲۲ بهمن - دانشگاه شهید باهنر - دانشکده فنی مهندسی - بخش برق.

فهرست علائم

TC_{prob}^{V2G}	هزینه کل ناشی از حالات احتمالی	C_k	هزینه احداث خط در مسیر k ام (US \$)
TLC_{prob}^{V2G}	هزینه احداث خطوط به صورت احتمالی ناشی از عدم قطعیت خودروهای برقی	D_{k_j}	مدت قطع بار در باس k به علت احتمال j
$x_i^{(t)}$	مکان فعلی جمعیت الگوریتم جستجوی کوکو در بعد t ام	E_{B_j}	انرژی محدود شده در باس B به واسطه حالت احتمالی j
γ_{lk}	سوسپتانس شاخه میان باس $l-k$	E_k	انرژی تأمین نشده به علت احتمال خرابی k
η	راندمان تجهیزات شارژر/دشارژ خودرو برقی	f_i^{V2G}	فرکانس وقوع حالت i تعداد خودرو برقی
θ	زاویه فاز بر حسب رادیان	f_i^j	توان اکتیو عبوری از مسیر i در j امین سطح توان
λ_{+i}^{V2G}	نرخ انتقال از حالت t ام به حالت بالاتر	$f_i^{\max}$	محدودیت بیشینه توان اکتیو عبوری از مسیر i ام
λ_{-i}^{V2G}	نرخ انتقال از حالت t ام به حالت پایین تر	f_{lk}^b	توان اکتیو جاری در شاخه $l-k$ (MW)
λ_{ij}^{V2G}	نرخ انتقال تعداد خودرو از حالت t ام به حالت j ام	F_j	فرکانس وقوع احتمال j
Ω	مجموعه مسیرهای کاندید جهت احداث خط جدید	i, j	حالات مارکوف
Π	مجموعه کل خطوط فعال در شبکه	L_{k_j}	میزان بار تأمین نشده در باس k ام جهت کاهش بار اضافی به علت احتمال j
$EENS_{TR}^{prob}$	انرژی تأمین نشده احتمالی به واسطه خط انتقال	n_k	تعداد خط احداثی در مسیر k
$EENS_{HLI}^{prob}$	انرژی تأمین نشده احتمالی ناشی از اشکال در سمت تولید	n_i^0	تعداد خط موجود در مسیر i پیش از اضافه کردن خطوط جدید
$EENS_{HLII}^{prob}$	انرژی تأمین نشده احتمالی ناشی از اشکال در سمت تولید و یا انتقال	n_i^j	تعداد خط جدید در مسیر i ام
$IEAR$	نرخ انرژی تأمین نشده (\$/MWh)	n_{lk}	تعداد خط موجود در مسیر $l-k$

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال (TEP^۱) یکی از مهم‌ترین و در عین حال چالش‌برانگیزترین مسائل در توسعه سیستم‌های قدرت است. TEP پاسخ به سؤال‌های «کی»، «کجا» و «چهمقدار» تجهیزات انتقال جدید باید احداث یا نصب گردد، می‌باشد. TEP تأثیر بسزایی بر نحوه بهره‌برداری از شبکه قدرت دارد و با توجه به هزینه بالای احداث خطوط انتقال جدید، برنامه‌ریزی بهینه جهت مدیریت هزینه‌ها اهمیت بالایی دارد. روش‌های گذشته در موضوع TEP بر مبنای مدل‌سازی قطعی بودند که با در نظر گرفتن بدترین شرایط ممکن برای سیستم و بدون در نظر گرفتن میزان احتمال وقوع این حالات، اقدام به حل مسئله با هدف کمینه نمودن هزینه‌ها می‌کردند [۱]. هرچند امروزه نیز کاهش هزینه احداث سهم مهمی در مسئله TEP دارد اما از طرفی به دلیل محدودیت منابع انرژی مرسوم سنتی، ظهور شبکه‌های هوشمند و منابع انرژی قابل حمل (خودروهای برقی) که دارای عدم قطعیت می‌باشند، نحوه مواجهه با موضوع TEP تحت تأثیر قرار گرفته است [۲، ۳].

شبکه انتقال به عنوان ستون فقرات سیستم قدرت، جهت انتقال انرژی از نقطه تولید به مصرف‌کنندگان، نیاز به بررسی دقیق به جهت شناخت و برخورد با چالش‌های متنوع‌تر از گذشته، در مواجهه با شبکه هوشمند دارد. طبق گزارش IET^۲، شبکه هوشمند به عنوان یک شبکه برق که به صورت هوشمندانه با یکپارچه‌سازی فعالیت‌های تمامی استفاده‌کنندگان متصل به آن (تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و

N_{real}	تعداد واقعی خودروهای برقی
N_{lk}	مجموعه خطوط متصل به باس k ام
N_v	تعداد خودرو برقی
$N_{\max}$	بیشینه تعداد خطوط قابل احداث در یک مسیر
N_s	تعداد کل حالات
$N_{PN}^{\max}$	بیشینه تعداد خودرو برقی
N_{ij}^{V2G}	تعداد دفعات مشاهده شده انتقال از حالت t ام به حالت j ام
$Nstep^t$	تعداد حالت گسسته
$NV2G_t^k$	تعداد خودرو موجود در پله k ام
$NV2G_r$	تعداد کل خودروها
P_{gi}	توان تولیدی ژنراتور i ام
P_{dk}	میزان بار
P_j	احتمال وقوع حالت احتمالی j
P_i^{V2G}	احتمال وقوع حالت i تعداد خودروهای برقی
P_{gi}^{Max}	بیشینه توان تولیدی واحد نیروگاهی
$P_{PEV_{prob}}$	توان احتمالی تزریقی خودرو برقی i ام به شبکه
Pr_{Nstep}	احتمال حالت گسسته
RC_{prob}^{V2G}	هزینه ریسک ناشی از حالات احتمالی عدم قطعیت خودروهای برقی
T_i^{V2G}	مدت زمان مشاهده حالت t ام در کل دوره
T_s	کل زمان مشاهده

موجب بهره‌برداری بدون گرفتگی خطوط می‌شود و بهره‌برداری از سیستم را از لحاظ اقتصادی و فنی بهبود می‌بخشد [۱۴]. تحقیقات کاربرد PEVها در شبکه توزیع [۹]، پخش بار اقتصادی [۱۰]، حذف هارمونیک و حضور به‌عنوان رزرو [۱۱] را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

از آن جایی که پیک سالیانه شبکه کم‌تر از چند ساعت در سال اتفاق می‌افتد و یکی از اهداف TEP برنامه‌ریزی بهینه برای عبور این میزان توان از شبکه می‌باشد، از سوی دیگر یکی از کاربردهای خودروهای برقی بدین‌صورت می‌تواند باشد که با حضور برنامه‌ریزی‌شده در شبکه قدرت و تزریق توان به شبکه منجر به کاهش پیک سیستم شوند، بنابراین حضور PEVها می‌تواند نحوه برخورد با مسئله TEP را تحت تأثیر قرار دهد. خودرو برقی می‌تواند در بازار خدمات جانبی حضور داشته و منجر به کاهش پیک سیستم شود [۹]، از طرفی حضور خودروهای برقی دارای عدم‌قطعیت می‌باشد. در مدل‌سازی حضور خودروهای برقی در سطح شبکه توزیع معمولاً از روش‌های عددی مانند روش مونت‌کارلو استفاده شده است [۱۵، ۱۶] که این روش‌ها بار محاسباتی زیادی دارد. در مرجع [۱۷] یک رویکرد متفاوت اتخاذ شده و از مدل میکروسکوپی ترافیکی خودروها جهت شبیه‌سازی رفتار خودروهای برقی استفاده شده است. این روش علاوه بر نیاز به داده‌های فراوان، حجم محاسباتی بسیار بالایی نیز دارد. امروزه منابع دارای عدم‌قطعیت در برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت سیستم‌های قدرت بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۸، ۱۹]. از نظر عدم‌قطعیت‌های حاکم بر مسئله TEP موضوعات مختلفی در مقالات بررسی شده است. در مرجع [۲۰]، مسئله TEP با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و عدم‌قطعیت منابع بادی حل شده است. مرجع [۲۱] به موضوع عدم‌قطعیت رشد بار و در دسترس بودن منابع تولید پرداخته است. مرجع [۲۲]، موضوع عدم‌قطعیت هزینه سرمایه‌گذاری و بار پیش‌بینی‌شده را با استفاده از تئوری شکاف اطلاعات بررسی کرده است. در مرجع [۲]، تأثیر حضور خودروهای برقی بر روی مسئله TEP مورد بررسی قرار گرفته و برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال به‌صورت ایستا و بلندمدت (افق زمانی ۱۰ سال) با در نظر گرفتن خودروهای برقی حل شده است. در این مرجع، حضور خودروهای برقی به‌صورت قطعی مدل‌سازی شده و عدم‌قطعیت حضور خودروهای برقی در نظر گرفته نشده است.

در حل مسئله TEP موارد دیگری نیز وجود دارند که باید مدنظر قرار گیرند. TEP از نظر افق زمانی به دو گروه برنامه‌ریزی ایستا و پویا تقسیم می‌شود. در مسئله TEP ایستا، افق زمانی مشخص نیست و برنامه بهینه برای یک سال انجام می‌شود. به عبارت دیگر، فرض می‌شود تمام خطوط جدید در یک دوره زمانی (سال اول برنامه‌ریزی) نصب می‌شود، درحالی‌که TEP پویا شامل چند بازه زمانی برنامه‌ریزی است و خطوط جدید برای هر سال جداگانه محاسبه می‌شود [۲۳]. در این مقاله، مسئله TEP به‌صورت بلندمدت و افق زمانی ۱۰ سال حل شده است. همچنین، برنامه‌ریزی به‌صورت ایستا در نظر گرفته شده است یعنی فرض می‌شود که تمام تجهیزات در ابتدای دوره نصب خواهند شد. TEP در مقالات با

