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

راضیه آقاپور[1]، دانشجوی کارشناسی ارشد، محمدصادق سپاسیان[2]، 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. باتوجه به تاثیر متقابل شبکه قدرت و صنایع حمل‌ونقل، طراحی ایستگاه‌های شارژ سریع، مستلزم درنظر 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 درنظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها می‌باشد. در ابتدا، به‌منظور 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 به‌همراه سری گرام-شارلیه حل شده است. علاوه بر این، مدل‌های غلبه احتمالاتی به‌منظور 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 عدم‌قطعیت‌ها در روش قطعی ممکن است به یک راه‌حل ناشدنی با نقض محدودیت‌های سیستم منجر گردد. بعلاوه، روش‌های غلبه احتمالاتی با درنظر گرفتن تاثیر عدم‌قطعیت‌ها بر شاخص‌های تصمیم‌گیری و ارائه مجموعه طرح‌های نامغلوب از نظر ریسک و هزینه، سرمایه‌گذار را در امر تصمیم‌گیری یاری می‌کنند.

واژه های 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

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 تاثیرات 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، درنظر گرفته‌اند. درصورتی‌که، برفرض مثال ممکن است میانگین تعداد خودروهای مراجعه کننده در ساعات اولیه روز بیشتر از میانگین تعداد خودروهایی باشد که در ساعات پایانی روز به ایستگاه شارژ مراجعه می‌کنند. در مرجع [۱] روشی مبتنی‌بر 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 درنظر گرفته است و تاثیر 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 بااستفاده 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 درنظر 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 درسهولت دستیابی به ایستگاه شارژ سریع را به‌عنوان تاثیرگذارترین عامل در افق بلندمدت توسعه و گسترش خودروهای الکتریکی درنظر 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 درنظر 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 درنظر 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. تاثیر 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

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

در مطالعات مورد بررسی در زمینه برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ از روش قطعی به‌منظور تعیین مکان و اندازه بهینه ایستگاه شارژ سریع بهره گرفته شده است. لیکن، به‌واسطه 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 به‌صورت 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] به‌منظور درنظر گرفتن ریسک در مسئله تصیم‌گیری برای انتخاب طرح سرمایه‌گذاری، جنبه دیگر نوآوری مقاله حاضر به‌شمار 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. به‌طور 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 درنظرگرفتن عدم‌قطعیت‌های 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 برمبنای 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.
- 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 به‌همراه سری گرام-شارلیه (PEM-GCE[۱۳]) درنظر گرفته شده است [۱۶] [۱۷].
- ارائه معیارهای غلبه احتمالاتی جهت درنظر گرفتن تاثیر عدم‌قطعیت‌ها 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 عدم‌قطعیت در بخش ۳ فرموله شده است. در بخش ۴ به معرفی روش پخش‌بار 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 برمبنای تعادل کاربر [۱۵, ۱۸] و تئوری صف M/M/s [۱۹] تشریح شده است (شکل ۱). در مرحله اول، به‌منظور محاسبه آهنگ ورود وسایل نقلیه به ایستگاه شارژ، مسئله تخصیص ترافیک برمبنای تعادل کاربر حل می‌شود [۱۴]. در مرحله دوم، ظرفیت ایستگاه شارژ سریع با استفاده از نظریه صف M/M/s و با درنظر گرفتن آهنگ ورود وسایل‌نقلیه متقاضی شارژ با توجه به ماکزیمم زمان انتظار آن‌ها در صف تعیین می‌شود [۱۴]. درنهایت مدل ریاضی پیشنهادی برای تقاضای ایستگاه شارژ سریع، مطابق نظریه صف M/M/s ارائه شده است [۷].

نظریه صف [۱۹] اغلب برای تجزیه‌وتحلیل 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[۱۴] ($A/B/C$) 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

مدت‌زمان خدمت‌دهی (مدت‌زمان شارژ) می‌باشد. لازم به‌ذکر است، فرض می‌شود مدت‌زمان خدمت‌دهی از توزیع‌های مستقل یکسان پیروی می‌کنند. و درنهایت، سومین عبارت تعداد دستگاه‌های شارژ در یک ایستگاه شارژ سریع را نشان می‌دهد.



