برنامه‌ریزی چندهدفه ایستگاه‌های شارژ با در نظر گرفتن منافع شرکت توزیع و مالکان خصوصی ایستگاه‌های شارژ

یوسف صحرایی[۱] ، دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، افشین پهلوان‌حسینی [۲]، دانشجوی دکتری ، محمد صادق سپاسیان[۳] ، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
sahraei.yusef@gmail.com
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
apahlavanhoseini@gmail.com
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
m_sepasian@sbu.ac.ir

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

چکیده: در سال‌های اخیر خودروهای الکتریکی به دلیل مسائل زیست محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. نصب ایستگاه‌های شارژ سریع، مستلزم در نظرگرفتن روش‌مند مسائل مرتبط با آن‌ها، از جمله، تعیین مکان و اندازه ایستگاه‌های شارژ می‌باشد. از طرف دیگر لازم است سرمایه‌گذاران خصوصی به سرمایه‌گذاری در زمینه نصب ایستگاه‌های شارژ تشویق شوند و شرایط مناسبی ایجاد گردد که از سرمایه‌گذاری خود سود لازم را به‌دست آورند. در این مقاله مسأله برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع به صورت یک مسأله برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته به عدد صحیح مدل‌سازی می‌شود، که در آن توابع هدف شرکت توزیع و صاحب ایستگاه شارژ به صورت مجزا در نظر گرفته شده‌اند. در مدل ارائه‌شده، مکان و اندازه ایستگاه‌های شارژ و هم‌چنین قیمت انرژی تبادلی بین شرکت توزیع و ایستگاه شارژ به گونه‌ای مشخص می‌شود که توابع هدف شرکت توزیع و صاحب ایستگاه شارژ بهینه گردد. در روش ارائه شده، برای تعیین اندازه ایستگاه‌های شارژ، از نظریه صف و مدل تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر استفاده شده است. سپس مسأله برنامه‌ریزی چندهدفه ایستگاه‌های شارژ با در نظر گرفتن توابع هدف شرکت توزیع و سرمایه‌گذاران خصوصی حل و پاسخ نهایی با توجه به شاخص‌های اقتصادی و بهره‌برداری از میان راه‌حل‌های جبهه پارتو انتخاب شده است. در انتها، کارایی روش ارائه شده با استفاده از نتایج عددی نشان داده شده است.

واژه های کلیدی: برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع، سرمایه‌گذاران خصوصی، خودروهای الکتریکی، نظریه صف، محدودیت اپسیلون

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۱۰/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۰۴/۱۹

نام نویسنده‌ی مسئول : محمد صادق سپاسیان
نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شهید بهشتی

۱- مقدمه

امروزه با توجه به رشد جمعیت، گسترش حمل و نقل و افزایش تقاضا، روز به روز بر تعداد خودروها و سفرها افزوده می‌شود، که این امر باتوجه به کمبود منابع سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست محیطی، مشکلات عدیده‌ای را ایجاد می‌کند. بنابراین در سال‌های اخیر، خودروهای الکتریکی اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند[۱]. استفاده از خودروهای الکتریکی در مقیاس وسیع و هم‌چنین ایجاد قابلیت سفر در مسافت‌های طولانی با توجه به محدودیت مسافت تمام الکتریک طی شده توسط این خودروها، نیازمند گسترش و توسعه زیرساخت‌های شارژ خودروهای الکتریکی از جمله ایستگاه‌های شارژ سریع است. بدون برنامه‌ریزی صحیح ایستگاه‌های شارژ سریع، بهره‌گیری از اثرات مفید خودروهای الکتریکی با مشکلاتی مواجه خواهد شد. برنامه‌ریزی نامناسب جهت نصب ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی، نه تنها باعث ایجاد مشکل برای صاحبان خودروهای الکتریکی می‌شود، بلکه برای طرح ترافیکی شهر و هم‌چنین شبکه توزیع مشکلات قابل توجهی ایجاد می‌کند.