آن‌هایی که هردو را انجام می‌دهند) به‌منظور تحویل کارآمد، پایدار، اقتصادی و ایمن برق تولیدی، انجام وظیفه می‌کند تعریف شده است. شبکه هوشمند یک سیستم تحویل برق (از نقطه تولید تا نقطه مصرف) ترکیب‌شده با تکنولوژی ارتباطات و اطلاعات است [۴]. مفهوم خودرو متصل به شبکه یکی از دستاوردها و تکنولوژی‌های شبکه هوشمند می‌باشد که به‌کارگیری مدیریت‌شده از خودرو برقی، بهبود بهره‌برداری از سیستم قدرت را باعث می‌شود. در گزارش شبکه‌های هوشمند سال ۲۰۱۰ DOE آمریکا، به این نکته اشاره شده است که خودروهای برقی از جمله منابع تولید و ذخیره‌سازی انرژی می‌باشند که می‌توانند باعث به تعویق انداختن به‌روزرسانی زیرساخت‌های انتقال و توزیع و ایجاد ظرفیت به جهت مواجهه با ناهمواری‌های منحنی بار برای سیستم‌های انتقال و توزیع شوند [۵]. بنابراین، بررسی تأثیر حضور خودروهای برقی بر روی مسئله TEP امری ضروری است. با ظهور شبکه‌های هوشمند امکان بهره‌برداری بهینه از خودروهای برقی متصل به شبکه ایجاد شد. توسعه و پیشرفت‌های اخیر در باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی و تکنولوژی‌های الکترونیک قدرت، خودروهای برقی با امکان ارتباط دوسویه با شبکه را به‌عنوان یک راه‌حل برای آینده سیستم قدرت معرفی نموده است [۶]. بر اساس گزارش EPRI^۱ انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۳۰، ۳۵٪ کل خودروها در آمریکا به‌صورت خودرو برقی یا هیبریدی متصل به شبکه باشند [۷]. آلمان برنامه‌ریزی نموده تا ۱ میلیون خودرو برقی تا سال ۲۰۲۰ داشته باشد [۸]. PEV^۲ هم به‌صورت تکنولوژی خودرو متصل به شبکه (V2G^۳) که خودرو می‌تواند انرژی ذخیره‌شده در باتری خود را به شبکه تزریق کند و هم به‌صورت شبکه متصل به خودرو (G2V^۴) که در این حالت باتری توسط شبکه شارژ می‌شود، در زمینه‌های متفاوت سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است [۹-۱۱].

به‌کارگیری حجم عظیمی از خودرو برقی چالش‌های جدیدی را پیش روی سیستم قدرت قرار می‌دهد. در صورتی‌که صاحبان خودرو آزاد باشند هرگاه که خواستند خودرو خود را شارژ نمایند، انرژی مصرفی خودروهای برقی میزان پیک بار شبکه را افزایش خواهد داد و نیاز به ظرفیت تولید، انتقال و توزیع بیش‌تری خواهد بود [۹]. مطالعات بسیاری مزایای حضور خودروهای برقی و چالش‌های آن در شبکه هوشمند را بررسی کرده‌اند. در مقالات نشان داده‌شده است که یک بهره‌بردار ناوگان خودرو برقی (EV FO^۵) یا به‌اختصار FO می‌تواند حضور داشته باشد تا عملکرد بهینه ناوگان خودرو برقی را مدیریت نماید [۱۲-۱۴]. FO می‌تواند به‌صورت مستقل یا زیرمجموعه‌ای از فراهم‌کنندگان انرژی، بهره‌بردار سیستم انتقال (TSO^۶) و یا بهره‌بردار سیستم توزیع (DSO^{۱۰}) باشد [۱۲]. FO می‌تواند به‌صورت متمرکز یا پراکنده عمل کند. کنترل متمرکز به این معناست که FO به‌صورت مستقیم نحوه شارژ و دشارژ خودروهای برقی را برنامه‌ریزی و کنترل می‌کنند، درحالی‌که کنترل غیرمستقیم به‌نحوی است که هر خودرو برقی با استفاده از سیگنال قیمت که توسط FOها یا DSO در اختیارش قرار گرفته، برنامه‌ریزی بهینه را انجام می‌دهد [۱۳]. برنامه‌ریزی کنترل‌شده PEVها از اضافه‌بار شبکه پیش‌گیری می‌کند،

در بخش پنجم، فرمول‌بندی ریاضیاتی مدل TEP پیشنهادی ارائه شده است. در بخش ششم، سیستم مورد مطالعه و نتایج حاصل گزارش شده است. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش هفتم بیان شده است.

۲- شبکه هوشمند

ظهور شبکه‌های هوشمند و ایجاد ارتباط دوسویه بین بهره‌برداران شبکه، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان نحوه برخورد با مسائل گوناگون در سیستم قدرت را تحت تأثیر قرار داده است. شبکه هوشمند با ایجاد بستری مناسب زمینه حضور مؤثر PEVها در سیستم قدرت را فراهم کرد. در گذشته خودروهای برقی توانایی اتصال به شبکه به صورت یک بار و شارژ باتری خود را داشتند، در حالی که با ورود شبکه‌های هوشمند خودروهای برقی می‌توانند به صورت مصرف‌کننده یا تولیدکننده در شبکه هوشمند حضور داشته باشند و طیف وسیعی از خدمات جانبی را عرضه کنند. حضور تعداد محدود و پراکنده از PEVها تأثیر زیادی بر سیستم قدرت ندارد، اما با توجه به افزایش روزافزون تعداد PEVها در شبکه‌های هوشمند نیاز به یک بهره‌بردار ناوگان خودرو برقی (FO) در شبکه احساس می‌شود تا با برنامه‌ریزی مناسب زمینه بهره‌برداری بهینه از خودروهای برقی را فراهم کند [۱۲]. خودروهای برقی می‌توانند به عنوان یک منبع ذخیره‌ساز انرژی، توزیع‌شده در سطح شبکه، در خدمات جانبی سیستم، مانند کاهش پیک یا کمک در کاهش نوسانات انرژی‌های تجدیدپذیر عمل کنند [۱۷]. استفاده از توانایی کاهش پیک توان مصرفی شبکه توسط خودروهای برقی، می‌تواند در مسئله TEP تأثیرگذار باشد.

۲-۱- خودرو برقی

محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و همچنین برنامه‌های کاهش تولید کربن توسط منابع آلوده‌کننده محیط‌زیست که توسط دولت‌ها در حال اجراست، همگی عواملی هستند که حرکت به سمت استفاده از خودروهای برقی و هیبریدی را ناگزیر کرده است. امروز PEVها به دلایل راندمان انرژی بالا، کربن کم، آلودگی صوتی پایین و هزینه بهره‌برداری کم بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۸]. خودروهای برقی امروز، با توانایی ارتباط دوسویه با شبکه قدرت، بسیار مورد توجه واقع شده‌اند و در برنامه حضور این خودروها توجه به این نکته ضروری است که عدم برنامه‌ریزی صحیح برای برنامه شارژ و دشارژ آن‌ها می‌تواند منجر به افزایش پیک شبکه، سرمایه‌گذاری زیاد جهت افزایش منابع تولید، توسعه شبکه انتقال و توزیع شود [۲۹]. در صورت برنامه‌ریزی بهینه این خودروها می‌توانند علاوه بر کاهش میزان پیک بار شبکه (با دشارژ توان از باتری به شبکه) و در ساعات کم باری موجب افزایش مصرف (شارژ باتری توسط شبکه) باعث بهبود پروفیل بار شبکه شوند و در نتیجه فاصله پیک تا دره را کاهش داده و از سرمایه‌گذاری بیش از حد نیاز در سیستم قدرت جلوگیری به عمل آورند [۹]. استراتژی شارژ هوشمند می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات سوء بر شبکه، موجب بهبود عملکرد شبکه نیز گردد. البته در نظر داشتن این نکته ضروری است که هدف اولیه

در نظر گرفتن اندیس‌های قابلیت اطمینان گوناگون از جمله $LOLE^{11}$ [۲۴]، ارزیابی قابلیت اطمینان سلسله مراتبی [۲۵] و $EENS^{12}$ [۲۰] و همچنین تحلیل امنیت جهت اطمینان از عملکرد مطلوب مانند معیار N-1 [۲۰] در نظر گرفته شده است.

برنامه‌ریزی بهینه توسعه خطوط انتقال با توجه به پیچیدگی، قیدهای فراوان، گسسته بودن و غیرخطی بودن یک مسئله پیچیده بهینه‌سازی می‌باشد که حل آن با روش‌های کلاسیک بسیار زمان‌بر بوده و نیاز به حجم محاسبات بالایی دارد به همین دلیل، امروزه استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، با سرعت همگرایی بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲، ۳، ۲۰، ۲۶]. الگوریتم استفاده‌شده در این مقاله الگوریتم جستجوی کوکو است. الگوریتم جستجوی کوکو از جمله الگوریتم‌های الهام گرفته‌شده از طبیعت ارائه‌شده توسط یانگ در سال ۲۰۰۹ می‌باشد. الگوریتم CS^{13} بر اساس نحوه جالب غذا دادن انگلی نوزادان گونه خاصی از کوکوها است [۲۷]. این روش به دلیل استفاده از توزیع Levy دارای تناسب خوبی بین کاوش و بهره‌وری است که باعث می‌شود الگوریتم علاوه بر سرعت مناسب همگرایی در بهینه‌های محلی گیر نکند و برای حل مسائل TEP مناسب باشد.

جنبه‌های نوآوری مقاله به صورت زیر بیان شده است:

- در نظر گرفتن حضور احتمالی منبع عدم قطعیت‌دار خودروهای برقی در مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال (TEP)
- مدل‌سازی احتمالی (مدل چندحالتی مارکوف) حضور خودروهای برقی
- ارائه الگوریتم بهبودیافته جستجوی کوکو برای حل مسئله

در این مقاله ابتدا با مدل‌سازی احتمالی عدم قطعیت حضور خودروهای برقی با استفاده از مدل مارکوف نحوه رفتار خودروهای برقی در شبکه هوشمند مدل‌سازی شده است. در ادامه با توجه به مدل مارکوف عدم قطعیت حضور خودروهای برقی، یک مدل TEP جدید پیشنهاد گردیده است. مسئله به صورت احتمالی با هدف مینیمم کردن هزینه کل که شامل هزینه احداث خطوط و هزینه ریسک می‌باشد، به صورت TEP ایستا، با مدل پخش بار DC و محاسبه EENS با در نظر گرفتن معیار N-1، محاسبه شده است. الگوریتم بهبودیافته جستجوی کوکو برای حل این مسئله پیچیده بهینه‌سازی استفاده شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه اصلاح‌شده ۲۴ باس IEEE پیاده‌سازی شده است.

ادامه مقاله بدین صورت سازمان یافته است: در بخش دوم به موضوع شبکه هوشمند پرداخته شده است. مدل‌سازی عدم قطعیت حضور خودروها در بخش سوم تشریح شده است. در بخش چهارم، الگوریتم بهبودیافته جستجوی Cuckoo با توزیع Levy توضیح داده شده است.

