

ارائه یک مدل احتمالاتی برای جابجایی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی

راضیه آقاپور^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، محمدصادق سپاسیان^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور- تهران- ایران

آدرس پست الکترونیکی- r.aghapour@ace.sbu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - تهران- ایران

آدرس پست الکترونیکی- m_sepasian@sbu.ac.ir

چکیده: برنامه‌ریزی و احداث ایستگاه‌های شارژ از جنبه‌های مهم گسترش توسعه خودروهای الکتریکی به‌شمار می‌روند. با توجه به تأثیر متقابل شبکه قدرت و صنایع حمل‌ونقل، طراحی ایستگاه‌های شارژ سریع، مستلزم در نظر گرفتن روش‌مند مسائل مرتبط با آن، از جمله ویژگی‌های شبکه ترافیک، تقاضای شارژ و محدودیت‌های شبکه الکتریکی می‌باشد. هدف از مقاله حاضر، تعیین مکان و ظرفیت بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع در شبکه توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها می‌باشد. در ابتدا، به منظور تعیین تقاضای شارژ خودروها، مدل تصادفی مبتنی بر نظریه صف و مدل تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر توسعه داده شده است. سپس، هزینه سالانه تجهیزات و تلفات انرژی در چارچوب برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی کمینه شده است. جنبه‌های احتمالاتی مسئله با استفاده از روش برآورد نقطه‌ای به همراه سری گرام-شارلیه حل شده است. علاوه بر این، مدل‌های غلبه احتمالاتی به منظور تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان معرفی شده است. جهت نشان دادن کارایی رویکرد پیشنهادی، نتایج برنامه‌ریزی بر روی هر دو شبکه توزیع و ترافیک نشان داده شده است. نتایج حاصل، نشان‌دهنده آن است که، برآورد نادرست عدم قطعیت‌ها در روش قطعی ممکن است به یک راه حل ناشدنی با نقض محدودیت‌های سیستم منجر گردد. بعلاوه، روش‌های غلبه احتمالاتی با در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت‌ها بر شاخص‌های تصمیم‌گیری و ارائه مجموعه طرح‌های نامغلوب از نظر ریسک و هزینه، سرمایه‌گذار را در امر تصمیم‌گیری یاری می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه شارژ سریع، برآورد نقطه‌ای، تخصیص ترافیک، غلبه احتمالاتی، قیود تصادفی، نظریه صف.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۸/۰۹

نام نویسنده‌ی مسئول: محمد صادق سپاسیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور

۱- مقدمه

همان‌طور که همه دولت‌ها در سراسر جهان به‌سوی اقتصادی با انرژی سبز حرکت می‌کنند، نقش خودروهای الکتریکی (EVs^۱) به‌دلیل کمک به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در بخش حمل‌ونقل روزبه‌روز اهمیت می‌یابد [۱]. با توجه به محدودیت مسافت تمام الکتریک (AER^۲) طی شده توسط این خودروها، به‌کارگیری خودروهای الکتریکی در مقیاس وسیع و همچنین ایجاد قابلیت سفر در مسافت‌های طولانی، نیازمند گسترش زیرساخت‌های شارژ خودروی الکتریکی مانند ایستگاه‌های شارژ سریع (FCS^۳) است. از سویی دیگر، با گسترش روزافزون خودروهای الکتریکی به‌دلیل ماهیت کنترل‌نشده شارژ این خودروها و قرارگیری آن‌ها در مکان‌های مختلف، ممکن است فرآیند شارژ آن‌ها تأثیرات نامطلوبی (نظیر افزایش تلفات و افت ولتاژ) بر شبکه توزیع داشته باشد [۲]. بنابراین بدون طراحی بهینه یک ایستگاه شارژ سریع، بهره‌گیری از اثرات مفید خودروهای الکتریکی بعید به‌نظر می‌رسد.

برآورد یا پیش‌بینی تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی، گام نخست و اساسی در برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ به‌شمار می‌رود. تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی به عوامل نامشخصی از قبیل زمان و مکان شارژ باتری‌ها و یا حالت شارژ (SOC^۴) باتری‌ها در هنگام شارژ وابسته می‌باشند. با این‌حال، با ارزیابی پارامترها و الگوی کلی مربوط به رفتار حرکتی وسایل نقلیه (که می‌تواند از عادات ترافیکی آن‌ها استخراج شود)، رفتار واقعی پروفیل بار شارژ خودروهای الکتریکی را می‌توان با یک مدل تصادفی تخمین زد [۳].

در مراجع [۴، ۵]، با مدل‌سازی خودروهای ورودی متقاضی دریافت شارژ مطابق توزیع پواسون، ضمن بهره‌گیری از نظریه صف^۵ برای استخراج مشخصه‌های آماری بار شارژ خودروهای الکتریکی، یک مدل تصادفی کامل توسعه داده شده است. با این‌حال مطالعات [۴، ۵]، نرخ ورود خودروها را مطابق توزیع پواسون، که یک فرآیند تصادفی با فرض نرخ ورود ثابت در همه زمان‌هاست، در نظر گرفته‌اند. در صورتی‌که، بر فرض مثال ممکن است میانگین تعداد خودروهای مراجعه‌کننده در ساعات اولیه روز بیشتر از میانگین تعداد خودروهایی باشد که در ساعات پایانی روز به ایستگاه شارژ مراجعه می‌کنند. در مرجع [۱] روشی مبتنی بر تئوری صف برای مدل‌سازی پروفیل ۲۴ ساعته بار ناشی از شارژ وسیله نقلیه الکتریکی قابل اتصال به شبکه (PEV^۶) در ایستگاه شارژ ارائه شده است. مدل صف مفروض، ورود خودروهای الکتریکی قابل اتصال به شبکه را به‌عنوان یک فرآیند پواسون غیرهمگن در نظر گرفته است و تأثیر شارژ آن‌ها بر شبکه توزیع را در حالت قطعی و تصادفی بررسی کرده است. در مطالعه [۶] پیش‌بینی توان موردنیاز برای شارژ خودروهای الکتریکی در یک شبکه ترافیک شهری واقعی، در دو مرحله صورت گرفته است. در گام نخست با استفاده از داده‌های دوربین‌های مداربسته، نرخ ورود خودروهای

الکتریکی به ایستگاه‌های شارژ براساس مدل ترافیکی زنجیره مارکوف و رویکرد دورنوردی^۷ فرموله‌بندی می‌شود، سپس تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی، با استفاده از مدل صف و داده‌های گام نخست، تعیین می‌شود. نویسندگان [۷] به مدل‌سازی زمانی و مکانی تقاضای شارژ ایستگاه شارژ سریعی که در خروجی یک بزرگراه قرار دارد، پرداخته‌اند و یک مدل ریاضی براساس مدل ترافیک روان و تئوری صف ارائه نموده‌اند. مدل ریاضی ارائه شده می‌تواند برای پیش‌بینی پروفیل تقاضای شارژ در یک ایستگاه شارژ سریع جهت برنامه‌ریزی شبکه توزیع منظور گردد.

در سال‌های اخیر، مطالعات قابل توجهی در ارتباط با تعیین مکان و اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ خودرو الکتریکی (EVCS^۸) براساس روش‌های قطعی انجام گرفته است. مرجع [۸] با در نظر گرفتن عوامل متعدد بر مصرف خودروهای الکتریکی، مدل بهینه‌سازی خطی عدد صحیحی را به منظور تعیین مکان ایستگاه شارژ با هدف حداقل‌سازی هزینه سفر رانندگان، محقق ساخته است. مطالعه [۹] آسایش رانندگان در سهولت دستیابی به ایستگاه شارژ سریع را به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل در افق بلندمدت توسعه و گسترش خودروهای الکتریکی در نظر گرفته است. در مرجع [۱۰]، یک مدل زمانی و مکانی براساس الگوریتم خوشه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه اشتراکی (SNN^۹) و نظریه صف، برای تعیین موقعیت مکانی و ظرفیت ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی معرفی شده است. لیکن، نادیده گرفتن اثر بار اضافه شده ناشی از ایستگاه شارژ بر شبکه توزیع از نقاط ضعف مطالعات [۸-۱۰] می‌باشد. در مرجع [۱۱] با استفاده از یک روش غربال‌گری دومرحله‌ای، پروفیل ولتاژ و تلفات به‌عنوان فاکتورهای اصلی در برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی در شبکه توزیع برق و شبکه ترافیک در نظر گرفته شده است. با این‌حال، مطالعه انجام گرفته در [۱۱] تنها با مدنظر قرار دادن مسافتی از پیش تعیین شده براساس مشخصات باتری خودروهای متعارف، مکان بهینه ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی را تعیین نموده است و ترجیح رانندگان در مسافرت‌های جاده‌ای لحاظ نشده است. حقیقت امر آن است که رفتار شارژ خودروهای الکتریکی به‌واسطه تحرک و توزیع ناهمگن آن‌ها ممکن است از شرایط جریان ترافیک شبکه حمل‌ونقل منعکس گردد. از این‌رو، توزیع جریان ترافیک می‌تواند در مکان‌یابی و تعیین اندازه ایستگاه شارژ سریع مورد استفاده قرار گیرد [۳]. نویسندگان [۱۲] توپولوژی شبکه و محدودیت‌های ترافیکی را به‌طور همزمان برای برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ در نظر گرفته‌اند. تابع چندهدفه با اهداف تلفات توان و انحراف ولتاژ و مسافت سفر جهت تعیین مکان و اندازه بهینه ایستگاه شارژ در شبکه توزیع و ترافیک ارائه شده است. تأثیر قیمت زمان استفاده (TOU^{۱۰}) بر رفتار شارژ خودروهای برقی، در مرجع [۱۳] بررسی شده است و برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ با اهداف حداکثرسازی تقاضای توان تامین شده توسط ایستگاه‌های شارژ سریع، حداقل‌سازی هزینه در زمان شارژ و حداقل‌سازی دامنه تغییرات بار شبکه، بهینه شده است. با

• مدل‌سازی مسئله جایابی بهینه ایستگاه شارژ سریع در چارچوب برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی که در آن تاثیر حضور خودروهای الکتریکی بر شبکه توزیع با استفاده از روش برآورد نقطه‌ای به همراه سری گرام-شارلیه ($^{(2)}$ PEM-GCE) در نظر گرفته شده است [۱۶] [۱۷].