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

۲-۱- مدل تخصیص ترافیک برمبنای تعادل کاربر

از آن‌جایی که خودروهای الکتریکی برای تقاضای حمل‌ونقل مالکان آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، عادات و تقاضای سفر مالکان تعیین‌کننده رفتار خودروهای الکتریکی خواهد بود. درنتیجه، هر مطالعه مربوط به خودروهای الکتریکی بدون درنظر گرفتن مشخصه‌های حمل‌ونقلی غیرواقع‌بینانه خواهد بود [۳]. به‌طور کلی، سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های سیستم حمل‌ونقل توزیع مکانی و زمانی خودروهای الکتریکی و درنتیجه الگوی توان مورد نیاز آن‌ها را تغییر می‌دهد و به‌موجب آن بهره‌برداری سیستم قدرت تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۲۲]. فرض کنید $G(N^T,\Omega^{TL})$ نشان‌دهنده شبکه ترافیکی باشد که در آن N^T و Ω^{TL} به‌ترتیب بیان‌گر مجموعه گره‌ها و کمان‌های شبکه است. در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، برآورد جریان در کمان‌ها یا مسیرهای شبکه (از خروجی‌های فرآیند تخصیص ترافیک)، مبتنی‌بر فرض‌های متفاوت هستند که اهم آن‌ها فرض رفتاری است. در فرض رفتاری که منجر به تخصیص تعادلی می‌شود، هر مسافر به‌نحوی عمل می‌کند 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 مبدا r و مقصد s، q_{rs} میزان تقاضای سفر بین مبدا 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 مبدا r و مقصد s باشد، یک و درغیر این‌صورت صفر) و Q_{rs} مجموعه مسیرهای بین مبدا و مقصد rs باشند، مسئله تخصیص ترافیک برمبنای تعادل کاربر در هر بازه زمانی به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود [۱۵]:

$$\min f(x)=\sum_{(mn)\in\Omega^{TL}}\int_0^{x_{mn}} p_{mn}(\omega)\,d\omega \qquad (۱)$$

تحت قیود:

$$\sum_{q\in Q_{rs}} f_q^{rs}=q_{rs} \qquad (۲)$$

$$f_q^{rs}\geq 0 \qquad (۳)$$

$$x_{mn}=\sum_{r\in N^T}\sum_{s\in N^T}\sum_{q\in Q_{rs}} f_q^{rs}\,\delta_{mn,q}^{rs} \qquad (۴)$$

در روابط فوق، تابع هدف مساله رابطه (۱)، حداقل‌سازی مجموع مساحت زیر نمودار تابع زمان سفر-حجم تمام کمان‌های شبکه است. رابطه (۲) اصل بقای جریان در شبکه را تضمین می‌کند، به این معنی‌که مجموع جریان تمام مسیرها بین هر مبدا-مقصد (O-D[۱۸]) با تقاضای سفر آن مبدا-مقصد مساوی است. رابطه (۳) شرط نامنفی بودن جریان ترافیک در مسیر q بین مبدا 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 آن‌ها قرار دارد) هستند.

مسئله تخصیص ترافیک برمبنای تعادل کاربر یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی است در این مقاله به‌منظور حل مسئله تخصیص ترافیک برمبنای تعادل کاربر از نرم افزار خرد و کلان‌نگر Aimsun[۱۷] [۲۳] استفاده شده است.

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

$$f_{k,t}=\sum_{r\in N^T}\sum_{s\in N^T}\sum_{q\in Q_{rs}} f_{q,t}^{rs}\,\delta_{k,q}^{rs}\,u_k \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، $\delta_{k,q}^{rs}$ متغیر ضمنی صفر و یک (اگر جریان ترافیک بین جفت rs از ماتریس مبدا-مقصد توسط ایستگاه شارژ kام مهار گردد، یک و در غیر این‌صورت صفر) و u_k متغیر تصمیم‌گیری مربوط به احداث و یا عدم احداث ایستگاه شارژ kام می‌باشد. در واقع $f_{k,t}$، مجموع جریان ترافیک تمامی مسیرهایی است که از گره ترافیکی k (که به‌عنوان کاندید برای احداث ایستگاه شارژ سریع درنظر گرفته شده است) در زمان t عبور می‌کنند. به‌عبارتی، نشان‌دهنده تعداد خودروهایی است که از گره ترافیکی k تردد نموده‌اند.

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 درحالت کلی تحت‌تاثیر قرار نمی‌گیرد. بنابراین، رفتار رانندگی مالکان خودروهای الکتریکی شبیه به رفتار رانندگان وسایل نقلیه معمول باقی خواهد ماند [۲۱]. همان‌طوری که گفته شد $f_{k,t}$ نشان‌دهنده تعداد خودروهای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

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 درنظر گرفته می‌شود. پس، می‌توان تعداد متوسط خودروهای ورودی به هر ایستگاه شارژ کاندید k از مجموعه ایستگاه‌های شارژ سریع کاندید (Ω^K) در زمان t را مطابق [۱۴] به‌صورت رابطه (۶) بیان نمود:

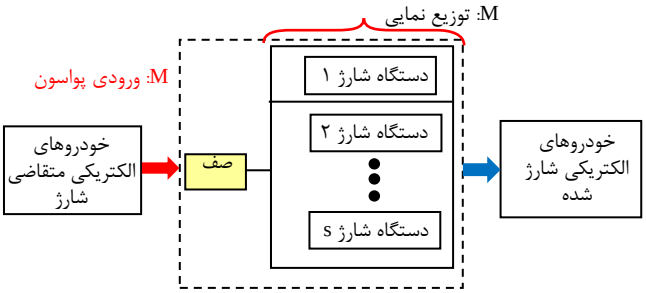
$$\lambda_{k,t} = C \frac{f_t^{trip}}{\sum_{t\in T} f_t^{trip}} \frac{f_{k,t}}{\sum_{k\in\Omega^K} f_{k,t}} \qquad \forall t \in T, \forall k \in \Omega^K \qquad (۶)$$

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].