۳- مدل‌سازی عدم قطعیت حضور خودروهای برقی در حالت پارک با استفاده از مدل مارکوف

عدم قطعیت حاکم بر خودروهای برقی بر نحوه حضور و اثرگذاری آن‌ها در مسائل سیستم قدرت مؤثر می‌باشد. پارامترهای عدم قطعیت خودروهای برقی شامل مدت‌زمان شارژ، وضعیت میزان شارژ اولیه و زمان آغاز و پایان شارژ/دشارژ می‌باشند. با توجه به این عدم قطعیت‌های ذاتی PEVها، بهره‌برداری از آن‌ها بسیار مشکل می‌شود. جهت مواجهه با این عدم قطعیت‌ها مدل‌سازی‌های احتمالی می‌تواند بسیار کارساز باشد.

۳-۱- مدل احتمالی مارکوف

در بحث مدل‌سازی خودروهای برقی، نحوه رفتار خودروها وابسته به نیاز صاحبان خودرو می‌باشد و این موضوع که خودرو در حالت پارک یا حرکت باشد یک فرآیند تصادفی است [۱۵]. در دنیای واقعی این نوع از فرآیندها می‌توانند به صورت یک فرآیند تصادفی در فضای نمونه گسسته مدل شوند.

زنجیره مارکوف جهت مدل کردن تغییرات فرآیندهای تصادفی به صورت انتقال میان حالات مارکوف، جایی که هر حالت بیان‌کننده یک مقدار گسسته است می‌تواند مورد استفاده واقع شود. تعداد حالات گسسته وابسته به میزان دقت مورد نیاز می‌باشد. برای یک متغیر تصادفی که به وسیله فرآیند مارکوف مدل می‌شود، ایستا بودن فرآیند لازم است، به عبارت دیگر نرخ انتقال میان حالات مختلف در طول مدت مطالعه باید ثابت بماند. مدل کردن یک فرآیند تصادفی با فرآیند مارکوف ایستا نیازمند نمایی بودن توزیع زمان ماندن در حالات است [۳۲]. در این مقاله، زمان ماندن خودروهای برقی در هر حالت به صورت نمایی در نظر گرفته شده است [۳۳].

توزیع نمایی، نرخ انتقال را به صورت یک عدد ثابت در نظر می‌گیرد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۲]:

$$\lambda_{ij}^{V2G} = \frac{N_{ij}^{V2G}}{T_i^{V2G}} \quad (1)$$

نرخ انتقال از حالت i ام به حالت‌هایی با خروجی بزرگ‌تر و خروجی کوچک‌تر تعداد خودرو در دسترس در مدل مارکوف به ترتیب به صورت λ_{+i}^{V2G} و λ_{-i}^{V2G} است [۳۲].

$$\lambda_{+i}^{V2G} = \sum_{j=1}^{N_s} \lambda_{ij}^{V2G} \quad \forall j > i \quad (2)$$

$$\lambda_{-i}^{V2G} = \sum_{j=1}^{N_s} \lambda_{ij}^{V2G} \quad \forall j < i \quad (3)$$

احتمال و فرکانس حضور خودروها به صورت زیر داده شده است [۳۲].

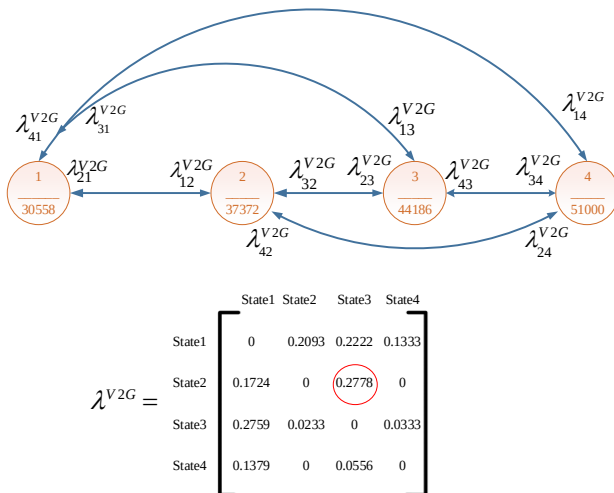
خودروهای برقی تأمین نیاز صاحبان خودرو در جابه‌جایی آن‌ها است، نه ایجاد خدمات جانبی برای سیستم قدرت.

عوامل متعددی در رشد و حضور خودروهای برقی در یک منطقه تأثیرگذار می‌باشد. در مقاله [۳۰] بررسی شده است که سیاست‌های مالیاتی منطقه‌ای/ایالتی می‌تواند بر تعداد خودروهای برقی در آن مناطق / ایالات تأثیر بگذارد. از سوی دیگر در مقاله [۳۱] بررسی شده است که سیاست‌های مالی تشویقی (کمک‌هزینه خرید خودرو برقی) و تعداد ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به صورت توأم از تأثیرگذارترین عوامل در رشد تعداد خودروهای برقی در یک منطقه می‌باشند. بنابراین میزان رشد و حضور خودروهای برقی در تمام مناطق به صورت یکسان نمی‌باشد و در برخی مناطق بسته به سیاست‌های محلی و تجهیزات موجود رشد حضور خودروهای برقی می‌تواند بیش‌تر باشد.

۲-۲- بهره‌بردار ناوگان خودرو برقی

در مواجهه با مسئله چگونگی برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و کنترل خودروهای برقی در شبکه قدرت هوشمند ضرورت حضور EV FO جهت ایجاد یک مکانیسم مشخص کنترلی ضروری می‌باشد. FOها می‌توانند به صورت کنترل متمرکز یا غیرمتمرکز باشند. در کنترل غیرمتمرکز کنترل در اختیار صاحبان خودرو باقی می‌ماند و نیاز به تجهیزات ارتباطی نیز کاهش پیدا می‌کند. نحوه کنترل در این روش معمولاً به وسیله سیگنال قیمت است. موضوع اساسی که در این نوع کنترل با آن مواجه می‌شویم هدف صاحبان خودرو است که بدون در نظر گرفتن اثرات استراتژی‌های اتخاذ شده آن‌ها بر سیستم قدرت، اقدام به کمینه نمودن هزینه‌های خود می‌کنند [۱۲]. در سیستم کنترل متمرکز صاحبان خودرو به صورت مستقیم در فرآیند کنترل دخالت ندارند. از مزایای این نوع کنترل به توانایی در فراهم کردن خدمات جانبی می‌توان اشاره کرد. FO در این حالت به جهت عملکرد موفق نیاز زیادی به زیرساخت مخابراتی برای ارتباط با صاحبان خودرو و همچنین با تجهیزات شارژ و دشارژ خودروها دارد. در کنترل مرکزی تصمیمات در سطح شبکه گرفته می‌شود و بنابراین می‌تواند نتایج بهتری در امنیت شبکه قدرت داشته باشد [۹]. در این مقاله، FO به صورت متمرکز در نظر گرفته شده است. در این استراتژی کنترل، FO نیاز به چهار پارامتر ورودی شامل مدل باتری خودروها، الگوی حرکت خودروها، محدودیت‌های شبکه و قیمت برق دارد تا برنامه مناسبی برای EVها فراهم کند. خودروهای برقی جهت عملکرد مطلوب نیاز به تجهیزات شارژ/دشارژ هوشمند دارند که معمولاً DSOها وظیفه نصب تجهیزات مورد نیاز در سطح شبکه را بر عهده دارند [۱۲].

(۸) اگر $40530 < N_{real} < 47344$ باشد، آنگاه N_{real} مطابق شکل ۲ و جدول ۱ به حالت ۳ که برابر با ۴۴۱۸۶ است خوشه‌بندی می‌شود. با استفاده از روابط (۷) و (۸) کلیه داده‌های واقعی با یکی از حالت‌ها خوشه‌بندی می‌شود.



شکل ۲: مدل مارکوف ۴ حالتی برای تعداد خودرو در حالت پارک

با استفاده از روابط (۱) تا (۶) می‌توان احتمال، فرکانس و نرخ خروج از هر حالت را به‌دست آورد. بدین ترتیب یک جدول فرکانس و تداوم کامل برای حضور خودروها به‌دست می‌آید. برای داده‌های قبل جدول ۱ جدول فرکانس و تداوم را نشان می‌دهد.

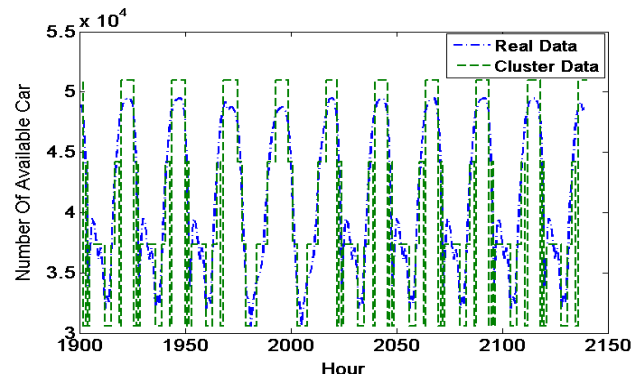
جدول ۱: جدول فرکانس و تداوم داده‌های شکل ۱

فرکانس f_i (occ / hr)	نرخ انتقال به پایین‌تر λ_{-i} (occ / hr)	نرخ انتقال به حالت بالا تر λ_{+i} (occ / hr)	احتمال P_i	ظرفیت موجود	حالت
۰/۱۳۶۵	۰	۰/۵۶۴۹	۰/۲۴۱۷	۳۰۵۵۸	۱
۰/۱۶۱۳	۰/۱۷۲۴	۰/۲۷۷۸	۰/۳۵۸۳	۳۷۳۷۲	۲
۰/۰۴۹۹	۰/۲۹۹۱	۰/۰۳۳۳	۰/۱۵۰	۴۴۱۸۶	۳
۰/۰۴۸۴	۰/۱۹۳۵	۰	۰/۲۵	۵۱۰۰۰	۴

۴- مدل برنامه‌ریزی احتمالی توسعه خطوط انتقال در حضور عدم قطعیت خودروهای برقی

در این بخش تابع هدف $P\text{-TEP}^{V2G14}$ در حضور عدم قطعیت خودروهای برقی ارائه شده است. شکل ۳ ساختار سلسله مراتبی $P\text{-TEP}^{V2G}$ پیشنهادی در حضور FO را نشان می‌دهد. مسئله TEP در این مقاله در چارچوب ایستا یا تک‌حالتی حل شده است. بنابراین تابع هدف برای $P\text{-TEP}^{V2G}$ به صورت زیر آمده است:

$$\text{Min: } \{TC_{prob}^{V2G}\} = \{TLC_{prob}^{V2G} + RC_{prob}^{V2G}\} \quad (9)$$