• ارائه معیارهای غلبه احتمالاتی جهت در نظر گرفتن تاثیر عدم قطعیت‌ها در انتخاب طرح نهایی.

در ادامه ساختار مقاله به این شکل خواهد بود: در بخش دوم مدل تدوین شده تعیین ظرفیت و تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی در یک ایستگاه شارژ سریع براساس مدل تخصیص ترافیک و نظریه صف ارائه شده است. مسئله جایابی ایستگاه شارژ سریع تحت عدم قطعیت در بخش ۳ فرموله شده است. در بخش ۴ به معرفی روش پخش بار احتمالاتی برآورد نقطه‌ای پرداخته شده است. بخش ۵ به تشریح معیارهای غلبه احتمالاتی اختصاص یافته است. روند برنامه‌ریزی در بخش ۶ توصیف شده است و نتایج مطالعه بر روی شبکه تست در بخش ۷ تحلیل شده است. در پایان و در بخش ۸ نتیجه‌گیری نهایی ارائه شده است.

۲- تعیین ظرفیت و پروفیل بار ایستگاه شارژ سریع

در این بخش رویکرد ارائه شده جهت مدل‌سازی تعیین ظرفیت و پروفیل بار ایستگاه شارژ سریع، براساس مدل تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر [۱۵، ۱۸] و تئوری صف $M/M/s$ [۱۹] تشریح شده است (شکل ۱). در مرحله اول، به منظور محاسبه آهنگ ورود وسایل نقلیه به ایستگاه شارژ، مسئله تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر حل می‌شود [۱۴]. در مرحله دوم، ظرفیت ایستگاه شارژ سریع با استفاده از نظریه صف $M/M/s$ و با در نظر گرفتن آهنگ ورود وسایل نقلیه متقاضی شارژ با توجه به ماکزیمم زمان انتظار آن‌ها در صف تعیین می‌شود [۱۴]. در نهایت مدل ریاضی پیشنهادی برای تقاضای ایستگاه شارژ سریع، مطابق نظریه صف $M/M/s$ ارائه شده است [۷].

نظریه صف [۱۹] اغلب برای تجزیه و تحلیل ریاضی پیامد ورود تصادفی مشتریان جهت دریافت خدمت از سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند اتصال تصادفی خودروهای الکتریکی و دریافت شارژ از شبکه قدرت از این الگو تبعیت می‌کند [۲۰، ۲۱]. مدل‌های خدمت‌دهی صف مطابق نماد اختصاری کندال $^{(1)}(A/B/C)$ نشان داده می‌شوند. که در آن، عبارت اول A ، نشان‌دهنده توزیع بین دو ورود متوالی می‌باشد. در واقعیت، زمان ورود هر خودرو الکتریکی به ایستگاه شارژ یک متغیر تصادفی است؛ اما ممکن است باتوجه به مطالعات آماری از توزیع مشخصی پیروی نماید. بدین ترتیب، در مدل پیشنهادی A ، یک توزیع مارکوفی وابسته به زمان (پواسون) می‌باشد و با نماد استاندارد M نشان داده می‌شود. عبارت دوم B ، بیان‌گر توزیع

این‌حال، مدل صف مفروض برای هزینه زمان شارژ، نرخ ورود خودروها را در کلیه ساعات، ثابت در نظر گرفته است. در مرجع [۱۴] برنامه‌ریزی چندهدفه توسعه شبکه توزیع و جایابی بهینه ایستگاه شارژ سریع به صورت همزمان، ارائه شده است. مدل جریان ترافیک تعادلی با حداکثرسازی آسایش رانندگان به همراه تئوری صف جهت تخمین بار شارژ ایستگاه شارژ، توسعه داده شده است و الگوریتم چندهدفه تکاملی مبتنی بر جداسازی جهت حل مسئله به کار گرفته شده است.

در مطالعات مورد بررسی در زمینه برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ از روش قطعی به منظور تعیین مکان و اندازه بهینه ایستگاه شارژ سریع بهره گرفته شده است. لیکن، به واسطه موقعیت مکانی و زمانی متغیر خودروها، این مسئله به پارامترهای نامشخص بسیاری وابسته می‌باشد که تاثیر مستقیمی بر عملکرد طراحی ایستگاه شارژ سریع می‌گذارند. برآورد نادرست از عدم قطعیت‌ها ممکن است منجر به نقص محدودیت‌های مسئله گردد. از سوی دیگر، برآورد اضافی از تاثیر عدم قطعیت ممکن است هزینه سرمایه‌گذاری بالایی به بار آورد. نوآوری اصلی مقاله حاضر نسبت به مطالعات قبلی، مدل‌سازی بار ایستگاه شارژ به صورت احتمالی و جایابی ایستگاه شارژ سریع تحت یک برنامه‌ریزی احتمالی می‌باشد. ماهیت اغلب پروژه‌های تصمیم‌گیری مانند سرمایه‌گذاری احداث ایستگاه شارژ دارای ریسک است. یکی از مشکلات ارزیابی هزینه سرمایه‌گذاری براساس مقدار میانگین تابع هزینه، عدم توجه کافی به ریسک سرمایه‌گذاری است. ارائه مدل‌های غلبه احتمالاتی^{۱۱} به منظور در نظر گرفتن ریسک در مسئله تصمیم‌گیری برای انتخاب طرح سرمایه‌گذاری، جنبه دیگر نوآوری مقاله حاضر به شمار می‌رود. مدل‌های غلبه احتمالاتی با ایجاد یک رابطه ترتیبی بین دو توزیع احتمال، فرصت‌های سرمایه‌گذاری را رتبه‌بندی کرده و لیستی از طرح‌های نامغلوب از نظر ریسک و هزینه را ارائه می‌نمایند. به طور کلی هدف از انجام این پژوهش، برنامه‌ریزی برای احداث ایستگاه شارژی است که بتواند هزینه‌های سیستم شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ سریع و تلفات شبکه توزیع را کمینه سازد و برخی قیود شبکه توزیع از جمله انحراف ولتاژ را ضمن در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به مسئله، برآورده سازد. اما مسئله مهم در این میان تعیین تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی در ساعات مختلف شبانه روز می‌باشد که تعیین آن نیازمند در اختیار داشتن الگوی رانندگی و محدودیت‌های شبکه ترافیک و عوامل تصادفی موثر بر پروفیل شارژ ایستگاه شارژ سریع می‌باشد. باتوجه به موارد فوق اهداف اصلی مقاله حاضر عبارتند از:

- تخمین توزیع وسایل نقلیه در جاده‌های شبکه ترافیک در طول شبانه‌روز با استفاده از مدل تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر (UETAM)^{۱۲} [۱۵] و استخراج پروفیل نرخ ورود خودروهای الکتریکی در یک ایستگاه شارژ براساس آسایش مشتریان.
- توسعه مدل صف جهت تعیین ظرفیت و پروفیل تقاضای شارژ ایستگاه شارژ سریع براساس نتایج حاصل از تخصیص ترافیک.

$$\min f(x) = \sum_{(mn) \in \Omega^{TL}} \int_0^{x_{mn}} p_{mn}(\omega) d\omega \quad (1)$$

تحت قیود:

$$\sum_{q \in Q_{rs}} f_q^{rs} = q_{rs} \quad (2)$$

$$f_q^{rs} \geq 0 \quad (3)$$

$$x_{mn} = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} f_q^{rs} \delta_{mn,q}^{rs} \quad (4)$$

در روابط فوق، تابع هدف مساله رابطه (۱)، حداقل سازی مجموع مساحت زیر نمودار تابع زمان سفر-حجم تمام کمان های شبکه است. رابطه (۲) اصل بقای جریان در شبکه را تضمین می کند، به این معنی که مجموع جریان تمام مسیرها بین هر مبدأ-مقصد ($O-D$) با تقاضای سفر آن مبدأ-مقصد مساوی است. رابطه (۳) شرط نامنفی بودن جریان ترافیک در مسیر q بین مبدأ r و مقصد s و رابطه (۴) محدودیت تعریفی^{۱۶} (جریان در کمان mn برابر مجموع جریان در تمام مسیرهایی است که کمان mn در آن ها قرار دارد) هستند.

مسئله تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر یک مسئله بهینه سازی غیرخطی است در این مقاله به منظور حل مسئله تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر از نرم افزار خرد و کلان نگر Aimsun^{۱۷} [۲۳] استفاده شده است.

چنانچه $f_{k,t}$ را جریان ترافیکی مهار شده توسط ایستگاه شارژ کاندید k ام در زمان t بنامیم، می توان $f_{k,t}$ با استفاده از نتایج حاصل از تخصیص ترافیک در زمان t مطابق رابطه (۵) محاسبه نمود [۱۴].

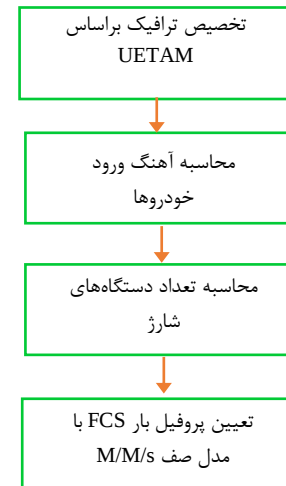
$$f_{k,t} = \sum_{r \in N^T} \sum_{s \in N^T} \sum_{q \in Q_{rs}} f_q^{rs} \delta_{k,q}^{rs} u_k \quad (5)$$

در رابطه فوق، $\delta_{k,q}^{rs}$ متغیر ضمنی صفر و یک (اگر جریان ترافیک بین جفت rs از ماتریس مبدأ-مقصد توسط ایستگاه شارژ k ام مهار گردد، یک و در غیر این صورت صفر) و u_k متغیر تصمیم گیری مربوط به احداث و یا عدم احداث ایستگاه شارژ k ام می باشد. در واقع $f_{k,t}$ ، مجموع جریان ترافیک تمامی مسیرهایی است که از گره ترافیکی k (که به عنوان کاندید برای احداث ایستگاه شارژ سریع در نظر گرفته شده است) در زمان t عبور می کنند. به عبارتی، نشان دهنده تعداد خودروهایی است که از گره ترافیکی k تردد نموده اند.