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 تحت‌شعاع 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 درنتیجه میانگین مدت‌زمان انتظار مشتری در صف افزایش خواهد یافت. با درنظر گرفتن λ_k^{RH} به‌عنوان آهنگ ورود خودروها به ایستگاه شارژ کاندید k در ساعت اوج تردد، به صورت:

$$\lambda_k^{RH} = \max\left\{ \lambda_{k,t} = C \frac{f_t^{trip}}{\sum_{t\in T} f_t^{trip}} \frac{f_{k,t}}{\sum_{k\in\Omega^k} f_{k,t}} \quad \forall t \in T \right\} \forall k \in \Omega^K \qquad (۷)$$

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]:

$$objective: \min z_k \qquad (۸)$$

تحت قیود:

$$W_k^{RH} < W^{allowed} \qquad (۹)$$

$$W_k^{RH} = \frac{(z_k\rho_k^{RH})^{z_k}\rho_k^{RH}}{\lambda_k^{RH}(z_k!)(1-\rho_k^{RH})^2}\pi_{k,0}^{RH} \qquad (۱۰)$$

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:

$$\pi_{k,0}(t) = \left[\sum_{n=0}^{z_k-1} \frac{(z_k\rho_{k,t})^n}{n!} + \frac{(z_k\rho_{k,t})^{z_k}}{(z_k!)(1-\rho_{k,t})} \right]^{-1} \qquad (۱۱)$$

$\rho_{k,t}$ 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 پواسن 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. $\rho_{k,t}$ مطابق رابطه (۱۲) توصیف می‌شود [۷]:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

$$\rho_{k,t} = \frac{\lambda_{k,t}}{z_k \mu_q} \quad (۱۲)$$

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

$$z_k^{\min} \le z_k \le z_k^{\max} \quad (۱۳)$$

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 درنظر گرفته شود، با فرض $B_{k,t}$ به‌عنوان تعداد خودروهایی که در زمان t به‌صورت همزمان شارژ می‌شوند (دستگاه‌های شارژ در حال خدمت)، تقاضای ناشی از شارژ خودروهایی که در زمان t در سیستم صف ایستگاه شارژ kام شارژ می‌شوند ($P_{k,t}^{FCS}$) را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۴) بیان کرد [۲۰]:

$$P_{k,t}^{FCS} = B_{k,t}\, p^{FCS} \quad (۱۴)$$

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

به‌منظور 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:

$$\pi_{k,n}(t) = \begin{cases} (\frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q})^n \frac{\pi_{k,0}(t)}{n!} & n < z_k \\ (\frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q})^n \frac{\pi_{k,0}(t)}{z_k!}\, {z_k}^{z_k - n} & n \ge z_k \end{cases} \quad (۱۵)$$

از آن‌جایی‌که n و z_k به‌ترتیب نشان‌دهنده تعداد خودروهای متقاضی دریافت شارژ و تعداد دستگاه‌های شارژ در ایستگاه شارژ سریع می‌باشند، تعداد دستگاه‌های شارژ درحال خدمت مطابق $\min(z_k, n)$ به‌دست می‌آید [۷]. در مدل صف M/M/s تعداد خودروهایی که به‌صورت هم‌زمان شارژ می‌شوند (تعداد دستگاه‌های شارژ درحال خدمت)، مطابق رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد:

$$B_{k,t} = \begin{cases} (\frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q})^n \frac{P_{k,0}(t)}{n!} & n < z_k \\ (\frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q})^{z_k} \frac{P_{k,0}(t)}{z_k!(1-\rho_{k,t})} & n = z_k \end{cases} \quad (۱۶)$$

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

$$E[P_{k,t}^{FCS}] = \frac{\lambda_{k,t}}{\mu_q}\, p^{FCS} \quad (۱۷)$$

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 به‌صورت یک برنامه‌ریزی احتمالاتی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح، براساس برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی فرموله شده است.