شکل ۱: داده‌های واقعی و خوشه‌بندی شده تعداد خودرو در حالت پارک

$$P_i^{V2G} = \frac{T_i^{V2G}}{T_S} \quad (4)$$

$$T_S = \sum_{i=1}^N T_i^{V2G} \quad (5)$$

$$f_i^{V2G} = p_i^{V2G} (\lambda_{-i}^{V2G} + \lambda_{+i}^{V2G}) = p_i^{V2G} \lambda_i^{V2G} \quad (6)$$

برای استفاده از زنجیره مارکوف برای تعداد خودروهای موجود در حالت پارک باید این تعداد خودرو را در تعدادی حالت گسسته خوشه‌بندی نماییم. اگر بخواهیم $Nstep^t$ حالت گسسته ایجاد کنیم آنگاه پله‌های تعداد خودرو را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم [۳۴]:

$$NV2G_t^k = (k-1) \frac{NV2G_r}{Nstep^t - 1} \quad (7)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, Nstep^t$$

جهت خوشه‌بندی تعداد واقعی خودروها در تعداد گسسته‌شده داریم [۳۴]:

$$NV2G_t^k - \left(\frac{1}{2}\right) \frac{NV2G_r}{Nstep^t - 1} \leq N_{real} < NV2G_t^k + \left(\frac{1}{2}\right) \frac{NV2G_r}{Nstep^t - 1} \quad (8)$$

$$N_{real} \rightarrow NV2G_t^k$$

جهت مشخص شدن کاربرد موارد بالا، مثالی آورده شده است. در شکل ۱ اطلاعات ۵۱۰۰۰ خودرو برای مدت ۱۰ روز به صورت ساعتی، از تعداد خودروهایی که در هر ساعت در حالت پارک قرار دارند رسم شده است. بسته به میزان دقت مورد نیاز تعداد پله‌ها مشخص می‌شود و هرچه دقت که تعداد پله‌ها بیشتر باشد دقت بالاتر می‌رود. تعداد خودروها به چهار پله تقسیم شده است. با توجه به شکل ۱ دیده می‌شود که تعداد خودروهای در دسترس از یک تعداد مشخصی کمتر نمی‌شود بنابراین در روابط ۷ و ۸ به جهت جلوگیری از ایجاد حالت‌هایی با احتمال وقوع صفر داده‌های میان حد پایین و تعداد نامی خودروها را خوشه‌بندی می‌کنیم. در شکل ۲ مدل مارکوف و ماتریس انتقال نشان داده شده است. برای مثال جهت محاسبه مقدار λ_{23}^{V2G} بر طبق رابطه (۱) با توجه به داده‌های شکل ۱ مقدار N_{23}^{V2G} برابر ۱۰ مرتبه و T_2^{V2G} برابر با ۳۶ ساعت و با توجه به ماتریس λ^{V2G} ، $\lambda_{23}^{V2G} = 0/2778$ (occ./hr) سایر مقادیر λ_{ij}^{V2G} نیز به صورت مشابه محاسبه می‌شوند. برای خوشه‌بندی کردن داده‌های واقعی بدین صورت عمل می‌کنیم که برای مثال مطابق رابطه

$$\sum_{\forall i \in N_{lk}} p_{gi} + \sum_{\forall i \in N_{lk}} \left(\eta \times \sum_i^{N_v} p_{PEV_{i,prob}} \right) - p_{dk} = 0 \quad (17)$$

$$k = 1, \dots, N_b$$

$$\begin{cases} p_{PEV} = p_{PEV}, & \text{در زمان دشارژ} \\ p_{PEV} = -p_{PEV}, & \text{در زمان شارژ} \end{cases}$$

$$0 \leq p_{gi} \leq p_{gi}^{Max} \quad (18)$$

(۲) در زمان فراخوانی خودروها جهت تزریق توان به شبکه هر خودرو ۲۰٪ ظرفیت کل باتری خود را می‌تواند تزریق کند. خودروهایی که در این برنامه شرکت می‌کنند در قرارداد خود با FO این اطمینان را داده‌اند که هر خودرو موجود در حالت پارک در صورت دسترسی به تجهیزات شارژ/دشارژ این میزان توان اکتیو را می‌تواند به شبکه تزریق کند. کلیه خودروها در باس سوم قرار دارند.

(۳) به‌منظور پایداری سیستم، بار خط باید کم‌تر از حد حرارتی خط باشد.

$$\sum_{\forall i \in \Pi} |f_i^j| \leq (n_i^0 + n_i^j) f_i^{max} \quad (19)$$

(۴) تعداد خطوط جدید قابل احداث به‌نحوی است که بین هر دو باس که امکان احداث خط وجود دارد حداکثر N_{max} خط می‌تواند وجود داشته باشد.

$$\sum_{i,k \in \Pi} n_{ik} \leq N_{max} \quad (20)$$

(۵) پخش بار DC میان شاخه‌ها با استفاده از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$f_{lk}^b = \gamma_{lk} (n_{lk}^0 + n_{lk}^b) (\theta_m^b - \theta_n^b) \quad (21)$$

$$m \neq n, \forall m, n \in N_b$$

(۶) از در نظر گرفتن تلفات خطوط در محاسبات صرف‌نظر شده است.

(۷) در هر ساعت باید تعداد خودروهای موجود از بیشینه تعداد خودروها کم‌تر باشد.

$$N_{PV}(t) \leq N_{PN}^{max} \quad t = 1, 2, \dots, 24 \quad (22)$$

۵- الگوریتم بهبودیافته جستجوی Cuckoo با توزیع Levy

الگوریتم جستجوی Cuckoo از جمله الگوریتم‌های الهام‌گرفته‌شده از طبیعت ارائه‌شده توسط یانگ در سال ۲۰۰۹ می‌باشد. الگوریتم CS بر اساس نحوه جالب غذا دادن انگلی نوزادان گونه خاصی از Cuckooها است [۲۷]. از سوی دیگر تحقیقات بسیاری نشان داده است که رفتار پروازی بسیاری از حیوانات و حشرات از خصیصه عام پروازهای Levy تبعیت می‌کنند. متعاقباً چنین رفتاری به جستجوی بهینه در فضای مسئله منجر می‌شود [۳۶]. برای سادگی توضیح جستجوی Cuckoo سه اصل ایده‌آل زیر در نظر گرفته شده است: (۱) انتخاب لانه تخم‌گذاری هر Cuckoo به‌صورت تصادفی است. (۲) بهترین لانه‌ها یا تخم‌هایی باکیفیت بالا به نسل‌های بعد منتقل می‌شوند.

هدف اصلی مطالعه توسعه خطوط انتقال ایستا پاسخ به سؤال‌های چه‌مقدار و کجا خطوط جدید باید نصب شود می‌باشد. تابع هدف به‌نحوی است که هزینه سرمایه‌گذاری کمینه گردد (ترم اول رابطه (۹)) و سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان (ترم دوم رابطه (۹)) برآورده شود. هزینه کل در پایان به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TC = \sum_{Nstep} Pr_{Nstep} \times TC_{prob}^{V2G} \quad (10)$$

$$= \sum_{Nstep} Pr_{Nstep} \times \{TLC_{prob}^{V2G} + RC_{prob}^{V2G}\}$$

هزینه احداث خطوط به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TLC_{prob}^{V2G} = \sum_{k \in \Omega} C_k(n_k) \quad (11)$$

به‌منظور محاسبه هزینه ریسک (RC_{prob}^{V2G}) در EENS، P-TEP^{V2G} شبکه انتقال محاسبه می‌شود. به‌صورت زیر فرمول‌بندی شده است و به جهت تبدیل میزان انرژی تأمین‌نشده به هزینه مقدار EENS در IEAR^{۱۵} ضرب شده است:

$$Min: RC_{prob}^{V2G} = IEAR \times EENS_{TR}^{prob} \quad (12)$$

یک عامل مهم جهت ارزیابی کیفیت جواب‌های حاصل‌شده از الگوریتم، محاسبه قابلیت اطمینان می‌باشد. هزینه ریسک در این مقاله نشان‌دهنده شاخص قابلیت اطمینان است. EENS خط انتقال به‌عنوان فاکتور ارزیابی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است [۳۵].

$$EENS_{TR}^{prob} = EENS_{HLII}^{prob} - EENS_{HLI}^{prob} \quad (13)$$

EENS مرتبط با هر جواب پیشنهادی با روش N-1 محاسبه شده است. معیار N-1 بیان می‌دارد که برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم باید به‌گونه‌ای انجام شود که خروج یک عنصر سیستم منجر به فروپاشی سیستم نشود.

$$EENS_{HLI}^{prob} = \sum_{j=1}^N (E_{B_j}) \cdot P_j \quad (14)$$

$$EENS_k^{prob} = \sum_{j \in (x,y)} (L_{k_j}) \cdot D_{k_j} \cdot F_j$$

$$= \sum_{j \in (x,y)} L_{k_j} \cdot g_j \cdot 8760 \quad (15)$$

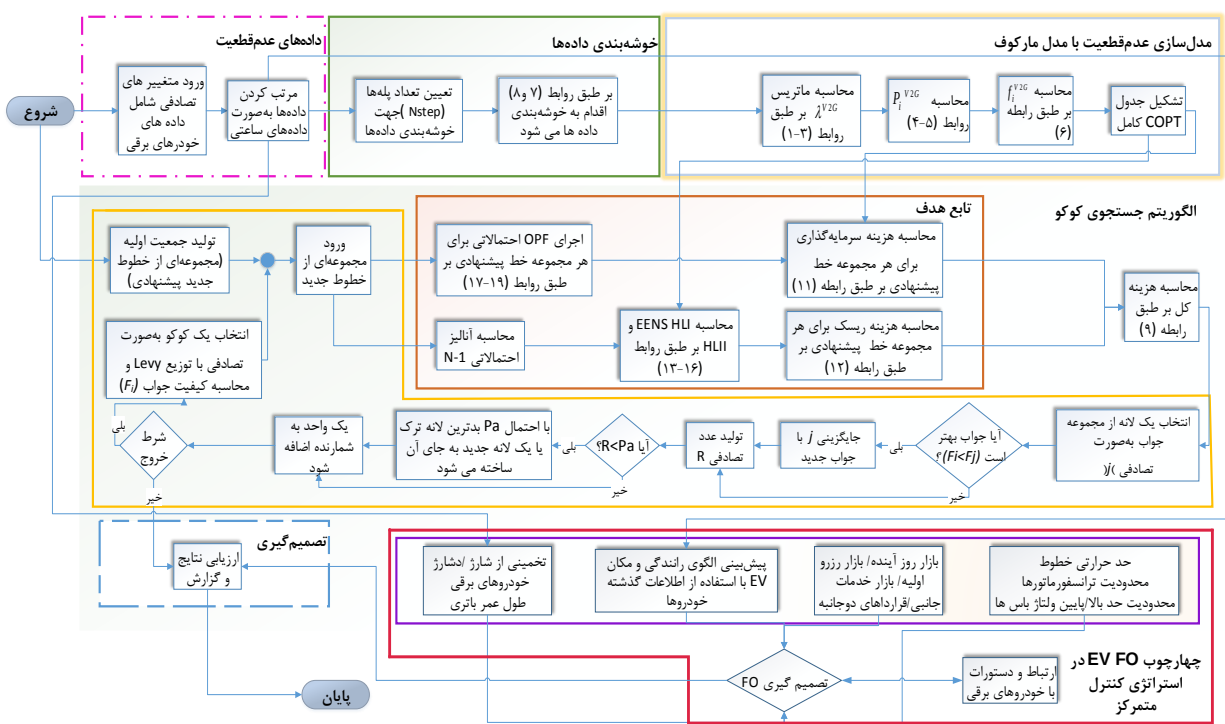
مقدار سالانه EENS در سطح سیستم ترکیبی، انرژی تأمین‌نشده توسط هر باس می‌باشد که به‌صورت زیر مشخص شده است:

$$EENS_{HLII}^{prob} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k^{prob} \quad (16)$$