۲-۲- تعیین ظرفیت ایستگاه شارژ سریع با استفاده از نظریه صف

در این مقاله فرض بر این است که با پیدایش و گسترش خودروهای الکتریکی، الگوی سفر روزانه و سبک زندگی رانندگان در حالت کلی تحت تاثیر قرار نمی گیرد. بنابراین، رفتار رانندگی مالکان خودروهای الکتریکی شبیه به رفتار رانندگان وسایل نقلیه معمول باقی خواهد ماند [۲۱]. همان طوری که گفته شد $f_{k,t}$ نشان دهنده تعداد خودروهای

مدت زمان خدمت دهی (مدت زمان شارژ) می باشد. لازم به ذکر است، فرض می شود مدت زمان خدمت دهی از توزیع های مستقل یکسان پیروی می کنند. و در نهایت، سومین عبارت تعداد دستگاه های شارژ در یک ایستگاه شارژ سریع را نشان می دهد.



شکل (۱): روند تعیین ظرفیت و تقاضای توان ایستگاه شارژ سریع

۲-۱- مدل تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر

از آنجایی که خودروهای الکتریکی برای تقاضای حمل و نقل مالکان آن ها مورد استفاده قرار می گیرند، عادات و تقاضای سفر مالکان تعیین کننده رفتار خودروهای الکتریکی خواهد بود. در نتیجه، هر مطالعه مربوط به خودروهای الکتریکی بدون در نظر گرفتن مشخصه های حمل و نقلی غیرواقع بینانه خواهد بود [۳]. به طور کلی، سیاست ها و برنامه ریزی های سیستم حمل و نقل توزیع مکانی و زمانی خودروهای الکتریکی و در نتیجه الگوی توان مورد نیاز آن ها را تغییر می دهد و به موجب آن بهره برداری سیستم قدرت تحت تاثیر قرار می گیرد [۲۲]. فرض کنید $G(N^T, \Omega^{TL})$ نشان دهنده شبکه ترافیکی باشد که در آن N^T و Ω^{TL} به ترتیب بیانگر مجموعه گره ها و کمان های شبکه است. در برنامه ریزی حمل و نقل، برآورد جریان در کمان ها یا مسیرهای شبکه (از خروجی های فرآیند تخصیص ترافیک)، مبتنی بر فرض های متفاوت هستند که اهم آن ها فرض رفتاری است. در فرض رفتاری که منجر به تخصیص تعادلی می شود، هر مسافر به نحوی عمل می کند که زمان سفر خود را کمینه کند. اگر $p_{mn}(\omega)$ تابع زمان سفر-حجم کمان mn f_q^{rs} مقدار حجم یا جریان ترافیک در مسیر q بین مبدأ r و مقصد s q_{rs} میزان تقاضای سفر بین مبدأ r و مقصد s ، x_{mn} حجم ترافیک در کمان mn $\delta_{mn,q}^{rs}$ متغیر ضمنی صفر و یک (اگر کمان mn جزئی از مسیر q بین مبدأ r و مقصد s باشد، یک و در غیر این صورت صفر) و Q_{rs} مجموعه مسیرهای بین مبدأ و مقصد rs باشند، مسئله تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر در هر بازه زمانی به صورت زیر فرمول بندی می شود [۱۵]:

خدمت‌دهی مناسب شارژ می‌تواند به‌طور قابل توجهی سبب افزایش نفوذ خودروهای الکتریکی شود. در خصوص ایستگاه شارژ سریع، کیفیت خدمت‌رسانی تا حدود زیادی توسط زمان انتظار برای دریافت شارژ در ساعت اوج تردد تعیین می‌شود [۱۴]. کاهش مدت‌زمان انتظار می‌تواند با افزایش دستگاه‌های شارژ محقق شود. به‌لحاظ تئوری، دستگاه‌های شارژ بیشتر به‌معنی سرمایه‌گذاری بیشتر مدل طراحی خواهد بود که از نقطه‌نظر اقتصادی، برنامه‌ریزی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. بدین منظور، $W^{allowed}$ جهت نشان دادن آستانه تحمل مشتریان برای شارژ در ایستگاه شارژ و تسهیل استقرار دستگاه‌های شارژ، به‌کار گرفته شده است. به بیان دیگر، چنان‌چه زمان انتظار مشتری که یکی از فاکتورهای تاثیرگذار بر آسایش رانندگان است، بیش از مدت‌زمان مشخصی طول بکشد، مشتری ایستگاه شارژ را ترک خواهد کرد. با فرض مستقل بودن μ_q از آهنگ ورود خودروها، هرچه میانگین تعداد ورود خودروها افزایش یابد، صف طولانی‌تری تشکیل خواهد شد و در نتیجه میانگین مدت‌زمان انتظار مشتری در صف افزایش خواهد یافت. با در نظر گرفتن λ_k^{RH} به‌عنوان آهنگ ورود خودروها به ایستگاه شارژ k در ساعت اوج تردد، به صورت:

$$\lambda_k^{RH} = \max \left\{ \lambda_{k,t} = C \frac{f_t^{trip}}{\sum_{t \in T} f_t^{trip}} \sum_{k \in \Omega^K} f_{k,t} \quad \forall t \in T, \forall k \in \Omega^K \right\} \quad (7)$$

می‌توان ظرفیت ایستگاه شارژ را با فرض ورود خودروها به ایستگاه شارژ سریع براساس فرآیند پواسون با پارامتر λ_k^{RH} و توزیع نمایی مدت‌زمان خدمت‌دهی هر دستگاه شارژ، با استفاده از سیستم صف M/M/s به‌صورت مسئله بهینه‌سازی زیر مدل کرد [۱۴]:

$$\text{objective: } \min z_k \quad (8)$$

تحت قیود:

$$W_k^{RH} < W^{allowed} \quad (9)$$

$$W_k^{RH} = \frac{(z_k \rho_k^{RH})^{z_k} \rho_k^{RH}}{\lambda_k^{RH} (z_k!) (1 - \rho_k^{RH})^2} \pi_{k,0}^{RH} \quad (10)$$

که در آن $\pi_{k,0}^{RH}$ ، احتمال حدی نبود هیچ مشتری در ایستگاه شارژ سریع با جایگذاری t برای ساعت اوج تردد در رابطه $\pi_{k,0}(t)$ محاسبه می‌گردد:

$$\pi_{k,0}(t) = \left[\sum_{n=0}^{z_k-1} \frac{(z_k \rho_{k,t})^n}{n!} + \frac{(z_k \rho_{k,t})^{z_k}}{(z_k!) (1 - \rho_{k,t})} \right]^{-1} \quad (11)$$

$\rho_{k,t}$ و ρ_k^{RH} به‌ترتیب نشان‌دهنده، ضریب بهره‌وری هر دستگاه شارژ در زمان t و زمان اوج تردد می‌باشند. از آنجایی که ورود خودروها به ایستگاه شارژ بر اساس یک فرآیند پواسون غیرهمگن مدل شده است، آهنگ ورود مشتری‌ها، تابعی غیراحتمالی (قطعی) از زمان است. بنابراین $\rho_{k,t}$ که بیانگر درصد زمان مشغول به‌کار بودن سیستم است، نیز تابعی از زمان بوده و مقادیر آن در زمان‌های مختلف متفاوت است. مطابق رابطه (۱۲) توصیف می‌شود [۷]:

عبوری از گره ترافیکی k است. با فرض اینکه، حجم بالای جریان ترافیک نشان دهنده احتمال بالای خودروهای متقاضی دریافت شارژ است؛ میانگین ورود خودروها به هر ایستگاه شارژ متناسب با جریان ترافیکی مهارشده توسط آن ایستگاه در نظر گرفته می‌شود. پس، می‌توان تعداد متوسط خودروهای ورودی به هر ایستگاه شارژ k از مجموعه ایستگاه‌های شارژ سریع Ω^K در زمان t را مطابق [۱۴] به‌صورت رابطه (۶) بیان نمود:

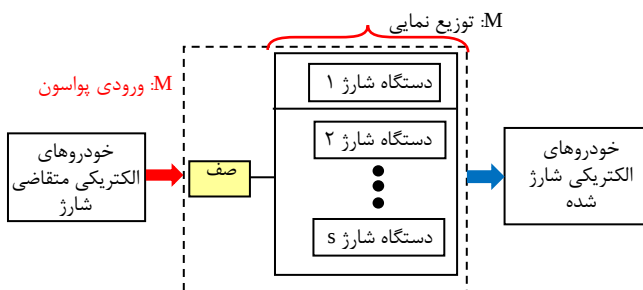
$$\lambda_{k,t} = C \frac{f_t^{trip}}{\sum_{t \in T} f_t^{trip}} \sum_{k \in \Omega^K} f_{k,t} \quad \forall t \in T, \forall k \in \Omega^K \quad (6)$$

f_t^{trip} ، نسبت سفر در زمان t می‌باشد که از طریق داده‌های ترافیکی شبکه در هر بازه زمانی حاصل می‌شود. C مجموع تعداد دفعات شارژ خودروهای الکتریکی در ایستگاه‌های شارژ منطقه تحت برنامه‌ریزی در افق زمانی T می‌باشد که می‌تواند توسط عوامل متعددی شامل: مقیاس خودرو الکتریکی در منطقه، نسبت آماری خودروهای الکتریکی، تناوب شارژ و غیره تخمین زده شود [۳، ۱۴].

صف، خط انتظاریست که ممکن است در یک بانک، اداره پست، یا یک فروشگاه با آن برخورد کنیم. در این مورد، کاربران خودروهای الکتریکی مشتریان یک ایستگاه شارژ می‌باشند و ممکن است به‌منظور شارژ باتری‌های خود مجبور به انتظار در یک ایستگاه شارژ شوند (شکل ۲) [۷].

شرایط زیر در یک ایستگاه شارژ سریع فرض شده است:

- در مدل پیشنهادی وسایل نقلیه مطابق فرآیند پواسون با میانگین $\lambda_{k,t}$ به یک ایستگاه شارژ وارد می‌شوند.
- تعداد z_k دستگاه شارژ یکسان در ایستگاه شارژ مورد مطالعه، تعیین خواهد شد.
- مدت زمان ارائه خدمت توسط دستگاه‌های شارژ از توزیع‌های مستقل نمایی با میانگین μ_q پیروی می‌کنند.
- وسایل نقلیه ورودی به هر ایستگاه تشکیل یک صف واحد می‌دهند و خودروی متقاضی دریافت شارژ با دستگاه شارژ بعدی آزاد موجود براساس قانون FIFO^{۱۸} شارژ می‌شود.



شکل (۲): مدل صف M/M/s در یک ایستگاه شارژ

فرضیات فوق امکان تطابق سرویس‌دهی شارژ به خودروهای الکتریکی در یک ایستگاه شارژ سریع را با نظریه صف M/M/s فراهم می‌سازند [۷، ۱۴].