۱-۳- تابع هدف

تابع هدف مسئله حداقل‌سازی مجموع هزینه سالانه سرمایه‌گذاری و تلفات شبکه توزیع درنظر گرفته شده است. بنابراین تابع هدف شامل دو بخش به‌شرح 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 به‌صورت رابطه زیر است:

$$\min f_{inv} = \pi^{FCS} \sum_{k \in \Omega^K} \{u_k [c^{CH} z_k + c_k^{other} z_k + c_k^F]\} \quad (۱۸)$$

در رابطه (۱۸) π^{FCS}، ضریب بازگشت سرمایه برای احداث ایستگاه شارژ سریع می‌باشد و مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$\pi^{FCS} = \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{n^{FCS}}}{(1+\varepsilon)^{n^{FCS}} - 1} \quad (۱۹)$$

- هزینه سالیانه تلفات انرژی شبکه:

$$\min f_{lost} = c^E d^{annual} \{ \sum_{(i,j) \in \Omega^{Dl}} \sum_{t \in T} [g_{i,j} ({U_{i,t}}^2 + {U_{j,t}}^2 - 2 U_{i,t} U_{j,t} \cos\theta_{ij,t})] \} \quad (۲۰)$$

در رابطه فوق، d^{annual} تعداد روزهای سال، c^E هزینه انرژی الکتریکی، $g_{i,j}$ کنداکتانس 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

۳-۲- قیود مساله

۳-۲-۱- قیود قطعی

معادلات پخش‌بار 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 پخش‌بار جاروب پس‌رو-پیش‌رو برای حل مسئله پخش‌بار برای هر حالت از متغیرهای تصادفی ورودی به‌کار گرفته شده است.

$$P_{i,t} = P_{i,t}^{D} + \sum_{k\in\Omega_i} P_{k,t}^{FCS} + U_{i,t}\sum_{j\in N^D} U_{j,t}[G_{ij}\cos\theta_{ij,t} + B_{ij}\sin\theta_{ij,t}] \quad \forall i\in N^D, \forall t\in T \tag{۲۱}$$

$$Q_{i,t} = Q_{i,t}^{D} + U_{i,t}\sum_{j\in N^D} U_{j,t}[G_{ij}\sin\theta_{ij,t} - B_{ij}\cos\theta_{ij,t}] \quad \forall i\in N^D, \forall t\in T \tag{۲۲}$$

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 به‌صورت توزیع نرمال درنظر گرفته شده‌اند.

$P_{k,t}^{FCS}$، در مدل پیشنهادی تقاضای ایستگاه شارژ سریع به صورت شین PQ با مشخصه تصادفی درنظر گرفته شده است. با درنظر گرفتن ضریب بار ثابت واحد برای باتری خودروها [۱, ۲۴]، تقاضای توان خودروها مطابق روابطی که در بخش ۲-۳ تشریح گردید، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{k,t}^{FCS} = B_{k,t}\, p^{FCS} \tag{۲۳}$$

$$Q_{k,t}^{FCS} = 0 \tag{۲۴}$$

۳-۲-۲- قیود تصادفی

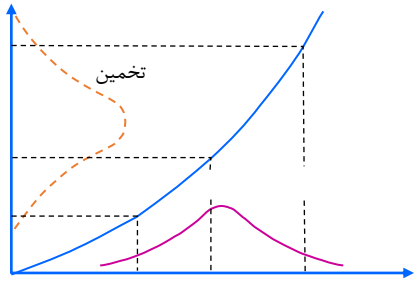
براساس مشخصه مکانیکی خطوط، توان عبوری از هادی قادر به تحمل حد حرارتی معینی است. بنابراین فلوی عبوری از خط باید کمتر از مقدار بیشینه توان مجاز خط باشد. هم‌چنین در یک راه‌حل بهینه برای مسئله می‌بایست ولتاژ هر شین بین دامنه حداقل و حداکثر ولتاژ قرار گیرد. با این‌حال، این محدودیت‌ها یک محدودیت سخت[۱۹] نیستند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

$$\text{Prob}(S_{ij} \le S_{\max}) \ge \alpha \qquad \forall (ij)\in\Omega^{DL} \tag{۲۵}$$

$$\text{Prob}(U_{\min} \le U_i \le U_{\max}) \ge \alpha \qquad \forall i\in\Omega^{DL} \tag{۲۶}$$

۴- روش برآورد نقطه‌ای

در مقاله حاضر از روش پخش‌بار 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



به‌دست آورد. تغلیظ rام $(\rho_{l,r},\omega_{l,r})$ از متغیر تصادفی ρ_l را می‌توان به‌صورت یک جفت متشکل از مکان $\rho_{l,r}$ و وزن $\omega_{l,r}$ توصیف نمود. مکان $\rho_{l,r}$ مقدار rام متغیر ρ_l است که تابع F به‌ازای 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.

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 درنظر شده است. با توجه به مشخصه احتمالی بار شبکه، تلفات شبکه نیز دارای مشخصه احتمالی خواهد بود، لذا یافتن راه‌حل بهینه‌ای که اهداف موردنظر طراحی (برازندگی هر راه‌حل 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 عدم‌قطعیت معرفی و تشریح خواهند شد.