به عنوان نمونه این مسأله می‌تواند باعث خارج شدن ولتاژ برخی باس‌ها از مقدار مجاز و افزایش تلفات شبکه گردد[۲]. درنتیجه، مسأله برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی به یکی از مسائل مهم در این حوزه تبدیل گردیده و بخش قابل توجهی از تحقیقات در این حوزه را به خود اختصاص داده است[۱۸-۳]. خلاصه‌ای از مهم‌ترین کارهای انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع در جدول (۱) نشان داده شده است. در برخی از مطالعات گذشته، مسأله برنامه‌ریزی جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی به صورت یک مسأله بهینه‌سازی تک‌هدفه [۶-۳]، [۱۲,۱۳]،[۱۸-۱۷] و در تعدادی از پژوهش‌ها به صورت یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته شده‌است [۱۱-۸]، [۱۶]. در مطالعات گذشته توابع هدف مختلفی درنظرگرفته شده است. گروهی از توابع هدف درنظرگرفته‌شده در پژوهش‌های گذشته مربوط توابع اقتصادی می‌باشد. به عنوان مثال در مراجع[۶-۳]،[۱۵-۸]، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و در مرجع [۴]، افزایش سود ناشی از فروش انرژی در ایستگاه‌های شارژ جز توابع هدف مسأله می‌باشند. در گروه دیگری از مطالعات، بهبود شرایط فنی شبکه در حضور این ایستگاه‌ها بخشی از توابع هدف می‌باشد. به عنوان نمونه توابع هدف در نظر گرفته شده در مراجع [۵-۳]،[۹-۸]،[۱۲-۱۱]،کاهش تلفات شبکه و در مراجع [۹] و [۱۲]، بهبود پروفیل ولتاژ می‌باشند. هزینه مرتبط با صاحبان خودروهای الکتریکی جزء توابع هدف استفاده شده در برخی از مطالعات می‌باشد. به عنوان نمونه، میزان تلفات انرژی خودروها برای رسیدن به ایستگاه‌های انرژی [۵] و زمان صرف شده توسط این خودروها برای رسیدن به ایستگاه‌های شارژ[۶]، از جمله توابع هدف استفاده شده در این گروه از پژوهش‌ها می‌باشند. هم‌چنین، یکی از توابع هدف در نظر گرفته شده در مرجع [۹]، عبارت است از: حداکثرکردن تعداد خودروهایی که توسط ایستگاه‌های شارژ قابل شارژ هستند. برنامه‌ریزی توسعه هم‌زمان سیستم‌های شارژ خودروهای الکتریکی و شبکه توزیع در مرجع[۸]، انجام‌شده و در آن هزینه توسعه شبکه نیز در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۹]، تأثیر خودرهای الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار در بهره‌برداری بهینه از شبکه توزیع بررسی شده است. در پژوهش‌های انجام شده، از روش‌های مختلفی برای حل مسأله جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع استفاده شده است که از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک[۱] [۵]، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات[۲][۶]، روش تکامل تفاضلی بهبود یافته[۳][۴] و آنتروپی متقاطع[۴][۹] اشاره کرد. سایر روش‌های مورد استفاده در جدول (۱) ذکر شده است. در مرجع[۳]، مکان بهینه ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی، با در نظر گرفتن مسافت‌های از پیش تعیین شده توسط خودروها لحاظ شده است. در این مرجع، مکان بهینه ایستگاه‌های شارژ با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای غربال‌گری[۵] و با توجه به شعاع سرویس‌دهی آن‌ها مشخص گردیده است. سپس با در نظر گرفتن هزینه‌های مرتبط با ایستگاه‌های شارژ از طریق یک الگوریتم اصلاح شده اولیه- دونقطه داخلی[۶]، ظرفیت بهینه ایستگاه‌های شارژ مشخص گردیده است. هم‌چنین استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب مکان ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن معیارهای زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی، روش پیشنهادی در مرجع [۱۰] می‌باشد. یکی دیگر از موارد مهمی که در مکان‌یابی و تعیین اندازه ایستگاه‌های شارژ سریع مورد بررسی قرار گرفته است، نحوه توزیع جریان ترافیکی است [۹-۸]،[۱۱,۳۹]. ظرفیت ایستگاه‌های شارژ در مرجع[۱۱]، با استفاده از تئوری صف[۷] محاسبه شده‌است. در این مرجع، توابع هدف شرکت توزیع و حمل و نقل شهری به صورت مستقل از هم در نظر گرفته شده است و راه‌حل بهینه با استفاده از تئوری چانه زنی[۸] به‌دست آمده است. در مرجع [۸]، برنامه‌ریزی چندهدفه جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع و توسعه شبکه توزیع، به صورت همزمان ارائه شده است. در این مرجع مدل جریان ترافیک تعادلی با هدف حداکثرسازی راحتی رانندگان به همراه تئوری صف جهت تخمین بار شارژ ایستگاه‌های شارژ، توسعه داده شده است و الگوریتم چندهدفه تکاملی مبتنی بر جداسازی جهت حل مسأله به کار گرفته شده است. در مرجع [۹]، برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ با در نظر گرفتن توپولوژی شبکه و محدودیت‌های ترافیکی به صورت چندهدفه انجام شده است. تابع هدف در این کار کاهش تلفات توان، انحراف ولتاژ و مسافت سفر جهت تعیین مکان و اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ در شبکه توزیع و ترافیک است. در مرجع [۳۹]، یک مدل چند هدفه به منظور جایابی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