با ضرب نرخ شارژ هر دستگاه شارژ (p^{FCS}) در تعداد متوسط دستگاه‌های شارژ مشغول به کار ($E[B_{k,t}]$)، می‌توان متوسط تقاضای توان هر ایستگاه شارژ کاندید ($E[P_{k,t}^{FCS}]$) را مطابق [۷، ۲۰] به صورت رابطه (۱۷) برآورد نمود:

$$E[P_{k,t}^{FCS}] = \frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q} p^{FCS} \quad (17)$$

۳- جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ

این مقاله بر برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه شارژ سریع در شبکه توزیع، با هدف حداقل‌سازی هزینه سالانه سرمایه‌گذاری و تلفات انرژی شبکه تمرکز می‌کند. مسئله حداقل‌سازی هزینه به صورت یک برنامه‌ریزی احتمالاتی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح، براساس برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی فرموله شده است.

۳-۱- تابع هدف

تابع هدف مسئله حداقل‌سازی مجموع هزینه سالانه سرمایه‌گذاری و تلفات شبکه توزیع در نظر گرفته شده است. بنابراین تابع هدف شامل دو بخش به شرح زیر می‌باشد.

- هزینه سرمایه‌گذاری برای احداث ایستگاه شارژ سریع شامل: (۱) c^{CH} ، هزینه مربوط به تجهیزات موردنیاز برای احداث ایستگاه شارژ سریع مانند ماشین‌آلات شارژ سریع و ترانسفورماتور و غیره. این بخش از هزینه مستقل از موقعیت جغرافیایی می‌باشد. (۲) c_k^{other} ، هزینه مربوط به کاربری از زمین و متناسب با تعداد دستگاه‌های شارژ موجود در ایستگاه شارژ سریع. (۳) c_k^F ، هزینه ثابت سرمایه‌گذاری غیرمرتبط با اندازه ایستگاه شارژ سریع می‌باشد. تابع هدف هزینه سرمایه‌گذاری به صورت رابطه زیر است:
- $$\min f_{inv} = \pi^{FCS} \sum_{k \in \Omega^k} \{u_k [c^{CH} z_k + c_k^{other} z_k + c_k^F]\} \quad (18)$$
- در رابطه (۱۸) π^{FCS} ، ضریب بازگشت سرمایه برای احداث ایستگاه شارژ سریع می‌باشد و مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$\pi^{FCS} = \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{n^{FCS}}}{(1+\varepsilon)^{n^{FCS}} - 1} \quad (19)$$

- هزینه سالیانه تلفات انرژی شبکه:

$$\min f_{lost} = c^E d^{annual} \left\{ \sum_{(i,j) \in \Omega^{DL}} \sum_{t \in T} [g_{i,j} (U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t} U_{j,t} \cos \theta_{ij,t})] \right\} \quad (20)$$

در رابطه فوق، d^{annual} تعداد روزهای سال، c^E هزینه انرژی الکتریکی، $g_{i,j}$ کدناکتانس بین فیدر i و j از مجموعه فیدرهای شبکه Ω^{DL} ، $U_{i,t}$ و $\theta_{ij,t}$ اندازه و زاویه ولتاژ در هر زمان را نشان می‌دهند.

$$\rho_{k,t} = \frac{\lambda_{k,t}}{z_k \mu_q} \quad (12)$$

در پروسه تعیین اندازه ایستگاه شارژ سریع، در یک جواب شدنی تعداد دستگاه‌های شارژ بایستی در قید (۱۳) نیز صدق کنند:

$$z_k^{\min} \leq z_k \leq z_k^{\max} \quad (13)$$

۲-۳- تقاضای شارژ ایستگاه شارژ سریع با استفاده از نظریه صف M/M/s

چنانچه نرخ شارژ دستگاه‌های شارژ (p^{FCS}) در حین فرآیند شارژ ثابت در نظر گرفته شود، با فرض $B_{k,t}$ به عنوان تعداد خودروهایی که در زمان t به صورت همزمان شارژ می‌شوند (دستگاه‌های شارژ در حال خدمت)، تقاضای ناشی از شارژ خودروهایی که در زمان t در سیستم صف ایستگاه شارژ k ام شارژ می‌شوند ($P_{k,t}^{FCS}$) را می‌توان به صورت رابطه (۱۴) بیان کرد [۲۰]:

$$P_{k,t}^{FCS} = B_{k,t} p^{FCS} \quad (14)$$

مطابق رابطه فوق، چنانچه توزیع احتمال $B_{k,t}$ را داشته باشیم، می‌توان تمام توصیفات آماری $P_{k,t}^{FCS}$ را استحصال نمود. از آنجایی که آهنگ ورود مشتری‌ها به صف ناهمگن است، مشخصه آماری $B_{k,t}$ متغیر با زمان خواهد بود [۲۰].

به منظور تعیین تعداد دستگاه‌های شارژ در حال خدمت، احتمال حالت حدی $\pi_{k,n}(t)$ (احتمال بودن n مشتری در سیستم در درازمدت) مورد نیاز است. مطابق [۱۹]، احتمال حالت حدی $\pi_{k,n}(t)$ که تعداد خودروهای الکتریکی موجود در سیستم صف M/M/s ایستگاه شارژ k در زمان t را نشان می‌دهد، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\pi_{k,n}(t) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q} \right)^n \frac{\pi_{k,0}(t)}{n!} & n < z_k \\ \left(\frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q} \right)^n \frac{\pi_{k,0}(t)}{z_k!} z_k^{z_k-n} & n \geq z_k \end{cases} \quad (15)$$

از آنجایی که n و z_k به ترتیب نشان‌دهنده تعداد خودروهای متقاضی دریافت شارژ و تعداد دستگاه‌های شارژ در ایستگاه شارژ سریع می‌باشند، تعداد دستگاه‌های شارژ در حال خدمت مطابق $\min(z_k, n)$ به دست می‌آید [۷]. در مدل صف M/M/s تعداد خودروهایی که به صورت هم‌زمان شارژ می‌شوند (تعداد دستگاه‌های شارژ در حال خدمت)، مطابق رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد:

$$B_{k,t} = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q} \right)^n \frac{P_{k,0}(t)}{n!} & n < z_k \\ \left(\frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q} \right)^{z_k} \frac{P_{k,0}(t)}{z_k! (1 - \rho_{k,t})} & n = z_k \end{cases} \quad (16)$$

۳-۲- قیود مساله

۳-۲-۱- قیود قطعی

معادلات پخش بار برای محاسبه متغیرهای خروجی سیستم توزیع، شامل فلوی عبوری از خطوط، اندازه و زاویه ولتاژ در هر شین، تلفات کل شبکه و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، روش پخش بار جاروب پس-رو-پیش‌رو برای حل مسئله پخش بار برای هر حالت از متغیرهای تصادفی ورودی به کار گرفته شده است.

$$P_{i,t} = P_{i,t}^D + \sum_{k \in \Omega_i} P_{k,t}^{FCS} + U_{i,t} \sum_{j \in N^D} U_{j,t} [G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}] \quad \forall i \in N^D, \forall t \in T \quad (21)$$

$$Q_{i,t} = Q_{i,t}^D + U_{i,t} \sum_{j \in N^D} U_{j,t} [G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}] \quad \forall i \in N^D, \forall t \in T \quad (22)$$

در روابط فوق، Ω_i مجموعه ایستگاه‌های شارژ سریع کاندید در شین i شبکه توزیع و N^D مجموعه شین‌های شبکه توزیع می‌باشند. $P_{i,t}^D$ و $Q_{i,t}^D$ توان اکتیو و راکتیو مصرفی متعارف شبکه در هر شین در زمان t می‌باشند که به صورت توزیع نرمال در نظر گرفته شده‌اند.

در مدل پیشنهادی تقاضای ایستگاه شارژ سریع به صورت شین PQ با مشخصه تصادفی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن ضریب بار ثابت واحد برای باتری خودروها [۱، ۲۴]، تقاضای توان خودروها مطابق روابطی که در بخش ۲-۳ تشریح گردید، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{k,t}^{FCS} = B_{k,t} P_{k,t}^{FCS} \quad (23)$$

$$Q_{k,t}^{FCS} = 0 \quad (24)$$

۳-۲-۲- قیود تصادفی

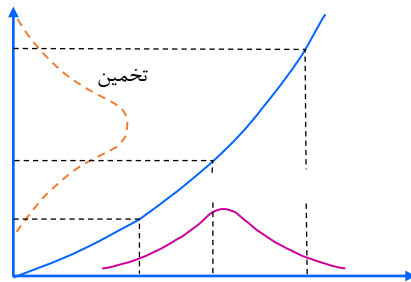
بر اساس مشخصه مکانیکی خطوط، توان عبوری از هادی قادر به تحمل حد حرارتی معینی است. بنابراین فلوی عبوری از خط باید کمتر از مقدار بیشینه توان مجاز خط باشد. همچنین در یک راه حل بهینه برای مسئله می‌بایست ولتاژ هر شین بین دامنه حداقل و حداکثر ولتاژ قرار گیرد. با این حال، این محدودیت‌ها یک محدودیت سخت^{۱۹} نیستند و می‌توانند در زمانی کوتاه و با درجه خاصی^{۲۰} نقض گردند؛ این مسئله را می‌توان به صورت خوبی توسط قیود تصادفی کنترل کرد [۲۵]. در روابط زیر α بازه اطمینان قیدهای تصادفی می‌باشد، $\text{Prob}(\cdot)$ به معنی احتمال ($\cdot$) است، S_{ij} و $S_{\max}$ به ترتیب، فلوی عبوری و حد بالای فلوی عبوری از فیدر ij می‌باشند.

$$\text{Prob}(S_{ij} \leq S_{\max}) \geq \alpha \quad \forall (ij) \in \Omega^{DL} \quad (25)$$

$$\text{Prob}(U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}) \geq \alpha \quad \forall i \in \Omega^{DL} \quad (26)$$