۵-۱- روش میانگین-واریانس

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

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

$$\mu_A \geq \mu_B \quad (۲۷)$$

$$\sigma_A \leq \sigma_B \quad (۲۸)$$

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) کافیست تنها با مساوی برقرار شود و برعکس. اگر هر یک از طرح ها 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 می باشد. 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[۲۱]) 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:

$$F_A(x) \leq F_B(x) \quad (۲۹)$$

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 درنظر بگیرید. احتمال این که A بزرگتر از B است، مطابق روش ارزیابی برتری [۲۷]، طبق رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود:

$$r_{AB} = 1 - F_{\Delta_{AB}}(0) \quad (۳۰)$$

در رابطه فوق $F_{\Delta_{AB}}$، تابع توزیع تجمعی Δ_{AB} است. رابطه بین A و B با مقایسه r_{AB} به محدوده آستانه متقارن حول ۰/۵ $[T_l, 1-T_l]$، 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.
- اگر $T_l \leq r_{AB} \leq 1-T_l$، A و B برابرند.

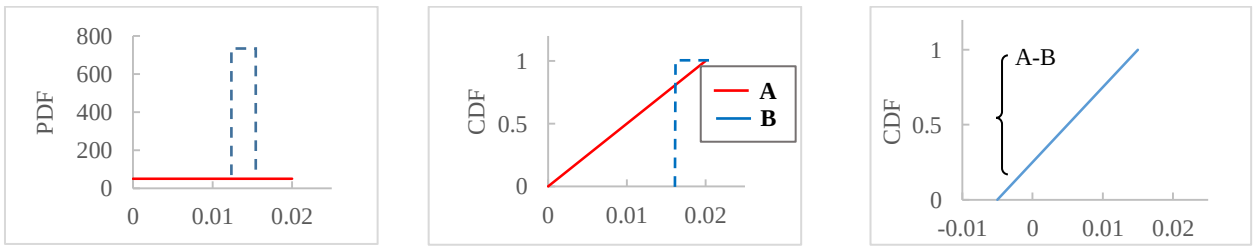
تصمیم‌گیری در باب برتری نسبی دو طرح A وB، نیازمند تعیین آستانه $T_l \in [۰، ۰/۵]$ است. در بسیاری از مطالعات $T_l = ۰/۳$ نتایج قابل‌قبولی از نقطه‌نظر عملی فراهم می‌نماید.

برای مثال توابع چگالی احتمال(PDF[۲۲]) 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: $r_{AB} = P(A > B) = 1 - F_{\Delta_{AB}}(0) = ۰/۸$ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که $A > B$.

۶- روند برنامه‌ریزی

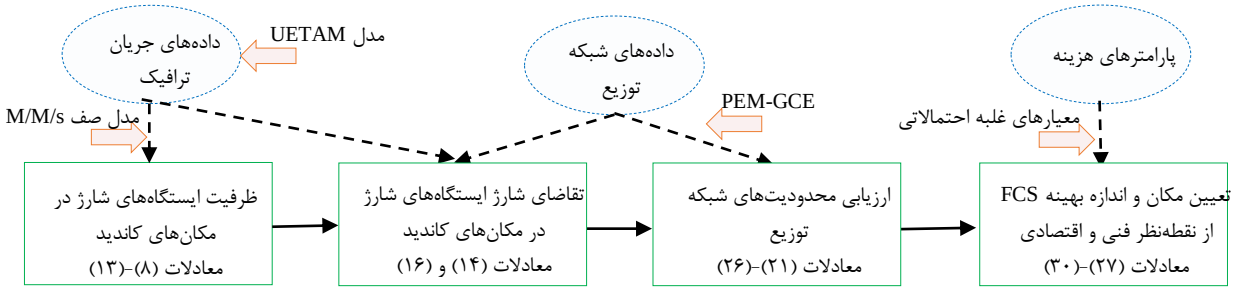
گام‌های اساسی در روند برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع به شرح زیر است (شکل ۵):

- 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 عدم‌قطعیت. به‌منظور درنظر 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]

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]



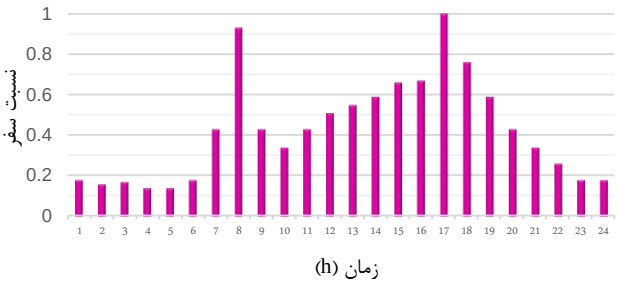
شکل(۵): روند برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع

- تاثیر عدم‌قطعیت‌ها 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، به‌عنوان طرح‌های نهایی انتخاب می‌گردند.