۴-۱- محدودیت‌های PEV و P-TEP^{V2G}

(۱) زمان تزریق به شبکه توسط FO در ساعت پیک روز و زمان شارژ در ساعات کم‌باری در نظر گرفته شده است. رابطه (۱۷) قانون جریان کیرشلف می‌باشد. p_{dk} میزان بار و $p_{PEV_{i,prob}}$ توان احتمالی تزریقی خودرو برقی می‌باشد.

چهارچوب پیشنهادی بهره‌بردار مستقل سیستم



شکل ۳: ساختار سلسله مراتبی P-TEP در حضور عدم قطعیت خودروهای برقی

توزیع Levy دارای واریانس و میانگین بی‌نهایت می‌باشد. بعضی از جواب‌های جدید باید تولید شده با گام Levy در اطراف بهترین راه حل به دست آمده تاکنون باشد و بعضی به صورت تصادفی از بهترین جواب باید در حد قابل قبولی دور باشند، این موضوع سرعت جستجوی محلی را افزایش می‌دهد. همین ویژگی‌های توزیع Levy باعث ایجاد یک تناسب مطلوب بین کاوش و بهره‌وری الگوریتم می‌شود و مانع از گیر افتادن آن در بهینه‌های محلی می‌شود.

۶- سیستم مورد مطالعه و نتایج

۶-۱- داده‌های خودرو برقی

اطلاعات سفرهای خودرو برقی از داده‌های سایت NHTS [۳۷] سال ۲۰۰۹ آمریکا استخراج شده است. داده‌های NHTS به صورت داده‌هایی خام از ساعات آغاز و پایان سفرهای خودروها و تاریخ روز گزارش شده در دسترس می‌باشند. در داده‌ها حرکت هر خودرو از آغاز سفر و رسیدن آن به مقصد پایان سفر می‌باشد. در این مقاله، داده‌ها به صورت روزانه مرتب شده‌اند در مرتب کردن داده‌ها 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 نمی‌باشد. تعداد کل خودروها ۵۱۰۰۰ عدد در نظر گرفته شده است.

۳) تعداد لانه‌های موجود ثابت است و تخم‌های گذاشته شده توسط یک Cuckoo می‌توانند توسط پرند میزبان با احتمال $p_g \in [0,1]$ شناسایی شود. در این حالت پرند میزبان می‌تواند تخم را دور انداخته یا لانه را ترک کند و یک لانه کاملاً جدید ایجاد کند [۲۷]. در این مقاله الگوریتم CS بهبود داده شده است و مرحله انتخاب جهت جایگزینی عضو جدید با یکی از اعضای جمعیت به وسیله چرخ رولت اتفاق می‌افتد. همچنین، اندازه گام در الگوریتم به صورت کاهشی در نظر گرفته شده است. گام کاهشی از یک مقدار بیشینه آغاز می‌شود و در طول تکرارها به مقدار کمینه خود میل می‌کند. ساختار در شکل ۳ نشان داده شده است.

هنگام تولید جواب جدید $x^{(t+1)}$ پرواز Levy به صورت زیر اعمال می‌شود:

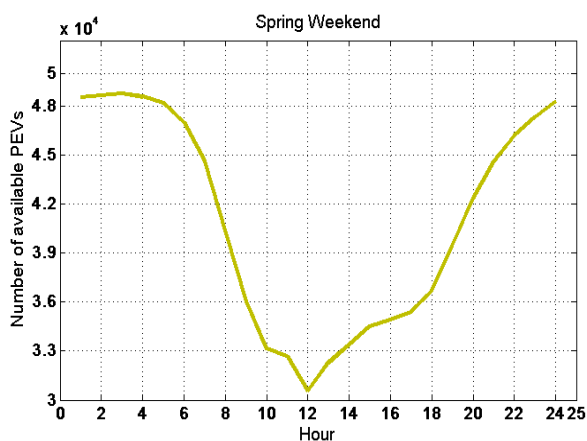
$$(23)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^{(t)} + \alpha \oplus Levy(\lambda)$$

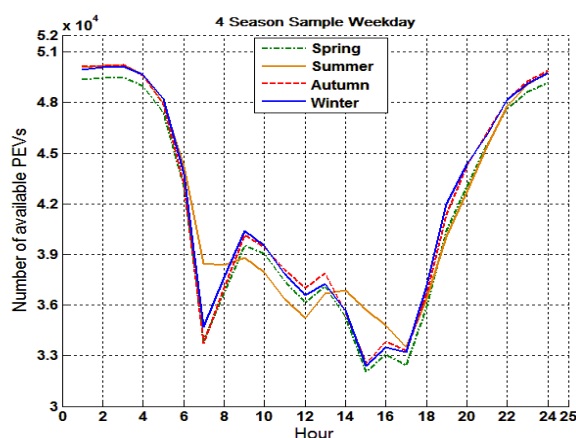
که $\alpha > 0$ اندازه گام است که مرتبط با مقیاس پارامترهای مسئله مورد بحث می‌باشد. $x_i^{(t)}$ مکان فعلی است. رابطه بالا اساساً یک معادله تصادفی برای گام تصادفی می‌باشد که وضعیت یا مکان بعدی فقط وابسته به مکان فعلی (ترم اول معادله بالا) و احتمال انتقال (ترم دوم) است [۲۷]. پرواز Levy اساساً یک گام تصادفی ایجاد می‌کند در حالی که طول گام تصادفی از یک توزیع Levy به دست آمده است.

$$Levy \sim u = t^{-\lambda}, \quad (1 < \lambda \leq 3) \quad (24)$$

این شارژر توانایی برقراری ارتباط با FO را دارد [۳۸]. استاندارد SAE در زمینه خودرو برقی استاندارد غالب در آمریکای شمالی و نواحی از اروپا می‌باشد. در این مقاله حداکثر توان شارژر برابر ۵ کیلووات در نظر گرفته شده است.



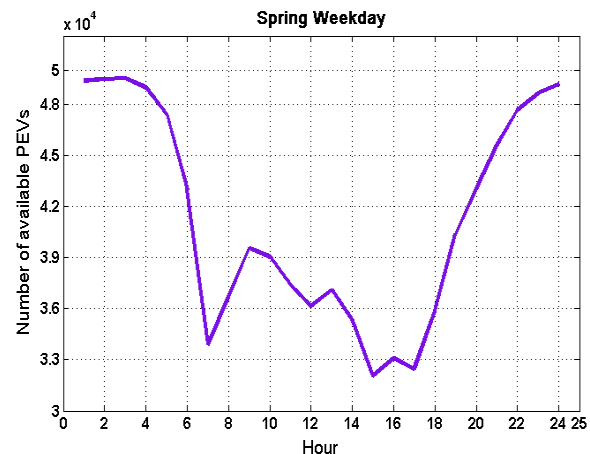
شکل ۵: تعداد خودرو در حالت پارک در یک روز تعطیل نمونه در فصل بهار



شکل ۶: تعداد خودرو در حالت پارک در یک روز کاری نمونه در چهار فصل

جدول ۲: جدول فرکانس و تداوم داده‌های NHTS در ساعات پیک بار

فرکانس f_i (occ / hr)	نرخ انتقال به حالت پایین‌تر λ_{-i} (occ / hr)	نرخ انتقال حالت بالاتر به λ_{+i} (occ / hr)	احتمال P_i	ظرفیت موجود	حالت
۰/۰۱۴۶	۰	۰/۱۵۷۳	۰/۰۹۳۲	۳۰۴۰۰	۱
۰/۸۴۱۱	۰/۹۲۳۵	۰/۴۹۶۵	۰/۵۹۲۳	۳۴۱۳۶	۲
۰/۱۰۳۵	۰/۳۲۹۰	۰	۰/۳۱۴۵	۳۷۸۷۱	۳



شکل ۴: تعداد خودرو در حالت پارک در یک روز کاری نمونه در فصل بهار

با توجه به داده‌ها مشاهده می‌شود که نحوه رفتار خودروها در روزهای هفته (دوشنبه تا جمعه) متفاوت از روزهای تعطیل (شنبه-یکشنبه) می‌باشد که در شکل ۴ و ۵ نمایش داده شده است. جهت مقایسه تأثیر فصول مختلف بر روی نحوه سفرهای خودروها، شکل ۶ که یک روز نمونه در فصل‌های مختلف را بر روی یک نمودار نشان داده است. شکل‌های ۴-۶ تعداد خودرو در دسترس در حالت پارک را در هر ساعت از روز نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین تعداد خودرو در حالت پارک اغلب در ساعات ۷ و ۱۵ می‌باشد که معمولاً زمان حرکت از منزل به سوی محل کار، مدرسه و ... و برعکس می‌باشد. نحوه رفتار خودروها در فصل تابستان متفاوت از سایر فصول می‌باشد که می‌تواند به علت تعطیلی مدارس در این فصل و همچنین تغییرات بیشینه دمای هوا باشد. روزهای تعطیل به علت اینکه سفرهای کمتری به سمت محل کار انجام می‌گیرد، کمترین میزان خودرو در حوالی ساعت ۱۲ می‌باشد.