جدول (۱): خلاصه‌ای از کارهای مهم انجام‌شده در زمینه برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ

مرجع	تابع هدف			مدل تابع هدف		مدل ریاضی			محدودیت ها				متغیر تصمیم گیری			سیستم شارژ		روش حل*
	در نظر گرفتن توابع هدف شرکت توزیع و مالک ایستگاه شارژ به صورت مجزا	سود مالکان ایستگاه	سود شرکت توزیع	تک‌هدفه	چندهدفه	MILP	MINLP	NLP	معادلات پخش بار	ولتاژ باس ها	جریان خطوط	مکان ایستگاه های شارژ	ظرفیت ایستگاه شارژ	قیمت انرژی	پارکینگ‌های عمومی	ایستگاه شارژ سریع		
[۳]			✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓		۱
[۴]			✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓		۲
[۵]		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓		۳
[۶]		✓			✓		✓					✓	✓		✓	✓		۴
[۸]			✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		۵
[۹]			✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓		۶
[۱۰]		✓			✓			✓				✓				✓		۷
[۳۵]			✓	✓			✓					✓	✓			✓		۳
[۳۶]			✓	✓			✓					✓	✓			✓		۸
[۳۷]		✓		✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓			✓		۹
[۳۸]			✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓		۱۰
[۱۲]			✓	✓								✓	✓			✓		۱۱
[۱۳]			✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		۱۰
این مقاله	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		۱۲

❖ روش حل

۱- الگوریتم اصلاح شده اولیه- دونقطه داخلی
۲- روش تکامل تفاضلی بهبود یافته
۳- الگوریتم ژنتیک
۴- دیاگرام ورونوی همراه با الگوریتم بهینه سازی توده ذرات
۵- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر تجزیه
۶- آنتروپی متقاطع
۷- تکنیک اولویت‌بندی گزینه‌ها با کمترین فاصله به راه‌حل ایده‌آل
۸- دیاگرام ورونوی وزن‌دار
۹- بهینه‌سازی توده ذرات تطابقی
۱۰- CPLEX
۱۱- الگوریتم ژنتیک مبتنی بر بهبود بهینه سازی توده ذرات
۱۲- محدودیت اپسیلون