۷- مطالعه موردی

۷-۱- توصیف مورد مطالعاتی

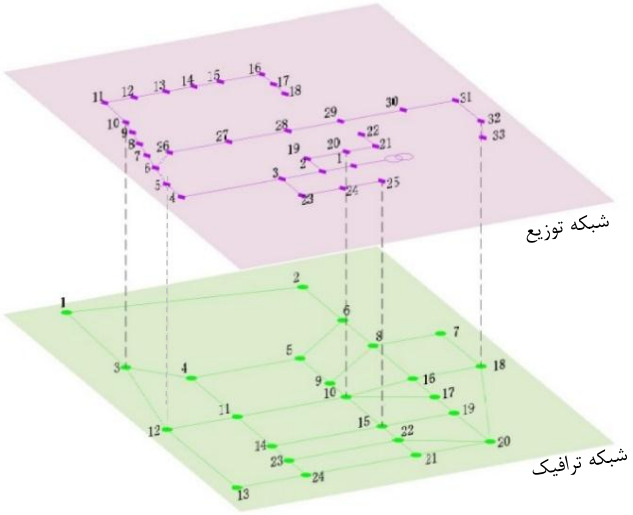
برای پیاده‌سازی مفاهیم پیشنهادی، بررسی و ارزیابی نتایج، شبکه ترافیک معروف موسوم به سوفالز[۲۳] با توجه به دردسترس بودن اطلاعات مربوط به آن انتخاب شده است. شبکه سوفالز دارای ۲۴ ناحیه و ۵۵۲ زوج مبدا-مقصد می‌باشد. اطلاعات مربوط به ماتریس تقاضا مطابق [۲۸] می‌باشد (شکل ۶). شبکه توزیع ۱۲/۶۶ کیلوولت ۳۳ شین IEEE [۲۹] به‌عنوان شبکه توزیع متناظر آن درنظر گرفته شده است (شکل ۷).



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 به‌عنوان کاندید مکان احداث ایستگاه شارژ سریع درنظر گرفته شده‌اند. ظرفیت باتری خودرو (C_{Bat}) ۲۰kWh، p^{FCS} برابر با ۴۴kW و حداکثر انحراف ولتاژ مجاز ۱۰٪ درنظر گرفته شده است. سایر اطلاعات موردنیاز 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**

FCSهای کاندید	۱	۲	۳	۴	۵
گره شبکه ترافیک	۳	۱۰	۱۲	۱۵	۱۸
شین شبکه توزیع	۱۰	۲۰	۵	۲۵	۳۲
c^{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**

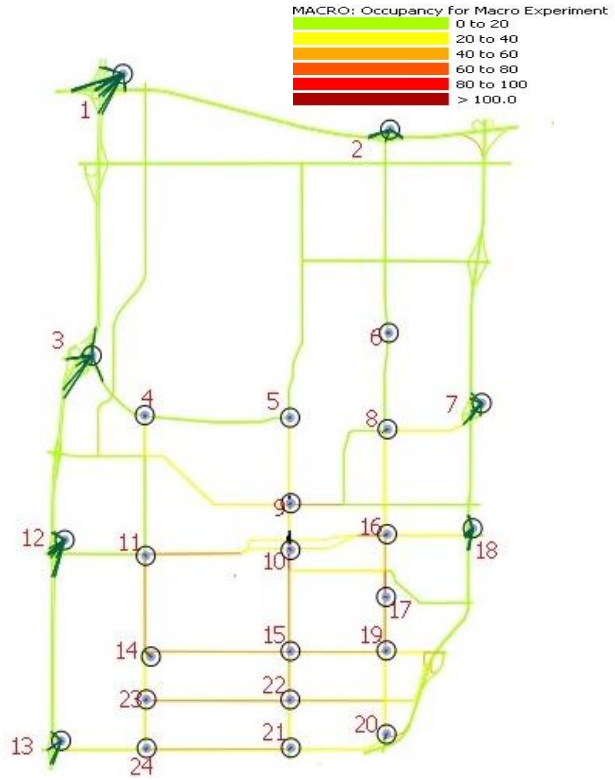
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
z^{max}	۱۰	z^{min}	۶
C	۸۵۰	$W^{alloweed}$	۵ دقیقه
ε	۰/۱	n^{FCS}	۲۰سال
c^{E}	۵۰ US$/MWh	α	۹۹/۸۷ ٪

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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

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 ($۳۲=۲^{۵}$) به‌دست می‌آید و ظرفیت ایستگاه شارژ سریع در تمامی طرح‌های ممکن تعیین می‌شود. به‌منظور بررسی محدودیت‌های شبکه توزیع در حضور خودرو الکتریکی، ابتدا مدل تشریح شده شده در بخش قبل، بدون درنظر 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 درنظر گرفتن تاثیر عدم‌قطعیت‌های 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 درنظر گرفتن تاثیر عدم‌قطعیت‌ها، مقدار میانگین بار مصرفی ایستگاه شارژ (رابطه (۱۷)) و میانگین بار مصرفی متعارف شبکه به‌عنوان ورودی مسئله برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ سریع به‌کار 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 ۵۱۲۹۸۱/۵۹ 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
هزینه کل=۵۱۲۹۸۱/۵۹ US$	