همان‌گونه که از شکل‌های ۴ تا ۶ مشخص است همواره بیش از ۵۰٪ خودروها در حالت پارک قرار دارند. بنابراین، خودروهای برقی می‌توانند به عنوان یک منبع قابل اعتماد در سیستم قدرت حضور داشته باشند. برای خودروهای برقی موجود فرض شده است که همه خودروها مشابه و دارای باتری با ظرفیت ۲۵ kWh باشند. با توجه به فرض صورت گرفته، هر خودرو در زمان فراخوانی توسط FO در ساعت پیک بار، ۵ kWh در بازه یک ساعته می‌تواند انرژی تزریق نماید. در این حالت، ماکزیمم پتانسیل قابل دسترس (MAP^{16}) برابر با مقدار ۲۵۵ MW است هرچند که پتانسیل قابل دسترس واقعی (RAP^{17}) کمتر از این مقدار می‌باشد. η مبدل برابر ۹۰٪ و در حالت دشارژ خودرو برقی به صورت بار منفی مدل شده است.

نوع شارژر خودرو برقی مورد استفاده در این مقاله از نوع استاندارد SAE²¹ J2836/3 و SAE J2847/3 از نوع AC سطح ۲ می‌باشد که در ولتاژ ۲۴۰ ولت تا جریان ۸۰ آمپر را می‌تواند مصرف نماید و توانایی مصرف یا تزریق حداکثر توان ۱۹/۲ کیلووات را دارا می‌باشد. همچنین،

۶-۲- نتایج مارکوف V2G

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شبکه از لحاظ ظرفیت تولید توانایی برآورده کردن بار سیستم را دارد اما با توجه به خط‌های موجود ظرفیت انتقال توان تولیدی ژنراتورها جهت تأمین این بار را ندارد و در صورت محاسبه پخش بار همگرایی صورت نمی‌گیرد، بنابراین نیاز به خطوط جدیدی است تا این مشکل برطرف گردد. با توجه به داده‌های بار شبکه ۲۴ باس با شروع از اول تابستان پیک بار در هفته ۱۰ام اتفاق می‌افتد که برابر ۸۵۵۰ MW است. شبکه اصلاح‌شده ۲۴ باس IEEE دارای ۴۱ مسیر کاندید جهت احداث خطوط است.

برای حل مسئله TEP، ماکزیمم تعداد خودرو برقی برابر ۵۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. جهت نشان دادن تأثیر حضور خودروهای برقی، مسئله در پنج سناریو حل گردیده است. سناریو اول بدون حضور خودرو برقی و بدون محاسبه ریسک، سناریو دوم بدون حضور خودرو برقی با در نظر گرفتن هزینه ریسک، سناریو سوم با حضور خودرو برقی به‌صورت قطعی و محاسبه هزینه ریسک و سناریو چهارم با حضور خودرو برقی به‌صورت احتمالی و محاسبه هزینه ریسک انجام شده است. سناریو پنجم به تأثیر حضور خودروهای برقی بر روی یک باس دیگر می‌پردازد. در الگوریتم CS بهبودیافته تعداد جمعیت اولیه برابر با ۱۵ و تعداد تکرار برابر با ۱۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. اندازه گام بین [0.04-0.07] به‌صورت کاهشی در طول تکرارها لحاظ شده است.

۶-۳-۱- نتایج

سناریو اول: در این سناریو مسئله $P-TEP^{V2G}$ بدون حضور خودروهای برقی و بدون در نظر گرفتن هزینه ریسک (TEP معمولی) حل گردیده و خطوط انتخاب شده و هزینه کل به‌دست آمده است. جهت احداث خطوط جدید باید در نظر داشت که بین هر دو باس که مسیری در بین خطوط کاندید دارد، حداکثر سه خط می‌تواند وجود داشته باشد ($N_{max} = 3$).

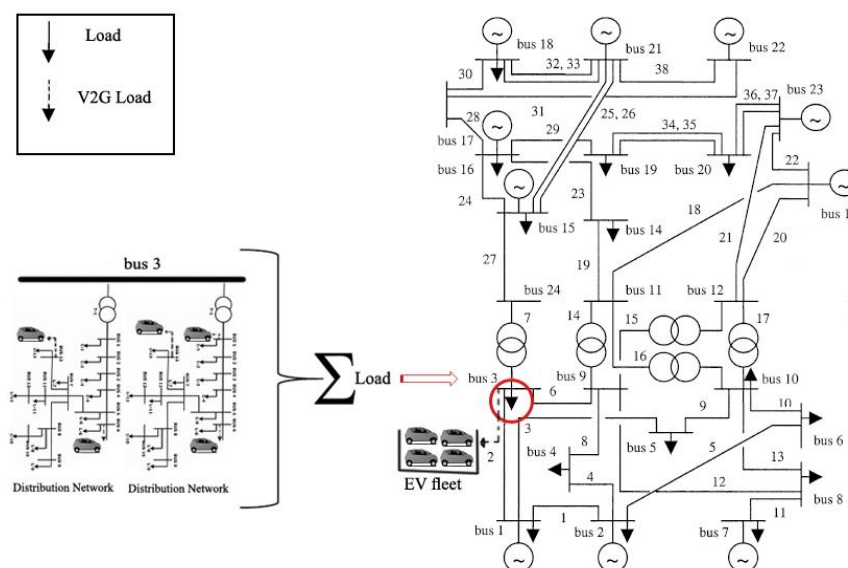
جهت مدل‌سازی عدم قطعیت حاکم بر خودروهای برقی از مدل مارکوف استفاده شده است. با توجه به اینکه در برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال داده‌های پیک سالانه اهمیت دارد، داده‌های NHTS برای یک سال در ساعت پیک روزانه در نظر گرفته شده است. جهت خوشه‌بندی داده‌های خودرو تعداد پله گسستگی برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. بیشینه و کمینه تعداد خودرو در دسترس در ساعات پیک روزانه در داده سال ۲۰۰۹ NHTS به ترتیب برابر با ۳۷۸۷۱ و ۳۰۴۰۰ است. با استفاده از روابط (۸-۱) جدول فرکانس و تداوم برای داده‌های یک سال NHTS به‌دست آمده است که در جدول ۲ گزارش شده است.

با استفاده از نتایج جدول ۲ اقدام به حل مسئله TEP با در نظر گرفتن عدم قطعیت خودروهای برقی از دید شبکه انتقال شده است.

۶-۳-۲- مورد مطالعاتی

مطالعه در محیط نرم‌افزار MATLAB با اعمال الگوریتم CS بهبودیافته انجام و پخش بار بهینه به‌وسیله Matpower 5.1 محاسبه شده است. سیستم مورد مطالعه سیستم ۲۴ باس IEEE اصلاح‌شده است. شبکه ۲۴ باس IEEE و نحوه حضور خودروهای برقی در سطح شبکه توزیع از دید شبکه انتقال در شکل ۷ نشان داده شده و اطلاعات مربوطه از مرجع [۳۹] گرفته شده است. مجموعه خطوط کاندید جهت احداث خط جدید و همچنین هزینه احداث از مرجع [۳۹] اخذ شده است و حداکثر تعداد خط در هر مسیر پیشنهادی سه خط ($N_{max}=3$) در نظر گرفته شده است. افق برنامه‌ریزی ۱۰ سال در نظر گرفته شده است.

در برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال شبکه باید به‌نحوی باشد که بتواند ماکزیمم توانی که در پیک سالانه با آن مواجه می‌شود را از خود عبور دهد بدون آنکه محدودیت‌های خطوط انتقال نقض و بار مشترکین دچار ریزش شود. در شبکه اصلاح‌شده ۲۴ باس IEEE، بیشینه بار برابر با ۸۵۵۰ مگاوات و بیشینه ظرفیت تولید ۱۰۲۱۵ مگاوات می‌باشد.



شکل ۷: نحوه تأثیر حضور خودروهای برقی در سطح شبکه توزیع از دید شبکه انتقال

تعداد ۶ خط با هزینه ۱۸۲ میلیون دلار و هزینه ریسک ۵۷/۲۷ میلیون دلار به‌دست آمده است که در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این سناریو نسبت به سناریو دوم، هزینه احداث خطوط و هزینه ریسک به‌ترتیب ۶۹ و ۲۲/۹ میلیون دلار کاهش داشته است و هزینه کل کاهش ۳۶/۷۳٪ را نشان می‌دهد که نتایج نشان‌دهنده تأثیر به‌سزای حضور مدیریت‌شده خودروهای برقی است.

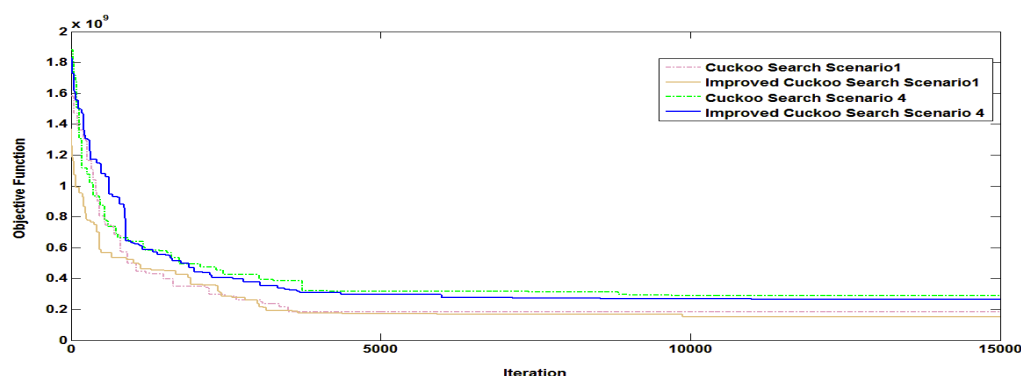
سناریو چهارم: در این حالت با استفاده از مدل‌سازی عدم قطعیت حضور خودروهای برقی مدل احتمالی مارکوف PEVها جهت حل مسئله P-TEP^{V2G} استفاده شده است. همان‌گونه که در جدول ۲ گزارش شده است در این حالت مدل مارکوف به سه پله شکسته شده است و احتمال هر حالت نیز محاسبه شده است. با توجه به تعداد حالات گسستگی و شرط میزان تزریق توان در حالت اول ۱۵۲ MW با احتمال ۰/۰۹۳ درصد، حالت دوم ۱۷۰/۶۸ MW با احتمال ۰/۵۹ درصد و حالت سوم ۱۸۹/۳۵ MW با احتمال ۰/۳۱ درصد توان توسط خودروهای برقی به شبکه تزریق می‌شود. در این حالت نیز جهت محاسبه هزینه ریسک مقدار IEAR همانند سناریو دوم در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج حاصل از CS بهبودیافته تعداد ۶ خط با هزینه احداث ۱۹۳ میلیون دلار و هزینه ریسک ۷۰/۰۱ میلیون دلار به‌دست آمده است. در این حالت نیز باس سوم جهت حضور خودروهای برقی انتخاب شده است. نحوه همگرایی الگوریتم CS اصلی و بهبودیافته در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این حالت نیز مشخص است الگوریتم CS بهبودیافته توانایی بهتری در پیدا کردن جواب دارد.