۴- روش برآورد نقطه‌ای

در مقاله حاضر از روش پخش بار احتمالاتی برآورد نقطه‌ای $2m+1$ [۱۶] جهت تسریع محاسبات و استخراج توابع احتمال فلوی خطوط و ولتاژ شین‌های شبکه توزیع بهره گرفته شده است. روش برآورد نقطه‌ای اطلاعات آماری حاصل از چند گشتاور مرکزی اول متغیرهای تصادفی ورودی مسئله را در R نقطه برای هر متغیر متمرکز می‌نماید که تغلیظ نامیده می‌شود. با استفاده از این نقاط و تابع F که متغیرهای ورودی و خروجی را به یکدیگر مرتبط می‌سازد، می‌توان اطلاعات مربوط به گشتاورهای متغیرهای تصادفی خروجی مسئله (Z) را



به دست آورد. تغلیظ $2m$ $(\rho_{l,r}, \omega_{l,r})$ از متغیر تصادفی ρ_l را می‌توان به صورت یک جفت متشکل از مکان $\rho_{l,r}$ و وزن $\omega_{l,r}$ توصیف نمود. مکان $\rho_{l,r}$ مقدار $2m$ متغیر ρ_l است که تابع F به ازای آن ارزیابی می‌گردد و وزن $\omega_{l,r}$ فاکتور وزنی است که اهمیت نسبی این ارزیابی را برای متغیر تصادفی خروجی محاسبه می‌کند. جزئیات مربوط روش برآورد نقطه‌ای در مرجع [۱۶] تشریح شده است (شکل ۳). چند گشتاور اول متغیرهای خروجی با بهره‌گیری از سری گرام-شارلیه [۱۷] جهت برآورد تابع احتمال متغیرهای خروجی مورد استفاده قرار گرفته است. $(\rho_{l,1}, \omega_{l,1}) \dots (\rho_{l,R}, \omega_{l,R})$

شکل (۳): روش برآورد نقطه‌ای [۱۶]

۵- معیارهای غلبه احتمالاتی

در این پژوهش، حداقل‌سازی هزینه سالانه سرمایه‌گذاری و تلفات شبکه توزیع، اهداف اصلی در برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ خودرو الکتریکی در نظر شده است. با توجه به مشخصه احتمالی بار شبکه، تلفات شبکه نیز دارای مشخصه احتمالی خواهد بود، لذا یافتن راه حل بهینه‌ای که اهداف مورد نظر طراحی (برازندگی هر راه حل ممکن) را بهینه سازد، نیازمند توسعه روشی برای ایجاد رابطه ترتیبی بین دو توزیع احتمال خواهد بود. در این بخش، سه معیار غلبه احتمالاتی برای مقایسه گزینه‌های تحت عدم قطعیت معرفی و تشریح خواهند شد.

۵-۱- روش میانگین-واریانس

اولین روش تصمیم‌گیری مورد بحث، رایج‌ترین روش انتخاب تحت عدم قطعیت می‌باشد. دو طرح A و B با میانگین μ_A و μ_B و انحراف

- اگر $T_l \leq r_{AB} \leq 1 - T_l$ و A و B برابرند.

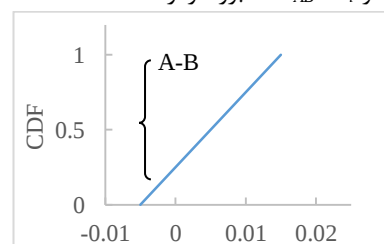
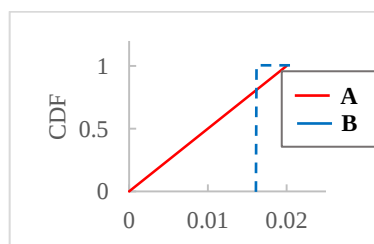
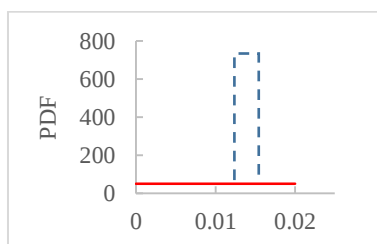
تصمیم‌گیری در باب برتری نسبی دو طرح A و B ، نیازمند تعیین آستانه $T_l \in [0, 0.5]$ است. در بسیاری از مطالعات $T_l = 0.3$ نتایج قابل‌قبولی از نقطه‌نظر عملی فراهم می‌نماید.

برای مثال توابع چگالی احتمال ($PDF^{(2)}$) دو متغیر A و B ، (سمت چپ) و توابع توزیع تجمعی مربوطه در (مرکز) شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج استفاده از الگوریتم مرتب‌سازی ارزیابی برتری در (سمت راست) شکل ۴ نشان داده شده است. تابع توزیع تجمعی اختلاف دو متغیر تصادفی نشان می‌دهد که متغیر ارزیابی برتری احتمالی برابر: $r_{AB} = P(A > B) = 1 - F_{\Delta_{AB}}(0) = 0.8$ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که $A > B$.

۶- روند برنامه‌ریزی

گام‌های اساسی در روند برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع به شرح زیر است (شکل ۵):

- تخصیص ترافیک براساس مدل تعادل کاربر. در این مرحله داده‌های مربوط به جریان ترافیک به‌دست می‌آید.
- گره‌های مشترک بین شبکه توزیع و ترافیک به‌عنوان مکان‌های کاندید برای احداث ایستگاه شارژ انتخاب می‌شوند. تمام طرح‌های ممکن برای احداث ایستگاه شارژ سریع براساس مکان‌های کاندید تعیین می‌شود. مطابق مدل سیستم صف فرموله شده در روابط (۸)–(۱۳) حداقل تعداد دستگاه‌های شارژ در هر ایستگاه شارژ سریع محاسبه می‌شود. در این مرحله ظرفیت هر ایستگاه شارژ سریع در هر طرح ممکن تعیین می‌شود.
- تابع احتمال تقاضای شارژ ایستگاه‌های شارژ سریع کاندید در هر زمان و در هر طرح ممکن مطابق روابط (۱۴) و (۱۶) تخمین زده می‌شوند.
- برنامه‌ریزی جایابی بهینه ایستگاه شارژ سریع تحت عدم قطعیت. به‌منظور در نظر گرفتن تاثیر ایستگاه شارژ سریع بر محدودیت‌های شبکه توزیع از روش برآورد نقطه‌ای به‌همراه سری گرام-شارلیه در هر طرح ممکن استفاده می‌شود.



شکل (۴): مقایسه بین دو تابع توزیع احتمال و تابع توزیع تجمعی [۲۷]

معیار σ_A و σ_B را در نظر بگیرید، باتوجه به معیار میانگین-واریانس در یک مسئله حداکثرسازی، طرح A بر طرح B غلبه می‌کند، اگر:

$$\mu_A \geq \mu_B \quad (27)$$

$$\sigma_A \leq \sigma_B \quad (28)$$

در مدل میانگین-واریانس [۲۶]، میانگین به‌عنوان معیاری از برازندگی و واریانس به‌عنوان معیاری از ریسک می‌باشد. در روابط فوق چنان‌چه رابطه (۲۷) با نامساوی برقرار گردد، آن‌گاه رابطه (۲۸) کفایت تنها با مساوی برقرار شود و برعکس. اگر هر یک از طرح‌ها فقط در یکی از این دو رابطه فوق صادق باشد، طرح A و B نسبت به یک‌دیگر نامغلوب خواهند بود.

۵-۲- روش غلبه تصادفی

در این روش به‌جای استفاده از میانگین و واریانس از تابع توزیع برازندگی استفاده می‌گردد، از این‌رو، معیاری وسیع‌تر برای تعیین ریسک و برازندگی می‌باشد. در روش غلبه تصادفی نوع اول [۲۶]، فرض بر این است که سرمایه‌گذاران برازندگی بیشتر را به کمتر ترجیح می‌دهند. فرض کنید دو تابع توزیع تجمعی ($CDF^{(1)}$) دلخواه $F_A(x)$ و $F_B(x)$ وجود دارد. طرح A بر طرح B دارای غلبه تصادفی نوع اول است، اگر و تنها اگر داشته باشیم:

$$F_A(x) \leq F_B(x) \quad (29)$$

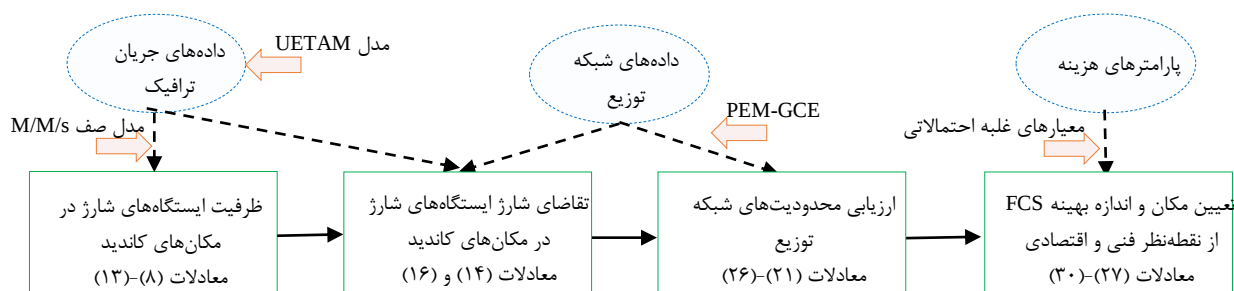
۵-۳- ارزیابی برتری احتمالاتی

دو متغیر تصادفی دلخواه A و B در نظر بگیرید. برای محقق ساختن متغیر بزرگتر، اختلاف دو متغیر تصادفی ($\Delta_{AB} = A - B$) را در نظر بگیرید. احتمال این که A بزرگتر از B است، مطابق روش ارزیابی برتری [۲۷]، طبق رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود:

$$r_{AB} = 1 - F_{\Delta_{AB}}(0) \quad (30)$$

در رابطه فوق $F_{\Delta_{AB}}$ ، تابع توزیع تجمعی Δ_{AB} است. رابطه بین A و B با مقایسه r_{AB} به محدوده آستانه مقارن حول 0.5 $[T_l, 1 - T_l]$ ، اتوجه به شرایط زیر حاصل می‌شود:

- اگر $r_{AB} \geq 1 - T_l$ ، A بزرگتر از B است.
- اگر $r_{AB} \leq T_l$ ، B بزرگتر از A است.



شکل (۵): روند برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع

- تاثیر عدم قطعیت‌ها در انتخاب طرح نهایی با معیارهای غلبه احتمالاتی مطابق روابط (۲۷)–(۳۰) بررسی می‌شود. مجموعه طرح‌های نامغلوب که تمام محدودیت‌های شبکه را ضمن در نظر گرفتن ریسک هر طرح، با کمترین هزینه برآورده سازند، به عنوان طرح‌های نهایی انتخاب می‌گردند.