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

ایستگاه‌های شار سریع خودروهای الکتریکی از طریق اطلاعات مسیر حرکت خودروها (GPS) ارائه شده است. در این مرجع از طریق اطلاعات مسیر حرکت خودروهای الکتریکی، تقاضای احتمالی شارژ هر قسمت از شهر تخمین زده شده است. توابع هدفی که در این مدلسازی به آن پرداخته شده است، به حداقل رساندن هزینه‌ها و حداکثرسازی کیفیت خدمات می‌باشد. یکی دیگر از موارد مهمی که در برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است، نحوه ارتباط و معامله بین شرکت توزیع و صاحبان ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی است [۴۰]. در مرجع [۴۰]، مسأله برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع از دید شرکت توزیع و به صورت یک مسأله غیر خطی آمیخته به عدد صحیح مدل شده است. روش ارائه شده در این مرجع بر اساس مکانیزم حراج پویا بوده است و برای حل مسأله از یک الگوریتم ژنتیک هم‌تکاملی استفاده شده است. با مرور کارهای گذشته در زمینه برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ، مشخص می‌شود که در کارهای گذشته روش مناسبی برای تعیین مکان و ظرفیت ایستگاه‌های شارژ با در نظر گرفتن توابع هدف شرکت توزیع و مالکان ایستگاه‌های شارژ به طور مجزا ارائه نشده است. سرمایه‌گذاری در ایستگاه‌های شارژ سریع عمدتاً توسط سرمایه‌گذاران خصوصی انجام می‌شود به طوری‌که، آن‌ها تصمیم نهاییشان را در مورد نوع، اندازه و محل نصب این ایستگاه‌ها با توجه به منابع مالی خود می‌گیرند. از دید سرمایه‌گذاران مستقل، نصب ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی یک گزینه جذاب برای سرمایه‌گذاری به شمار می‌آید. با این حال مالکان این ایستگاه‌ها نسبت به شرکت توزیع اهداف متفاوتی دارند. بنابراین مهمترین چالش پیش‌رو در این مقاله، ارائه یک روش برنامه‌ریزی بهینه برای نصب ایستگاه‌های شارژ سریع می‌باشد که از طریق آن هم شرکت توزیع و هم مالک ایستگاه شارژ از این برنامه‌ریزی منتفع گردند. بنابراین در این مقاله یک مدل چندهدفه جدید به منظور تعیین مکان و اندازه‌ی ایستگاه‌های شارژ و هم‌چنین قیمت انرژی تبادلی بین شرکت توزیع و ایستگاه شارژ ارائه شده است. روش پیشنهادی بر اساس اهداف اقتصادی و بهره‌برداری سیستم و با در نظر گرفتن توابع هدف مالک ایستگاه شارژ و شرکت توزیع می‌باشد. برای حل مسأله چندهدفه، از روش محدودیت اپسیلون[۹] استفاده شده است که در آن مسأله به یک مسأله بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل می‌شود. با توجه به روش حل مسأله، خروجی شامل چند راه‌حل نامغلوب است، که هریک از آن‌ها را می‌توان به عنوان پاسخ نهایی انتخاب کرد. این راه‌حل‌های نامغلوب یک جبهه پارتو[۱۰] را تشکیل می‌دهند که برای انتخاب راه‌حل بهینه از میان این راه‌حل‌های نامغلوب، از یک روش مبتنی بر شاخص‌های اقتصادی و بهره‌برداری استفاده شده است[۲۰]. با توجه به موارد فوق، نوآوری‌های اصلی مقاله حاضر عبارتند از:

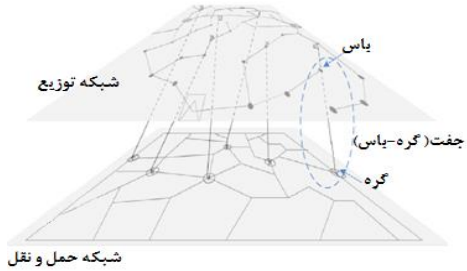
- جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع در چهارچوب برنامه‌ریزی چند هدفه با در نظر گرفتن توابع شرکت توزیع و مالک خصوصی ایستگاه‌های شارژ.
- حل مسأله‌ی چند هدفه‌ی برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ با استفاده از روش محدودیت اپسیلون.
- استفاده از یک روش مبتنی بر شاخص‌های اقتصادی و بهره‌برداری به منظور انتخاب راه‌حل بهینه از میان راه‌حل‌های جبهه پارتو.

ساختار مقاله به این شرح می‌باشد: در بخش۲، مدل تدوین شده تعیین ظرفیت و تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی در ایستگاه‌های شارژ سریع بر اساس مدل تخصیص ترافیک و نظریه صف ارائه شده است. در بخش۳، فرمول بندی مسأله و روش حل آن بیان شده است. این بخش شامل توابع هدف و قیود مسأله می‌باشد. همچنین در این بخش خلاصه‌ای از روش حل مسأله بهینه‌سازی و نحوه به دست آوردن راه‌حل بهینه ارائه شده است. قسمت پایانی این بخش به تشریح روند حل مسأله اختصاص یافته است. در بخش۴، نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه تست، تحلیل شده است. در نهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری مسأله ارائه شده است.

۲- تعیین ظرفیت ایستگاه‌های شارژ سریع

۲-۱- مدل‌سازی شبکه توزیع و حمل و نقل

در این مقاله مطابق شکل(۱)، شبکه‌های توزیع و حمل‌ونقل با توجه به اطلاعات جغرافیایی بر روی یکدیگر منطبق می‌شوند. فرض می‌شود که ایستگاه‌های شارژ سریع در گره‌های شبکه‌ی حمل و نقل نصب و به وسیله کابل به باس‌های مربوطه در شبکه توزیع متصل می‌شوند. این نقاط در شکل(۱) به صورت جفت‌های (گره- باس) نشان داده شده است.