نتایج حاصل در این سناریو نسبت به سناریو دوم در هزینه کل کاهش ۲۴/۰۱٪ را نشان می‌دهد، اما نسبت به سناریو سوم در هزینه ریسک و احداث خطوط جدید به ترتیب افزایش ۱۲/۷۴ و ۱۱ میلیون دلاری و هزینه کل ۹/۰۲٪ افزایش را نشان می‌دهد. این افزایش هزینه‌ها ناشی از مدل‌سازی احتمالی عدم قطعیت حضور خودروهای برقی می‌باشد که نشان‌دهنده اهمیت این موضوع می‌باشد. توپولوژی خطوط پیشنهادی در مدل‌سازی قطعی و احتمالی با یکدیگر متفاوت می‌باشد و هزینه کل در حالت احتمالی بیش‌تر می‌باشد، اما مدل‌سازی احتمالی (سناریو چهارم) به مدل واقعی نزدیک‌تر است.

نتایج حاصل در جدول ۳ گزارش شده است. در این سناریو نحوه همگرایی الگوریتم اصلی CS و الگوریتم بهبودیافته CS در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۸ مشخص است الگوریتم بهبودیافته با تعداد تکرار برابر به جواب بهتری دست یافته است. در صورت مقایسه جواب به‌دست‌آمده با نتایج سایر مقالات که در جدول ۴ گزارش شده است، می‌توان مشاهده نمود که جواب حاصل با بهترین جواب‌های سایر مقالات برابر است و نشان از مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی دارد. در این مراجع نیز، مسئله TEP به‌صورت ایستا و بلندمدت (افق زمانی ۱۰ سال) در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از الگوریتم CS بهبودیافته، ۵ خط با هزینه سرمایه‌گذاری ۱۵۲ میلیون دلار را پیشنهاد داده است.

سناریو دوم: در این حالت علاوه بر حل مسئله TEP هزینه ریسک نیز مد نظر قرار گرفته است. جهت محاسبه هزینه ریسک مقدار IEAR با توجه به مرجع [۲۰] برابر با ۵۰۰ \$/MWh در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج الگوریتم، تعداد ۹ خط با هزینه ۲۵۱ میلیون دلار جهت احداث خطوط جدید پیشنهاد گردیده است. هزینه ریسک در این حالت برابر با ۷۵/۱۷ میلیون دلار به‌دست آمده است. همان‌گونه که از نتایج این سناریو مشخص است هزینه احداث خطوط نسبت به سناریو اول افزایش داشته است که ناشی از در نظر گرفتن هزینه ریسک می‌باشد. در حالتی که هزینه ریسک در نظر گرفته می‌شود باید دقت داشت که در صورتی که هزینه ریسک بخواهد کمینه شود هزینه سرمایه‌گذاری خطوط به‌شدت افزایش می‌یابد و در صورتی که هزینه سرمایه‌گذاری بخواهد کمینه شود هزینه ریسک به‌شدت افزایش می‌یابد، بنابراین باید یک تناسب مطلوبی بین هزینه ریسک و سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شود.

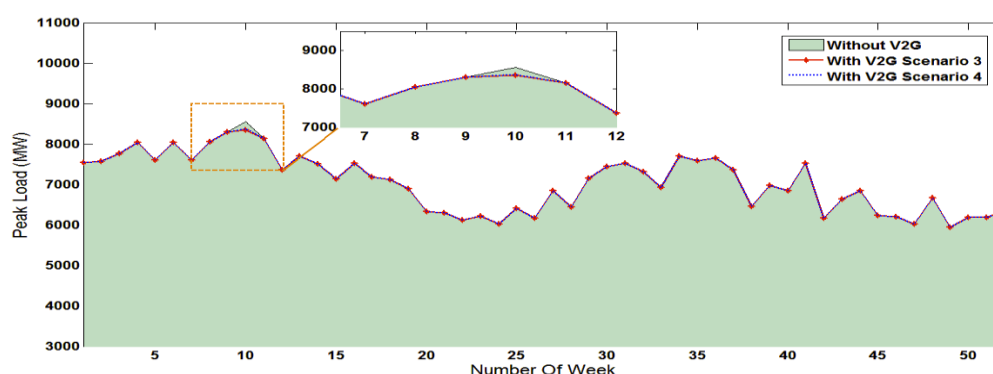
سناریو سوم: در این حالت مسئله با در نظر گرفتن حضور خودروهای برقی به‌صورت قطعی حل گردیده و هزینه ریسک نیز در نظر گرفته شده است. در این حالت باس سوم جهت حضور خودروهای برقی انتخاب شده است. تعداد خودروهای برقی در این حالت ۴۰۰۰ در نظر گرفته شده است که با توجه به محدودیت توان تزریقی توانایی تزریق توان ۲۰۰ مگاوات را دارند. در این حالت با توجه به نتایج حاصل از الگوریتم CS



شکل ۸: نحوه همگرایی الگوریتم در سناریوهای اول و چهارم

جدول ۳: نتایج حاصل از سناریوهای ۵-۱

نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی کوکو بهبودیافته					نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی کوکو اصلی		
سناریو	هزینه احداث خطوط پیشنهادی (M\$)	هزینه ریسک (M\$)	خطوط پیشنهادی	زمان اجرای الگوریتم به ازای هر تکرار (Sec)	هزینه احداث خطوط پیشنهادی (M\$)	هزینه ریسک (M\$)	زمان اجرای الگوریتم به ازای هر تکرار (Sec)
اول	۱۵۲	---	(۸-۷)(۱۰-۶)(۸-۷)(۱۲-۱۰)(۱۶-۱۴)	۰/۱۱۸	۱۸۲	---	۰/۱۰۹
دوم	۲۵۱	۷۵/۱۷	(۱۰-۶)(۱۰-۶)(۸-۷)(۸-۷)(۱۲-۱۰) (۱۴-۱۳)(۵-۱)(۲-۱)(۲۴-۳)	۰/۶۸	۳۱۷	۱۲۲/۸۲	۰/۶۴
سوم	۱۸۲	۵۷/۲۷	(۱۴-۱۳)(۵-۱)(۱۰-۶)(۸-۷)(۸-۷)(۱۲-۱۰)	۰/۷	۱۹۴	۹۴/۰۸	۰/۶۷
چهارم	۱۹۳	۷۰/۰۱	(۱۴-۱۳)(۴-۲)(۱۰-۶)(۸-۷)(۸-۷)(۱۲-۱۰)	۰/۷۷	۲۱۸	۷۲/۱	۰/۷۴
پنجم	۱۹۶	۹۵/۲۶	(۱۰-۶)(۸-۷)(۸-۷)(۱۲-۱۰)(۱۷-۱۶)(۱۴-۱۳)	۰/۷۷	۲۴۸	۵۵/۲۳	۰/۷۴



شکل ۹: تقاضای هفتگی بار با و بدون حضور خودروهای برقی

جدول ۵: خطوط جدید پیشنهادی در سناریو ۵-۲

سناریو	سناریو پنجم	سناریو چهارم	سناریو سوم	سناریو دوم	خطوط پیشنهادی
۲	۲	۲	۲	۲	(۸-۷)
۱	۱	۱	۱	۱	(۱۲-۱۰)
۱	۱	۱	۱	۱	(۱۰-۶)
۱	۱	۱	۱	۱	(۱۴-۱۳)
۰	۰	۰	۱	۱	(۵-۱)
۰	۰	۰	۰	۱	(۱۰-۶)
۰	۰	۰	۰	۱	(۲۴-۳)
۰	۰	۰	۰	۱	(۲-۱)
۰	۰	۱	۰	۰	(۴-۲)
۱	۰	۰	۰	۰	(۱۷-۱۶)

سناریو پنجم: در این حالت تأثیر حضور خودروهای برقی بر روی یک باس دیگر به غیر از باس ۳ بر مسئله P_TEP^{V2G} مورد مطالعه قرار گرفته است. در این سناریو حضور خودروها در باس ۸ فرض شده است. نحوه حضور خودروهای برقی همانند سناریو چهارم از جدول ۲ اخذ شده است. در این حالت نتایج حاصل از CS بهبودیافته تعداد ۶ خط با

جدول ۴: مقایسه جواب الگوریتم پیشنهادی جستجوی کوکو

بهبودیافته با سایر روش‌ها

روش	هزینه احداث خطوط (M\$)
روش کلونی زنبور عسل [۲]	۱۵۲
روش شاخه و حد [۳]	۱۵۲
روش بهینه‌سازی حرکت براونی [۲۶]	۱۵۲
روش تفاضل تکاملی چندهدفه [۴۰]	۲۲۴
روش جستجوی کوکو بهبودیافته	۱۵۲

بنابراین، در حالت قطعی (سناریو سوم) در مواجهه با حالات واقعی، ممکن است شبکه پیشنهادی توانایی رویارویی با آن شرایط را نداشته باشد و سیستم دچار ریزش بار شود و علاوه بر کاهش قابلیت اطمینان سیستم هزینه‌های اضافی دیگری را به سیستم تحمیل کند. شکل ۹ منحنی بار پیش از حضور خودروهای برقی و پس از حضور آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۹ مشخص است، میزان پیک شبکه به‌علت حضور V2G‌ها کاهش پیدا کرده است.

خودروهای برقی و مقایسه روش‌های مختلف مدل‌سازی عدم قطعیت حضور خودروهای برقی بر مسئله TEP اشاره کرد.