۷- مطالعه موردی

۷-۱- توصیف مورد مطالعاتی

برای پیاده‌سازی مفاهیم پیشنهادی، بررسی و ارزیابی نتایج، شبکه ترافیک معروف موسوم به سوفالز^{۳۳} با توجه به در دسترس بودن اطلاعات مربوط به آن انتخاب شده است. شبکه سوفالز دارای ۲۴ ناحیه و ۵۵۲ زوج مبدأ-مقصد می‌باشد. اطلاعات مربوط به ماتریس تقاضا مطابق [۲۸] می‌باشد (شکل ۶). شبکه توزیع ۱۲/۶۶ کیلوولت ۳۳ شین IEEE [۲۹] به عنوان شبکه توزیع متناظر آن در نظر گرفته شده است (شکل ۷).

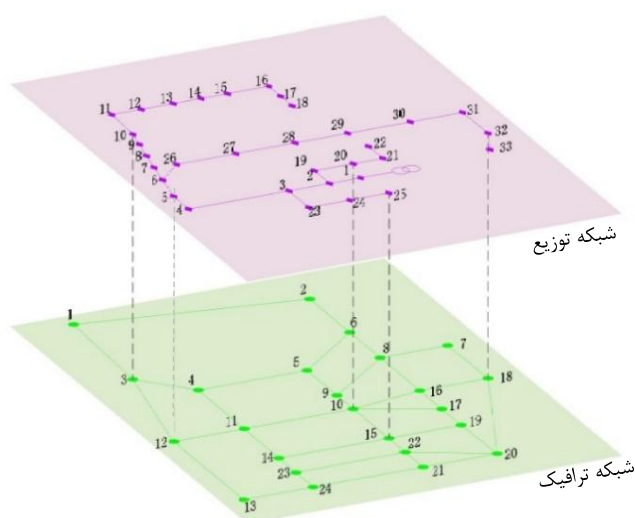


زمان (h)

شکل (۶): پروفیل ساعتی نرمالیزه شده جریان ترافیک ماتریس O-D

در این مقاله، مطابق استاندارد IEC 61851-1 سطح شارژ ۳ به دلیل ترجیح رانندگان در استفاده از سطح توان شارژ بالا در ایستگاه‌های شارژ در نظر گرفته شده است.

باتوجه به شکل ۷، گره‌های مشترک بین شبکه توزیع و ترافیک به عنوان کاندید مکان احداث ایستگاه شارژ سریع در نظر گرفته شده‌اند. ظرفیت باتری خودرو (C_{Bat})، ۲۰ kWh، p^{FCS} برابر با ۴۴ kW و حداکثر انحراف ولتاژ مجاز ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. سایر اطلاعات مورد نیاز در جدول‌های ۱ و ۲ خلاصه شده است.



شکل (۷): شبکه تست توزیع و ترافیک. (لینک‌های خاکستری نمایان‌گر اشتراک جغرافیایی گره‌های شبکه توزیع و ترافیک می‌باشد).

جدول (۱): هزینه‌های ساخت ایستگاه‌های شارژ سریع

FCS های کاندید	۱	۲	۳	۴	۵
گره شبکه ترافیک	۳	۱۰	۱۲	۱۵	۱۸
شین شبکه توزیع	۱۰	۲۰	۵	۲۵	۳۲
c_k^{CH} [۱۰۴ US\$]	۸	۸	۸	۸	۸
c_k^{other} [۱۰۴ US\$]	۳/۲	۴/۴	۴/۱	۳/۴	۳/۳۷
c_k^F [۱۰۴ US\$]	۳۲	۴۲/۱	۴۴/۴	۳۴	۳۳

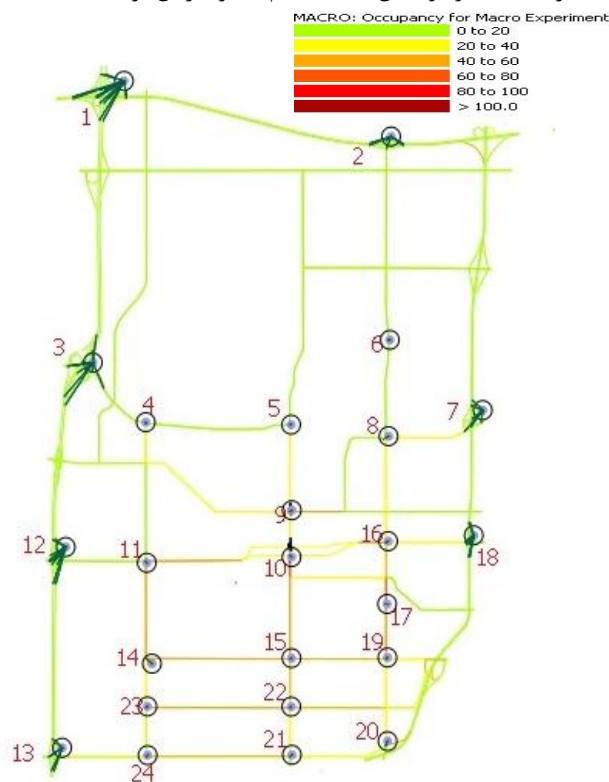
جدول (۲): مقادیر پارامترهای مدل‌سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
z^{max}	۱۰	z^{min}	۶
C	۸۵۰	$W^{allowed}$	۵ دقیقه
ε	۰/۱	n^{FCS}	۲۰ سال
c^E	۵۰ US\$/MWh	α	۹۹/۸۷٪

مطالعات عددی در محیط نرم‌افزار MATLAB با استفاده از رایانه شخصی ۶۴ بیتی با ۶ گیگابایت RAM و CPU-Core i 7 پیاده‌سازی شده و مورد آزمایش قرار گرفته است.

۷-۲- مطالعات عددی

باتوجه به داده‌های ترافیکی ماتریس O-D در هر دوره زمانی (ساعت) برای شبکه سوفالز توزیع جریان ترافیک در مسیرهای شبکه براساس مدل تخصیص ترافیک برمبنای تعادل کاربر به دست می‌آید. در شکل ۸ خروجی حاصل از نرم‌افزار Aimsun در ساعت ۱۷ نشان داده شده است. رنگ‌های تیره‌تر نشان‌دهنده حجم بالاتر جریان ترافیک است.



شکل (۸): نمایش خروجی شبکه حاصل از اجرای برنامه در ساعت ۱۷

آهنگ ورود خودروهای الکتریکی به هر ایستگاه شارژ سریع در هر دوره زمانی مطابق رابطه (۶) براساس مکان‌های کاندید، برای هر طرح ممکن ($32=2^5$) به دست می‌آید و ظرفیت ایستگاه شارژ سریع در تمامی طرح‌های ممکن تعیین می‌شود. به منظور بررسی محدودیت‌های شبکه توزیع در حضور خودرو الکتریکی، ابتدا مدل تشریح شده در بخش قبل، بدون در نظر گرفتن مشخصه احتمالی بار مصرفی شبکه تحت یک مدل برنامه‌ریزی قطعی، در سناریوی اول اجرا می‌شود و با نتایج حاصل از مدل احتمالی در سناریوی دوم مقایسه می‌گردد. سپس مدل تکمیلی با در نظر گرفتن تاثیر عدم قطعیت‌های مربوط به تابع هدف مساله در انتخاب طرح نهایی در سناریوی سوم ارائه شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۷-۲-۱- سناریوی اول: برنامه‌ریزی قطعی

در این بخش بدون در نظر گرفتن تاثیر عدم قطعیت‌ها، مقدار میانگین بار مصرفی ایستگاه شارژ (رابطه (۱۷)) و میانگین بار مصرفی متعارف شبکه به عنوان ورودی مسئله برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع به کار

گرفته شده و مسئله به صورت قطعی مدل شده است. طرح بهینه با کمترین هزینه از میان طرح‌های شدنی^{۲۴} انتخاب شده است. هزینه سرمایه‌گذاری در این مورد برابر $512981/59$ US\$ می‌باشد. نتایج مربوط به اندازه و مکان ایستگاه‌های شارژ سریع در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول (۳): نتایج حاصل از برنامه‌ریزی در سناریو اول

اندازه	مکان (شماره شین)
۶	۱۰
۹	۵
۱۰	۳۲
$512981/59$ US\$ = هزینه کل	

۷-۲-۲- سناریوی دوم: برنامه‌ریزی احتمالی بدون لحاظ

عدم قطعیت در تصمیم‌گیری

در این مورد، محدودیت‌های شبکه توزیع در اثر بار ناشی از شارژ خودروها با بهره‌گیری از ابزار پخش بار احتمالاتی در چارچوب برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی ارزیابی می‌گردد. به این ترتیب که ابتدا ظرفیت و تابع احتمال بار مصرفی ایستگاه شارژ سریع در هر ساعت برای هر یک از ۳۲ طرح ممکن تعیین شده و قیود مسئله با استفاده از پخش بار احتمالاتی برآورد نقطه‌ای به همراه سری گرام-شارلیه کنترل می‌شود. مقادیر هزینه مربوط به مجموعه طرح‌های شدنی به همراه مکان و ظرفیت ایستگاه شارژ سریع در هر طرح در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول (۴): مکان و اندازه ایستگاه‌های شارژ سریع در طرح‌های شدنی

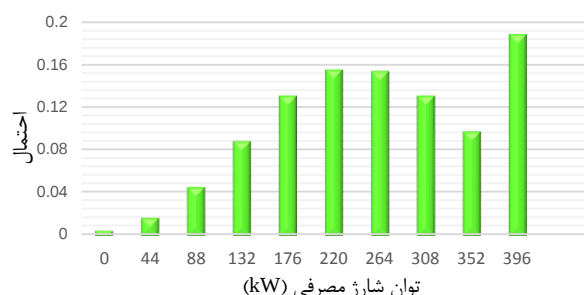
سناریوی دوم					
شین ۳۲	شین ۲۵	شین ۵	شین ۲۰	شین ۱۰	شماره طرح
۶	۷	۶	۸	۰	۱
۸	۹	۸	۰	۰	۲
۷	۸	۰	۱۰	۰	۳
۷	۰	۷	۱۰	۰	۴
۰	۸	۷	۱۰	۰	۵

جدول (۵): مقادیر میانگین و واریانس طرح‌های شدنی سناریوی دوم

واریانس	میانگین هزینه	شماره طرح
۲۸۱۷۶۰/۵	۵۹۵۲۲۸/۱۲	۱
۴۸۶۶۲۶/۱۷	۵۱۳۷۰۵/۱۱	۲
۳۰۷۷۶۲/۱۲	۵۱۳۷۱۰/۰۲	۳
۳۲۳۴۷۵/۶۵	۵۱۸۳۳۱/۷۲	۴
۱۰۹۶۸۰/۶۶	۵۳۱۴۲۰/۵۳	۵

جهت سنجش صحت برنامه‌نویسی، مطالعه پخش بار ارائه شده با استفاده از روش برآورد نقطه‌ای به همراه سری گرام-شارلیه با روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS^{25}) با 10^5 تکرار؛ در شین ۵ در ساعت دهم از طرح ۲ مقایسه گردید. روش مونت کارلو علی‌رغم نیاز به زمان زیاد، به دلیل دقت بالا به عنوان معیاری برای سنجش روش‌های ارائه

جهت اطمینان از صحت فرمول‌بندی ارائه شده برای توزیع احتمال بار ایستگاه شارژ (معادله (۱۴)) می‌بایست، ابتدا جمع تابع احتمال هر ایستگاه شارژ سریع در هر زمان یک بوده و از طرف دیگر میانگین آن برابر $E[P_{k,t}^{FCS}]$ باشد. که هر دو شرط فوق برای هر ایستگاه شارژ سریع در هر زمان و در تمام راه‌حل‌های ممکن برقرار است.