شکل (۱): اتصال شبکه‌ها

اگرچه هیچ رابطه مستقیمی بین ایستگاه‌های شارژ سریع در نظر گرفته نمی‌شود، اما محدودیت فاصله جغرافیایی بین هردو آن‌ها وجود دارد. به عنوان مثال، دو ایستگاه شارژ سریع همسایه نباید "بسیار نزدیک" ساخته شوند تا بتوانند مقرون به صرفه باشند [۱۱]. درنتیجه یکی از قیود مسأله مربوط به حداقل فاصله بین دو ایستگاه شارژ می‌باشد که توسط رابطه (۱) مشخص می‌گردد:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

$$d_{m-n} \geq d^{min} \quad (۱)$$

چندین روش برای تعیین d_{m-n} وجود دارد. اگر اطلاعات جغرافیایی مربوط به منطقه در دسترس باشد، d_{m-n} می‌تواند به عنوان طول کوتاه‌ترین مسیر بین دو مکان تعیین شود. در غیر این صورت، می‌توان از یک روش تقریبی (رابطه (۲)) استفاده نمود [۱۱].

$$d_{m-n} = \xi\sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2} \quad (۲)$$

در این رابطه $(x_m . y_m)$مختصات جغرافیایی گره m در شبکه حمل و نقل را نشان می دهد و ξ ضریب اصلاح فاصله است[۱۱].

۲-۲- مدل‌سازی تخصیص ترافیک

رشد سریع جمعیت و شهرنشینی در دهه‌های اخیر مسائل و مشکلات ترافیکی را در زندگی روزمره بشر پررنگ‌ترکرده است. یکی از مهمترین اهداف پژوهش‌ها در حوزه ترافیک، بهینه‌سازی جریان حمل و نقل است[۲۱]. رفتار خودروها با توجه به تقاضای سفر افراد تعیین می‌شود. در نتیجه در مطالعات مربوط به خودروها لازم است ویژگی‌های شبکه حمل‌ونقل در نظر گرفته شده و از روش‌های تخصیص ترافیک مناسب استفاده گردد. در خصوص خودروهای الکتریکی، لازم است محل قرارگیری ایستگاه‌های شارژ، متناسب با تقاضای شارژ در آن نقطه باشد و جریان ترافیکی می‌تواند میزان تجمع خودروهای الکتریکی را در مناطق مختلف شبکه ترافیکی نشان دهد. در این مقاله، ابتدا مسأله تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر [۲۲,۲۴] حل می‌شود و سپس با استفاده از نتایج آن آهنگ ورود وسایل نقلیه به ایستگاه‌های شارژ محاسبه می‌شود. در نهایت با در نظر گرفتن آهنگ ورود وسایل نقلیه متقاضی شارژ، با توجه به ماکزیمم زمان انتظار آن‌ها در صف، ظرفیت ایستگاه‌های شارژ سریع با استفاده از نظریه صف M/M/S [۲۳] تعیین می‌شود.

در روش ارائه شده از اطلاعات ترافیکی برای شبیه سازی رفتار خودروهای الکتریکی و تخمین تقاضای شارژ استفاده می‌شود. با این حال، داده‌های جریان ترافیک خام را نمی‌توان به طور مستقیم در برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ مورد استفاده قرار داد. در نتیجه، از داده‌های معمول روزانه مبدأ-مقصد[۱۱] (OD) برای تولید جریان ترافیک استفاده می‌شود. به منظور دست‌یابی به این داده‌ها، از مدل تخصیص بهینه سیستم[۱۲]، برای تولید و اختصاص جریان ترافیک در هر مسیر شبکه حمل‌ونقل، استفاده می‌شود[۲۵]. در مرجع[۲۶]، شرح کاملی از مدل تخصیص بهینه سیستم ارائه شده است. هدف مدل تخصیص بهینه سیستم، دست‌یابی به حداقل هزینه سفر، مطابق معادلات (۳) تا (۶)، است [۱۱]:

$$min \sum_{a\epsilon NT} fr_a \, t_a(fr_a) \quad (۳)$$

$$s \cdot t \sum_k fp_k^{ru} = q_{ru} \quad . fp_k^{ru} \geq 0 \quad (۴)$$

$$fr_a = \sum_r \sum_u \sum_k fp_k^{ru} \; \delta_{a.k}^{ru} \quad (۵)$$

$$t_a(fr_a) = t_a^0 \left[1 + b\left(\frac{fr_a}{c_a}\right)^v\right] \quad (۶)$$