۷-۲-۲- سناریوی دوم: برنامه‌ریزی احتمالی بدون لحاظ عدم‌قطعیت در تصمیم‌گیری

در این مورد، محدودیت‌های شبکه توزیع در اثر بار ناشی از شارژ خودروها با بهره‌گیری از ابزار پخش‌بار احتمالاتی در چارچوب برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی ارزیابی می‌گردد. به‌این 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 پخش‌بار احتمالاتی برآورد نقطه‌ای به‌همراه سری گرام-شارلیه کنترل می‌شود. مقادیر هزینه مربوط به مجموعه طرح‌های شدنی به‌همراه مکان و ظرفیت ایستگاه شارژ سریع در هر طرح در جدول‌های ۴ و۵ 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**

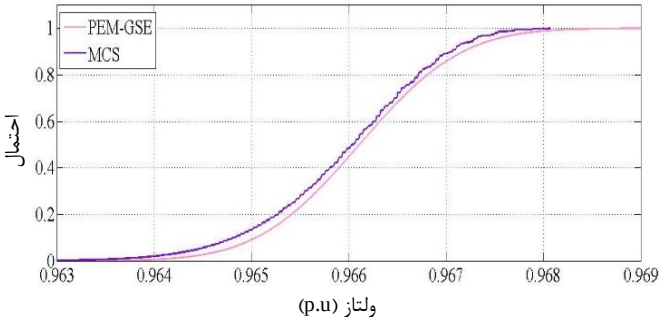
واریانس	میانگین هزینه	شماره طرح
۲۸۱۷۶۰/۵	۵۹۵۲۲۸/۱۲	۱
۴۸۶۶۲۶/۱۷	۵۱۳۷۰۵/۱۱	۲
۳۰۷۷۶۲/۱۲	۵۱۳۷۱۰/۰۲	۳
۳۲۳۴۷۵/۶۵	۵۱۸۳۳۱/۷۲	۴
۱۰۹۶۸۰/۶۶	۵۳۱۴۲۰/۵۳	۵

جهت سنجش صحت برنامه‌نویسی، مطالعه پخش‌بار ارائه شده با استفاده از روش برآورد نقطه‌ای به‌همراه سری گرام-شارلیه با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (MCS[۲۵]) با $۱۰^{۵}$ تکرار؛ در شین ۵ در ساعت دهم از طرح ۲ مقایسه گردید. روش مونت‌کارلو علی‌رغم نیاز به زمان زیاد، به‌دلیل دقت بالا به‌عنوان معیاری برای سنجش روش‌های ارائه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

شده در حوزه پخش‌بار احتمالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، خطای روش برآورد نقطه‌ای به‌همراه 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**

به‌منظور 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 قبلا 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 پخش‌بار احتمالاتی در محاسبه تابع هدف و معیار انتخاب طرح نهایی استفاده شده است. بدین ترتیب طرح شماره ۲ با کمترین مقدار میانگین هزینه، US$ ۵۱۳۷۰۵/۱۱ به‌عنوان طرح نهایی بهینه انتخاب خواهد شد (جدول ۶).

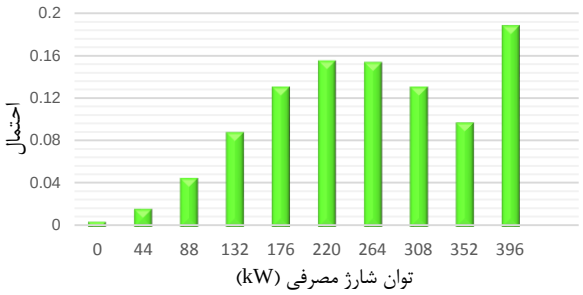
جدول (۶): **نتایج حاصل از برنامه‌ریزی در سناریو دوم**

اندازه	مکان (شماره شین)
۸	۵
۹	۲۵
۸	۳۲
هزینه کل=۵۱۳۷۰۵/۱۱۸۸ US$	

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 درنتیجه می‌توان اظهار داشت، با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های مسئله، هزینه طراحی به میزان ٪۰/۱۴ 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، به‌ازای هر مجموعه جواب ممکن برای احداث ایستگاه شارژ سریع محاسبه می‌شود. به‌عنوان مثال پروفیل بار ایستگاه شارژ کاندید ۴ از طرح ۲، در ساعت ۱۸ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