شکل (۱۰): توزیع احتمال تقاضای توان ایستگاه شارژ سریع کاندید ۴ در ساعت ۱۸ از طرح ۲

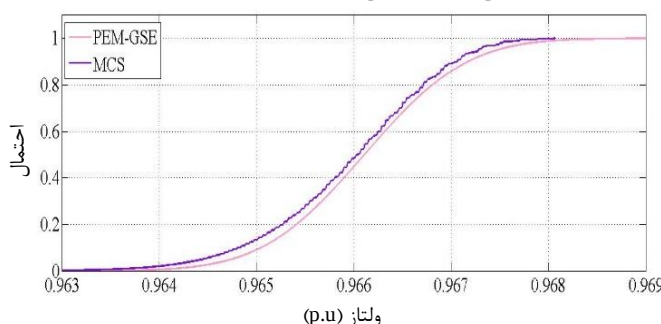
۲-۲-۳- سناریوی سوم: برنامه‌ریزی احتمالی بالحاظ عدم قطعیت در تصمیم‌گیری

در این مقاله از رویکردهای احتمالاتی برای گسترش عدم قطعیت‌های مسئله بر شاخص تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده (تابع هدف که نشان‌دهنده برآوردی از هر راه‌حل ممکن می‌باشد) بهره گرفته شده است. با نگاهی دوباره به جدول ۵ می‌توان دریافت که گرچه میانگین هزینه در طرح ۲ از کمترین مقدار نسبت به سایر طرح‌ها برخوردار است، در عین حال بالاترین مقدار مربوط به واریانس نیز به همین طرح تعلق دارد که حاکی از ریسک بالای طرح ۲ می‌باشد. بدین منظور در این بخش، با در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت‌ها در تصمیم‌گیری نهایی، روش‌های مقایسه دوه‌دو که در بخش ۴ تشریح گردید جهت انتخاب بهینه از میان طرح‌های شدنی که هر یک دارای توزیع احتمال دلخواه مخصوص به خود هستند، به کار گرفته شده و نتایج حاصل در جدول ۷ خلاصه شده است. باتوجه به نتایج حاصل از سناریوی سوم، می‌توان اظهار داشت که در فرآیند سرمایه‌گذاری برای احداث ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی، عدم قطعیت‌های مربوط به مسئله با تشکیل مجموعه‌ای از طرح‌های نامغلوب دامنه انتخاب سرمایه‌گذار را گسترش داده و فرآیند تصمیم‌گیری فرد را تحت تأثیر قرار می‌دهند. پس از تشکیل مجموعه نامغلوب سرمایه‌گذار می‌تواند با در نظر گرفتن معیارهای انتزاعی و درجه ریسک‌پذیری، به رتبه‌بندی طرح‌های نامغلوب پرداخته و طرح نهایی را انتخاب نماید.

جدول (۷): نتایج حاصل از برنامه‌ریزی در سناریوی دوم

مجموعه طرح‌های نامغلوب	رویکرد
۲۳.۵	میانگین-واریانس
۲.۳	غلبه تصادفی
۲.۳	ارزیابی برتری

شده در حوزه پخش بار احتمالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، خطای روش برآورد نقطه‌ای به همراه سری گرام-شارلیه در عین زمان محاسبه بسیار کم بوده و روش ارائه شده از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.



شکل (۹): مقایسه تابع توزیع تجمعی ولتاژ شین ۵ در ساعت دهم در طرح ۲

به منظور محاسبه مشخصه‌های آماری هزینه هر طرح از ویژگی انباشتک‌های متغیر تصادفی بهره گرفته شده است [۱۷]. به این ترتیب که ابتدا، مقادیر مربوط به گشتاورهای خام تلفات شبکه در هر ساعت با استفاده از روش برآورد نقطه‌ای محاسبه می‌گردد. سپس باتوجه به روابط میان انباشتک و گشتاورهای یک متغیر تصادفی، انباشتک‌های هزینه هر طرح با استفاده از رابطه خطی تابع هدف مسئله، محاسبه می‌شود (جدول ۵).

همان‌طوری که قبلاً بحث گردید، با توجه به مشخصه احتمالی بار شبکه، تلفات توان شبکه نیز دارای مشخصه احتمالی خواهد بود، اما در این مورد، از مقدار میانگین تلفات حاصل از اجرای پخش بار احتمالاتی در محاسبه تابع هدف و معیار انتخاب طرح نهایی استفاده شده است. بدین ترتیب طرح شماره ۲ با کمترین مقدار میانگین هزینه، $US\$ 513705/11$ به عنوان طرح نهایی بهینه انتخاب خواهد شد (جدول ۶).

جدول (۶): نتایج حاصل از برنامه‌ریزی در سناریوی دوم

اندازه	مکان (شماره شین)
۸	۵
۹	۲۵
۸	۳۲

$US\$ 513705/11188$ - هزینه کل

با توجه به نتایج حاصل از طرح‌های شدنی در برنامه‌ریزی احتمالی (جدول ۴)، طرح بهینه سناریوی اول حتی در میان طرح‌های شدنی سناریوی دوم قرار نگرفته است در نتیجه می‌توان اظهار داشت، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مسئله، هزینه طراحی به میزان 0.14% افزایش یافته است.

مطابق آنچه در بخش ۲ ذکر شد ظرفیت و منحنی بار ایستگاه شارژ سریع با استفاده از نتایج حاصل از تخصیص ترافیک و بهره‌گیری از نظریه صف، به‌آزای هر مجموعه جواب ممکن برای احداث ایستگاه شارژ سریع محاسبه می‌شود. به عنوان مثال پروفیل بار ایستگاه شارژ کاندید ۴ از طرح ۲، در ساعت ۱۸ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله رویکردی احتمالی برای جابجایی بهینه ایستگاه‌های شارژ خودرو الکتریکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به تقاضای شارژ ایستگاه شارژ سریع، از دیدگاه شبکه ترافیک و شبکه توزیع ضمن حفظ اصل سرعت و سادگی محاسبات ارائه شده است. به منظور شناسایی چالش‌های حضور خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع ضروری است که در اولین گام منحنی بار شارژ آن‌ها تخمین زده شود. از آنجایی که الگوی شارژ مورد نیاز این خودروها وابسته به رفتار ترافیکی مالکان آن‌ها می‌باشد، از تئوری صف جهت تعیین ظرفیت و تقاضای بار ۲۴ ساعته ایستگاه‌های شارژ بهره گرفته شده است که در آن متوسط ورود خودروها براساس جریان ترافیک تعادلی فرمول‌بندی شده است. به منظور ارزیابی محدودیت‌های فنی شبکه توزیع در چارچوب برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی، روش پخش‌بار احتمالاتی برآورد نقطه‌ای به همراه سری گرام-شارلیه ارائه شده است. امکان‌سنجی روش پیشنهادی توسط شبکه‌های تست در حالات مختلف نشان داده شده و تایید گردید. در سناریو اول، شین‌های ۵، ۱۰ و ۳۲ برای نصب ایستگاه شارژ انتخاب شدند و هزینه سرمایه‌گذاری کل در این مورد برابر $512981/59$ US\$ بوده است. در سناریوی دوم، محدودیت‌های شبکه توزیع در اثر بار ناشی از شارژ خودروها با بهره‌گیری از ابزار پخش‌بار احتمالاتی در چارچوب برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی ارزیابی گردید. در این حالت، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مسئله، هزینه طراحی به میزان $0/14\%$ افزایش یافت. در سناریو سوم، برنامه‌ریزی احتمالی با در نظر گرفتن عدم قطعیت تصمیم‌گیری و با کمک طرح‌های غلبه احتمالاتی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از تاثیر مستقیم عدم قطعیت‌ها بر عملکرد طراحی ایستگاه شارژ سریع دارد. به‌طوریکه در نظر گرفتن مقدار میانگین بار مصرفی سیستم در روش قطعی، به یک راه‌حل ناشدنی با نقض محدودیت‌های شبکه منجر گردید. همچنین مقایسه توابع احتمال اهداف طراحی در روش‌های غلبه احتمالاتی، دامنه انتخاب سرمایه‌گذار را از طرح با کمترین مقدار میانگین هزینه به مجموعه‌ای از طرح‌های نامغلوب گسترش می‌دهد. تا وی بتواند با اطمینان از عدم برتری طرح‌های نامغلوب از نظر ریسک و هزینه، براساس معیارهای انتزاعی طرح بهینه را انتخاب نماید.