مراجع

- [1] M. O. Buygi, H. M. Shanechi, G. Balzer and M. Shahidehpour. "Transmission planning approaches in restructured power systems", *IEEE Power Tech Conf.*, pp. 7-15, 2003.
- [2] C. Rathore and R. Roy, "Impact of wind uncertainty, plug-in-electric vehicles and demand response program on transmission network expansion planning", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 59-73, 2016.
- [3] R. Romero, E. Asada, E. Carreno and C. Rocha, "Constructive heuristic algorithm in branch-and-bound structure applied to transmission network expansion planning", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 1, no. 2, pp. 318-323, 2007.
- [4] *The Institution of Engineering and Technology*, Available from: <http://www.theiet.org/policy/key-topics/smart-grid/>
- [5] The 2010 Smart Grid System Report (SGSR). *United States Department of Energy Washington, DC 20585*: 2012, Available from: <http://energy.gov/sites/prod/files/2010%20Smart%20Grid%20System%20Report.pdf>.
- [6] W. Hu, C. Su, Z. Chen and B. Bak-Jensen, "Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 577-585, 2013.
- [7] M. Duvall, E. Knipping, M. Alexander, L. Tonachel and C. Clark, *Environmental Assessment of Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, EPRI Report, July, 2007.
- [8] A. Foley, I. Winning and B. Ó. Gallachóir. "State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Lille France, pp. 1-6, September, 2010.
- [9] J. Kiviluoma and P. Meibom, "Methodology for modelling plug-in electric vehicles in the power system and cost estimates for a system with either smart or dumb electric vehicles", *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1758-1767, 2011.
- [10] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5673-5689, 2013.
- [11] S. Han, S. Han and K. Sezaki, "Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 65-72, 2010.
- [12] J. Hu, H. Morais, T. Sousa and M. Lind, "Electric vehicle fleet management in smart grids: a review of services, optimization and control aspects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1207-1226, 2016.
- [13] M. A. Ortega-Vazquez, F. Bouffard and V. Silva, "Electric vehicle aggregator/system operator coordination for charging scheduling and services procurement", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1806-1815, 2013.
- [14] T. G. San Román, I. Momber, M. R. Abbad and Á. S. Miralles, "Regulatory framework and business models for charging plug-in electric vehicles: infrastructure, agents, and commercial relationships", *Energy policy*, vol. 39, no. 10, pp. 6360-6375, 2011.
- [15] L. Liu, M. Eisenreich, G. Balzer, A. Kessler and F. Teufel. "Possibility of electric vehicle integration into existing distribution grids in various regions", *Int CIGRE Symp*, Bologna Italy, pp. 101-116, 2011.

هزینه احداث ۱۹۶ میلیون دلار و هزینه ریسک ۹۵/۲۶ میلیون دلار را نشان می‌دهد. نتایج حاصل در این سناریو افزایش ۹/۶٪ را نسبت به سناریو چهارم نشان می‌دهد.

عاملی که باعث تفاوت تأثیر حضور خودروهای برقی در باس‌های متفاوت (باس ۳ و ۸) بر P_TEPV2G می‌شود محدودیت ظرفیت خطوط انتقال موجود در هر باس است. اگرچه در هر دو سناریو چهارم و پنجم ظرفیت حضور خودروهای برقی برابر می‌باشد اما با توجه به محدودیت ظرفیت خطوط انتقال متفاوت در هر کدام از باس‌ها هزینه ریسک متفاوتی حاصل می‌شود که منجر به تفاوت توپولوژی خطوط پیشنهادی برای هر کدام از سناریوها می‌شود.

به جهت ارزیابی توانایی الگوریتم CS بهبودیافته در یافتن جواب بهینه در جدول ۴ مقایسه‌ای میان نتایج حاصل از سناریو اول که به‌صورت مشترک در سایر مقالات مرجع نیز وجود داشت انجام شده است. نتایج توانایی مطلوب الگوریتم پیشنهادی در این مقاله را در یافتن جواب بهینه نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود خطوط جدیدی که با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند در هر چهار سناریو مشترک می‌باشند و نیاز به احداث این خطوط وجود دارد. خطوطی که هاشور خورده‌اند ناشی از حضور خودروهای برقی می‌باشد که با انتخاب هر کدام از سناریوهای مربوطه باید احداث شوند. سایر خطوط در صورت حضور خودروهای برقی، احداثشان به تأخیر می‌افتد.

۷- نتیجه‌گیری

این مقاله، به‌عنوان یک نوآوری در برنامه‌ریزی سیستم قدرت، یک ساختار TEP احتمالی تحت محیط شبکه هوشمند را فراهم کرده است. V2Gها، به‌عنوان یکی از دستاوردهای شبکه‌های هوشمند، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور بررسی اثر V2Gها در برنامه‌ریزی سیستم قدرت مدل P-TEPV2G معرفی شده است. حضور یک EV FO در شبکه هوشمند جهت برنامه‌ریزی بهینه حضور خودروهای برقی ضروری است. با توجه به اینکه در هر ساعت از شبانه‌روز حداقل ۵۰٪ PEVها در حالت پارک هستند، خودروهای برقی می‌توانند به‌عنوان یک منبع قابل اعتماد انرژی در نظر گرفته شوند. جهت مواجهه با عدم قطعیت حاکم بر خودروهای برقی از مدل احتمالی مارکوف بهره گرفته شده است و ساختار پیشنهادی بر شبکه اصلاح‌شده ۲۴ باس IEEE اعمال شده است. بررسی‌های گوناگون بر روی حضور خودروهای برقی (عدم حضور خودرو برقی، حضور خودرو برقی به‌صورت قطعی و احتمالی)، نشان می‌دهد که با حضور V2Gها در TEP، هزینه‌های کل در طی روند بهینه‌سازی کاهش یافته است و هزینه‌های اضافی می‌تواند به تأخیر بیفتد.

برای کارهای آینده، به جهت ادامه مقاله، می‌توان به حضور خودروهای برقی به‌صورت توزیع‌شده در سطح شبکه، مکان‌یابی بهینه

- [26] C. Rathore and R. Roy, "A novel modified GBMO algorithm based static transmission network expansion planning", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 62, pp. 519-531, 2014.
- [27] X.-S. Yang and S. Deb, "Cuckoo search via Lévy flights", *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*, IEEE NaBIC 2009, India, pp. 210-214, 2009.
- [28] W. Su, J. Wang, K. Zhang and A. Q. Huang, "Model predictive control-based power dispatch for distribution system considering plug-in electric vehicle uncertainty", *Electric Power Systems Research*, vol. 106, pp. 29-35, 2014.
- [29] Y. He, B. Venkatesh and L. Guan, "Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1095-1105, 2012.
- [30] K. S. Gallagher and E. Muehlegger, "Giving green to get green? Incentives and consumer adoption of hybrid vehicle technology", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 61, no. 1, pp. 1-15, 2011.
- [31] W. Sierzechula, S. Bakker, K. Maat and B. van Wee, "The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption", *Energy Policy*, vol. 68, pp. 183-194, 2014.
- [32] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems*, Springer, 1992.
- [33] L. Zhao, S. Prousch, M. Hübner and A. Moser, "Simulation methods for assessing electric vehicle impact on distribution grids", *IEEE PES T&D*, pp. 1-7, 2010.
- [34] C. C. Aggarwal and C. K. Reddy, *Data clustering: algorithms and applications*, CRC Press, 2013.
- [35] C. Jaeseok, T. Tran, A. A. El-Keib, R. Thomas, O. HyungSeon and R. Billinton, "A method for transmission system expansion planning considering probabilistic reliability criteria", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1606-1615, 2005.
- [36] A. M. Reynolds and M. A. Frye, "Free-flight odor tracking in *Drosophila* is consistent with an optimal intermittent scale-free search", *PloS one*, vol. 2, no. 4, pp. 354-365, 2007.
- [37] U.S. Department of Transportation, *Federal Highway Administration, 2009 National Household Travel Survey 2011*, Available from: <http://nhts.ornl.gov>.
- [38] S. I. N. organization. SAE International Nonprofit organization, Available from: <http://articles.sae.org/7479/>.
- [39] R. Fang and D. J. Hill, "A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 374-380, 2003.
- [40] M. Basu, "Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution", *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 2845-2853, 2011.
- [16] B. Roossien and J. Laarakkers, "Studying grid impact and opportunities of electric vehicles using a detailed driving behaviour model", *17th Power Syst Comput Conf.*, Stockholm Sweden, pp. 1-10, 2011.
- [17] M. D. Galus, C. Dobler, R. A. Waraich, G. Andersson, *Predictive, distributed, hierarchical charging control of PHEVs in the distribution system of a large urban area incorporating a multi agent transportation simulation*, ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IVT, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, pp. 1-12, 2011.
- [۱۸] سعید صبوری، رسول کاظم‌زاده و هدایت صبوری، «ارزیابی میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار ناشی از عدم قطعیت منابع بادی و بار در مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی با استفاده از شاخص ارزش در خطر شرطی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحه ۱۳۵-۱۴۸، تابستان ۱۳۹۵.
- [۱۹] نبی طاهری، رحمت‌الله هوشمند و رضا همتی، «برنامه‌ریزی هماهنگ نصب منابع تولید پراکنده و توسعه شبکه توزیع در حضور نامعینی بار و قیمت انرژی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۱، صفحه ۴۳-۵۶، بهار ۱۳۹۳.
- [20] A. Hajebrahimi, A. Abdollahi and M. Rashidinejad, "Probabilistic multiobjective transmission expansion planning incorporating demand response resources and large-scale distant wind farms", *IEEE System Journal*, vol. 99, IEEE Early Access Articles, 2015.
- [21] C. Ruiz and A. J. Conejo, "Robust transmission expansion planning", *European Journal of Operational Research*, vol. 242, no. 2, pp. 390-401, 2015.
- [22] S. Dehghan, A. Kazemi and N. Amjadi, "Multi-objective robust transmission expansion planning using information-gap decision theory and augmented ϵ -constraint method", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 5, pp. 828-840, 2014.
- [23] F. Wu, F. Zheng and F. Wen, "Transmission investment and expansion planning in a restructured electricity market", *Energy*, vol. 31, no. 6, pp. 954-966, 2006.
- [24] R.-A. Hooshmand, R. Hemmati and M. Parastegari, "Combination of AC transmission expansion planning and reactive power planning in the restructured power system", *Energy Conversion and Management*, vol. 55, pp. 26-35, 2012.
- [25] B. Alizadeh and S. Jadid, "Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 9, pp. 948-960, 2011.

زیرنویس‌ها

¹⁰ Distribution System Operator

¹¹ Loss Of Load Expected

¹² Expected Energy Not Supplied

¹³ Cuckoo Search

¹⁴ Probabilistic Transmission Expansion Planning

¹⁵ Interrupted Energy Assessment Rate

¹⁶ Maximum Achievable Potential

¹⁷ Realistic Achievable Potential

¹⁸ Society of Automotive Engineers

¹ Transmission Expansion Planning

² The Institution of Engineering and Technology

³ Department of Energy

⁴ Electric Power Research Institute

⁵ Plug-In Electric Vehicle

⁶ Vehicle to Grid

⁷ Grid to Vehicle

⁸ Electric Vehicle Fleet Operator

⁹ Transmission System Operator