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**

۷-۲-۳- سناریوی سوم: برنامه‌ریزی احتمالی بالحاظ عدم‌قطعیت در تصمیم‌گیری

در این مقاله از رویکردهای احتمالاتی برای گسترش عدم‌قطعیت‌های مسئله بر شاخص تصمیم‌گیری درنظر گرفته شده (تابع هدف که نشان‌دهنده برازندگی 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 عین‌حال 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 درنظر گرفتن تاثیر عدم‌قطعیت‌ها در تصمیم‌گیری نهایی، روش‌های مقایسه دوبه‌دو که در بخش ۴ تشریح گردید جهت انتخاب بهینه از میان طرح‌های شدنی که هر یک دارای توزیع احتمال دلخواه مخصوص به‌خود هستند، به‌کار 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، عدم‌قطعیت‌های مربوط به مسئله با تشکیل مجموعه‌ای از طرح‌های نامغلوب دامنه انتخاب سرمایه‌گذار را گسترش داده و فرآیند تصمیم‌گیری فرد را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. پس از تشکیل مجموعه نامغلوب سرمایه‌گذار می‌تواند با درنظر گرفتن معیارهای انتزاعی و درجه ریسک‌پذیری، به رتبه‌بندی طرح‌های نامغلوب پرداخته و طرح نهایی را انتخاب نماید.

جدول (۷): **نتایج حاصل از برنامه‌ریزی در سناریو دوم**

مجموعه طرح‌های نامغلوب	رویکرد
۲،۳،۵	میانگین-واریانس
۲،۳	غلبه تصادفی
۲،۳	ارزیابی برتری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله رویکردی احتمالی برای جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ خودرو الکتریکی با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های مربوط به تقاضای شارژ ایستگاه شارژ سریع، از دیدگاه شبکه ترافیک و شبکه توزیع ضمن حفظ اصل سرعت و سادگی محاسبات ارائه شده است. به‌منظور شناسایی چالش‌های حضور خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع ضروری است که در اولین گام منحنی بار شارژ آن‌ها تخمین زده شود. از آن‌جایی‌که الگوی شارژ موردنیاز 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. به‌منظور ارزیابی محدودیت‌های فنی شبکه توزیع در چارچوب برنامه‌ریزی با قیدهای تصادفی، روش پخش‌بار احتمالاتی برآورد نقطه‌ای به‌همراه 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 ۵۱۲۹۸۱/۵۹ 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 درنظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های مسئله، هزینه طراحی به میزان ۰/۱۴٪ افزایش یافت. در سناریو سوم، برنامه‌ریزی احتمالی با درنظر گرفتن عدم قطعیت تصمیم‌گیری و با کمک طرح-های غلبه احتمالاتی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده حاکی از تاثیر مستقیم عدم‌قطعیت‌ها بر عملکرد طراحی ایستگاه شارژ سریع دارد. به‌طوریکه درنظر 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

[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.

[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 Corporation1956.

[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*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

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/tntp/.

[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 علایم 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

N^D: مجموعه شین‌های شبکه توزیع

پارامترها

C: مجموع تعداد دفعات شارژ خودروهای الکتریکی در ایستگاه‌های شارژ (تعداد/روز)

f_t^{trip}: نسبت سفر در زمان t

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

μ_q: آهنگ خدمت‌دهی دستگاه‌های شارژ

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

S_{ij}: فلوی 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

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

α: بازه اطمینان روش قیدهای تصادفی

$S_{\max}$: حد بالای فلوی 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 kام 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 درغیر این‌صورت صفر)

$\delta_{k,q}^{rs}$: متغیر ضمنی صفر و یک (اگر جریان ترافیک بین جفت rs از ماتریس مبدا–مقصد توسط ایستگاه شارژ kام مهار گردد، یک و در غیر این‌صورت صفر)

u_k: متغیر تصمیم‌گیری مربوط به احداث و یا عدم احداث ایستگاه شارژ سریع kام

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]

t و اوج تردد

W_k^{RH}: میانگین مدت‌زمان انتظار در ایستگاه شارژ سریع kام در زمان اوج تردد

z_k: تعداد دستگاه‌های شارژ در ایستگاه شارژ سریع kام

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

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

$B_{k,t}$ و $E[B_{k,t}]$: تعداد دستگاه‌های شارژ مشغول به‌کار و مقدار میانگین آن

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

زیرنویس‌ها

[1] Electric Vehicles
[2] All Electric Range
[3] Fast Charging Station
[4] State of Charge
[5] Queuing Theory
[6] Plug-in Electric Vehicle
[7] Teleportation Approach
[8] Electric Vehicle Charging Station
[9] Shared Nearest Neighbor
[10] Time-of-Use
[11] Probabilistic Dominance
[12] User Equilibrium Based Traffic Assignment Model
[13] Point Estimation Method-Gram Charlier Expansion
[14] Kendal
[15] Origin-Destination
[16] Definitional Constraint
[17] Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks
[18] First Input First Output
[19] Strict Constraint
[20] Certain Degree
[21] Cumulative Distribution Functions
[22] Probability Density Function
[23] Sioux falls
[24] Feasible Plan
[25] Monte Carlo Simulation

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.2.1]