مراجع

- [3] Xiang, Y., Liu J., Li, R., Li, F., Gu, C., and Tang, S., "Economic Planning of Electric Vehicle Charging Stations Considering Traffic Constraints and Load Profile Templates", *Applied Energy*, Vol. 178, pp. 647-659, 2016
- [4] Vlachogiannis, J.G., "Probabilistic Constrained Load Flow Considering Integration of Wind Power Generation and Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No.4, pp. 1808-1817, 2009.
- [5] Li, G., and Zhang, X.-P., "Modeling of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging Demand In Probabilistic Power Flow Calculations", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No.1, pp. 492-499, 2012.
- [6] Arias, M.B., Kim, M., and Bae, S.: "Prediction of electric vehicle charging-power demand in realistic urban traffic networks", *Applied Energy*, Vol. 195, pp. 738-753, 2017.
- [7] Bae, S., and Kwasinski, A., "Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No.1, pp. 394-403, 2012.
- [8] Baouche, F., Billot R., Trigui, R., and El Faouzi, N.-E., "Efficient Allocation of Electric Vehicles Charging Stations: Optimization Model and Application to a Dense Urban Network", *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol. 6, No.3, pp. 33-43, 2014.
- [9] Lam, A.Y., Leung Y.-W., and Chu, X., "Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No.6, pp. 2846-2856, 2014.
- [10] Dong, X., Mu, Y., Jia, H., Wu, J., and Yu, X.: "Planning of Fast EV Charging Stations on a Round Freeway", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 7, No.4, pp. 1452-1461, 2016.
- [11] Liu, Z., Wen, F., and Ledwich, G., "Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No.1, pp. 102-110, 2013.
- [12] Wang, G., Xu, Z., Wen, F., and Wong, K.P., "Traffic-Constrained Multiobjective Planning of Electric-Vehicle Charging Stations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No.4, pp. 2363-2372, 2013.
- [13] Bai, X., Sun, Q., Liu, L., Liu, F., Ji, X., and Hardy, J.: "Multi-Objective Planning for Electric Vehicle Charging Stations Considering TOU Price", 3rd IEEE International Conference on Cybernetics, pp. 1-6, Exeter UK, 2017.
- [14] Yao, W., Zhao, J., Wen, F., Dong, Z., Xue, Y., Xu, Y., and Meng, K., "A Multi-objective Collaborative Planning Strategy for Integrated Power Distribution and Electric Vehicle Charging Systems", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 29, No.4, pp. 1811-1821, 2014.
- [15] Beckmann, M., McGuire, C., and Winsten, C.B., "Studies in the Economics of Transportation", Santa Monica, CA: RAND Corporation 1956.
- [16] Morales J.M., and Perez-Ruiz, J., "Point Estimate Schemes to Solve the Probabilistic Power Flow", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No.4, pp. 1594-1601, 2007.
- [17] Zhang, P., and Lee, S.T., "Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulants
- [1] Hafez, O., and Bhattacharya, K., "Queuing Analysis Based PEV Load Modeling Considering Battery Charging Behavior and Their Impact on Distribution System Operation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. PP, No.99, pp. 1-1, 2016.
- [2] Pazouki, S., Mohsenzadeh, A., Ardalan, S., and Haghifam, M.-R., "Simultaneous Planning of PEV Charging Stations and DGs Considering Financial, Technical, and Environmental Effects", *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 38, No.3, pp. 238-245, 2015.

N^D : مجموعه شین‌های شبکه توزیع

پارامترها

C : مجموع تعداد دفعات شارژ خودروهای الکتریکی در ایستگاه‌های

شارژ (تعداد/روز)

t^{trip} : نسبت سفر در زمان t

$W^{allowed}$: حداکثر زمان انتظار مجاز

μ_q : آهنگ خدمت‌دهی دستگاه‌های شارژ

z_k^{max} و z_k^{min} : محدودیت تعداد دستگاه‌های شارژ ایستگاه شارژ سریع

S_{ij} : فلو عبوری از فیدر ij

p^{FCS} : نرخ شارژ دستگاه‌های شارژ

c^{CH} : هزینه مربوط به تجهیزات موردنیاز برای احداث ایستگاه شارژ

سریع

c_k^{other} : هزینه مربوط به کاربری از زمین

c_k^F : هزینه ثابت سرمایه‌گذاری غیرمرتبط با اندازه ایستگاه شارژ سریع

π^{FCS} : ضریب بازگشت سرمایه برای احداث ایستگاه شارژ سریع

n^{FCS} : طول عمر ایستگاه شارژ

ε : نرخ بهره

d^{annual} : تعداد روزهای سال

c^E : هزینه انرژی الکتریکی

$g_{i,j}$: کنداکتانس بین فیدر i و j

$Q_{i,t}^D$ و $P_{i,t}^D$: تقاضای توان اکتیو و راکتیو در هر شین i در زمان t

α : بازه اطمینان روش قیادهای تصادفی

S_{max} : حد بالای فلو عبوری از فیدر ij

U_{min} و U_{max} : محدودیت ولتاژ هر شین

متغیرها

$p_{mn}(\omega)$: تابع زمان سفر-حجم کمان mn

f_q^{rs} : مقدار حجم ترافیک در مسیر q بین مبدا r و مقصد s

q_{rs} : میزان تقاضای سفر بین مبدا r و مقصد s

x_{mn} : حجم ترافیک در کمان mn

$f_{k,t}$: جریان ترافیکی مهارشده توسط ایستگاه شارژ سریع کاندید k ام

در زمان t

$\delta_{mn,q}^{rs}$: متغیر ضمنی صفر و یک (اگر کمان mn جزئی از مسیر q بین

مبدا r و مقصد s باشد، یک و در غیر این صورت صفر)

$\delta_{k,q}^{rs}$: متغیر ضمنی صفر و یک (اگر جریان ترافیک بین جفت rs از

ماتریس مبدا-مقصد توسط ایستگاه شارژ k ام مهار گردد، یک و در غیر

این صورت صفر)

u_k : متغیر تصمیم‌گیری مربوط به احداث و یا عدم احداث ایستگاه

شارژ سریع k ام

λ_k^{RH} و $\lambda_{k,t}$: آهنگ ورود خودروها به ایستگاه شارژ سریع k ام در زمان

and Gram-Charlier Expansion", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No.1, pp. 676-682, 2004.

[18] Wardrop, J.G., "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research", vol. 1, pp. 325-362, 1952.

[۱۹] مدرس، میم، تیموری، الف، نظریه صف، چاپ ششم، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۳.

[20] Alizadeh, M., Scaglione, A., Davies, J., and Kurani, K.S., "A Scalable Stochastic Model for the Electricity Demand of Electric and Plug-In Hybrid Vehicles", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No.2, pp. 848-860, 2014.

[21] Tehrani, N.H., and Wang, P., "Probabilistic Estimation of Plug-In Electric Vehicles Charging Load Profile", Electric Power Systems Research, Vol. 124, pp. 133-143, 2015.

[22] He, F., Wu, D., Yin, Y., and Guan, Y., "Optimal Deployment of Public Charging Stations for Plug-In Hybrid Electric Vehicles", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 47, pp. 87-101, 2013.

[23] "Aimsun's macroscopic modelling manual." version. 6, 1st ed: TSS-Transport Simulation Systems, January 2010.

[24] Garcia-Valle, R., and Vlachogiannis, J.G., "Letter to the editor: electric vehicle demand model for load flow studies", electric vehicle demand model for load flow studies, Vol. 37, pp. 577-582, 2009.

[25] Liu, Z., Wen, F., and Ledwich, G., "Optimal Siting and Sizing of Distributed Generators in Distribution Systems Considering Uncertainties", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 26, No.4, pp. 2541-2551, 2011.

[26] Graves, S.B., and Ringuest, J.L., "Probabilistic Dominance Criteria for Comparing Uncertain Alternatives: A Tutorial", Omega, Vol. 37, pp. 346-357, 2009.

[27] Baraldi, P., Zio, E., and Compare, M., "A Method for Ranking Components Importance in Presence of Epistemic Uncertainties", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 22, No.2, pp. 582-592, 2009.

[28] H. Bar Gera. Transportation network test problems. Available: www.bgu.ac.il/~bargera/tnp/.

[29] Baran, M.E., and Wu, F.F., "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.2, pp. 1401-1407, 1989

فهرست علائم و اختصارات

مجموعه‌ها

N^T : مجموعه گره‌های شبکه ترافیک

Ω^{TL} : مجموعه کمان‌ها (مسیرهای) شبکه ترافیک

Q_{rs} : مجموعه مسیرهای بین مبدا و مقصد rs از ماتریس OD

T : مجموعه بازه زمانی

Ω^K : مجموعه ایستگاه‌های شارژ سریع کاندید

Ω^{DL} : مجموعه فیدرهای شبکه توزیع

Ω_i : مجموعه FCS‌های کاندید در شین i شبکه توزیع

t و اوج تردد

W_k^{RH} : میانگین مدت زمان انتظار در ایستگاه شارژ سریع k ام در زمان

اوج تردد

z_k : تعداد دستگاه‌های شارژ در ایستگاه شارژ سریع k ام

$\rho_{k,t}$ و ρ_k^{RH} : ضریب بهره‌وری هر دستگاه شارژ ایستگاه شارژ سریع

k ام در زمان t و زمان اوج تردد

$\pi_{k,0}(t)$ و $\pi_{k,0}^{RH}$: احتمال حدی نبود هیچ مشتری در ایستگاه شارژ

سریع k ام در زمان t و زمان اوج تردد

$\pi_{k,n}(t)$: احتمال حدی وجود n مشتری در ایستگاه شارژ سریع k ام در

زمان t

$B_{k,t}$ و $E[B_{k,t}]$: تعداد دستگاه‌های شارژ مشغول به کار و مقدار

میانگین آن

$P_{k,t}^{FCS}$ و $E[P_{k,t}^{FCS}]$: تقاضای توان هر ایستگاه شارژ کاندید k ام و مقدار

میانگین آن.

$U_{i,t}$ و $U_{j,t}$: اندازه ولتاژ شین i و j در زمان t

$\theta_{ij,t}$: انحراف زاویه ولتاژ شین i و j در زمان t

زیر نویس‌ها

¹Electric Vehicles

²All Electric Range

³Fast Charging Station

⁴State of Charge

⁵Queuing Theory

⁶Plug-in Electric Vehicle

⁷Teleportation Approach

⁸Electric Vehicle Charging Station

⁹Shared Nearest Neighbor

¹⁰Time-of-Use

¹¹Probabilistic Dominance

¹²User Equilibrium Based Traffic Assignment Model

¹³Point Estimation Method-Gram Charlier Expansion

¹⁴Kendal

¹⁵Origin-Destination

¹⁶Definitional Constraint

¹⁷Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks

¹⁸First Input First Output

¹⁹Strict Constraint

²⁰Certain Degree

²¹Cumulative Distribution Functions

²²Probability Density Function

²³Sioux falls

²⁴Feasible Plan

²⁵Monte Carlo Simulation