رابطه (۳)، تابع هدف مسأله است که، کمینه کردن هزینه سفر را نشان می‌دهد. رابطه (۴)، اصل بقای جریان شبکه را تضمین می‌کند. این رابطه به این معناست که مجموع جریان تمام مسیرهای بین هر مبدأ_مقصد با تقاضای سفر آن مبدأ و مقصد مساوی است. در این رابطه هم‌چنین شرط نامنفی بودن جریان ترافیکی در مسیر k ام بین مبدأ r و مقصد u درنظرگرفته شده است. رابطه (۵)، نشان‌دهنده این است که جریان ترافیکی در جاده a ام برابر مجموع جریان در تمام مسیرهایی است که جاده a ام در آن قرار دارد. در این رابطه، $\delta_{a.k}^{ru}$ یک متغیر باینری است که در صورتی که مسیر k ام شامل جاده a ام باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود. $t_a(fr_a)$ در رابطه (۶)، زمان سفر در جاده a ام را با توجه به جریان جمع شده در این جاده، نشان می‌دهد که توسط تابع عملکردی اداره معابر عمومی[۱۳] نشان داده شده است.

۲-۳- تعیین ظرفیت ایستگاه‌های شارژ براساس نظریه صف

نظریه صف، شامل مطالعه ریاضی صف‌های انتظار و فرآیندهای تصادفی مربوط به آن می‌شود. نظریه صف اغلب برای تجزیه و تحلیل ریاضی پیامد ورود تصادفی مشتریان جهت دریافت خدمت از سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. درشبکه قدرت نیز می‌توان از این نظریه در اتصال تصادفی خودروهای الکتریکی به شبکه و مسأله شارژشدن آن‌ها استفاده کرد[۲۷,۲۸].

پس از به‌دست آمدن جریان ترافیک تعادلی هر مسیر، تحلیل حرکت تصادفی خودروها و تعیین ظرفیت ایستگاه‌های شارژ با استفاده از نظریه صف انجام می‌گیرد. سیستم خدمت‌دهی ایستگاه‌های شارژ، به عنوان یک سیستم صف M/M/S در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های خدمت‌دهی صف مطابق نماد اختصاری کندال[۱۴] (A/B/C) نشان داده می‌شوند که نماد A نشان دهنده توزیع بین هر دو ورود متوالی می‌باشد. از آن‌جایی که زمان رسیدن هر خودرو به ایستگاه شارژ یک متغیر تصادفی است، در این مقاله ورود این خودروها به صورت یک توزیع پواسون در نظر گرفته شده است. عبارت دوم، B، بیان‌گر توزیع مدت زمان خدمت‌دهی می‌باشد که فرض بر این است زمان خدمت‌دهی، از توزیع‌های یکسانی پیروی می‌کند و سومین عبارت تعداد سرویس‌دهنده‌ها (در این‌جا شارژرهای یک ایستگاه شارژ سریع) را نشان می‌دهد [۱۷].

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند پواسون، مقدار میانگین آن می‌باشد که نشان دهنده تعداد رویدادهای تصادفی رخ داده در واحد زمان است. با توجه به این‌که حجم بالای جریان ترافیکی نشان دهنده احتمال بالای خودروهای متقاضی دریافت شارژ است، میانگین تعداد خودروهای الکتریکی درحال رسیدن به ایستگاه‌های شارژ در یک بازه زمانی $(\lambda_{k.t})$ را می‌توان با استفاده از معادله (۷) محاسبه نمود [۱۱].

$$\lambda_{k.t} = H\omega\varepsilon_t \frac{fn_{k.t}}{\sum_{k\epsilon\mho} fn_{k.t}} / \Delta t \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، $fn_{k.t}$ از طریق مجموع fr_a مربوط به همان مسیر به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده جریان ترافیکی در گره k و دوره زمانی t می‌باشد. مقادیر H، ω و ε_t به ترتیب نشان‌دهنده زمان معمول شارژ روزانه خودروهای الکتریکی در منطقه برنامه‌ریزی، نرخ میانگین شارژ روزانه در ایستگاه شارژ و ضریب جریان ترافیکی در زمان t است که نرخ شارژ روزانه را نشان می‌دهد. بنابراین اگر λ_k^{RH} (که در رابطه (۹) آورده شده است) به عنوان آهنگ ورود خودروها به ایستگاه شارژ کاندید k ام در ساعت اوج تردد تعریف شود، می‌توان ظرفیت ایستگاه‌های شارژ را با فرض مستقل بودن μ_q از آهنگ ورود خودروها، براساس فرآیند پواسون و توزیع نمایی مدت زمان خدمت‌دهی هر دستگاه از سیستم صف M/M/S با استفاده از مسأله بهینه‌سازی زیر محاسبه نمود[۸]:

$$\min z_k \qquad (۸)$$

$$\lambda_k^{RH} = max\left\{\lambda_{k.t} = H\omega\varepsilon_t \frac{fn_{k.t}}{\sum_{k\epsilon\mho} fn_{k.t}} / \Delta t \right\} \qquad (۹)$$

$$\text{s}\cdot\text{t} \quad w_k^{RH} < W^{allowed} \qquad (۱۰)$$

$$w_k^{RH} = \frac{\left(z_k\rho_k^{RH}\right)^{Z_K}\rho_K^{RH}}{\lambda_K^{RH}(z_k!)(1-\rho_k^{RH})^2}\pi_{k.0}^{RH} \qquad (۱۱)$$

$$\pi_{k.0}(t) = \left[\sum_{n=0}^{Z_K-1}\frac{(z_k\rho_{k.t})^n}{n!} + \frac{(z_k\rho_{k.t})^{z_k}}{(z_k!)(1-\rho_{k.t})}\right]^{-1} \qquad (۱۲)$$

در مدل پیشنهادی تعداد z_k دستگاه شارژ، در ایستگاه شارژ مورد مطالعه قرار دارد و خودروهای ورودی به هر ایستگاه شارژ یک صف واحد را تشکیل داده و خودرو متقاضی دریافت شارژ با خالی شدن هر دستگاه شارژ خودرو خود را شارژ می‌کند. با افزایش تعداد دستگاه‌های شارژ می‌توان مدت زمان انتظار در صف را کاهش داد. به طور کلی خدمت‌دهی مناسب شارژ و تسهیل خدمات می‌تواند به صورت قابل توجهی ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی را افزایش دهد. اما از طرف دیگر افزایش تعداد دستگاه‌های شارژ، موجب افزایش سرمایه‌گذاری در طرح می‌شود که از نقطه نظر اقتصادی مناسب نمی‌باشد. بنابراین به منظور نصب بهینه ایستگاه‌های شارژ، از یک معیار برای درنظرگرفتن آستانه تحمل مشتریان، $W^{allowed}$، برای شارژ در هر ایستگاه شارژ استفاده می‌شود؛ به این صورت که اگر زمان انتظار مشتری از یک مدت زمان مشخصی بیشتر گردد، مشتری ایستگاه شارژ را ترک خواهد کرد، که به صورت رابطه (۱۰) مدلسازی شده است.

در رابطه (۱۱)، $\pi_{k.t}(t)$ و $\pi_{k.0}^{RH}$ به ترتیب نشان دهنده، احتمال نبودن مشتری در ایستگاه شارژ k ام در ساعت t و زمان اوج تردد می‌باشد و این رابطه زمان انتظار در صف خودروها را در زمان اوج تردد نشان می‌دهد. رابطه (۱۲)، احتمال نبودن مشتری در ایستگاه شارژ k ام در ساعت t را نشان می‌دهد. همچنین $\rho_{k.t}$ و ρ_K^{RH} در روابط بالا ضریب بهره‌وری هر ایستگاه شارژ را در زمان t و زمان اوج تردد نشان می‌دهد. مقدار $\rho_{k.t}$ در زمان‌های مختلف متفاوت است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۸]:

$$\rho_{k.t} = \frac{\lambda_{k.t}}{z_k\mu_q} \qquad (۱۳)$$

از آن‌جایی که به‌دست آوردن توابع معکوس و راه‌حل مستقیم رابطه (۱۱) کار پیچیده‌ای است، بنابراین برای حل آن، از یک روش شمارش استفاده می‌شود [۱۱]. در این روش، برای مکان‌های کاندید ایستگاه‌های شارژ با توجه به ماکزیمم $\lambda_{k.t}$ در دوره‌های زمانی، یک مقدار اولیه برای تعداد دستگاه‌های شارژ تخصیص داده می‌شود. در هر تکرار یک واحد به تعداد دستگاه‌های شارژ اضافه و w_k^{RH} محاسبه می‌شود و مقدار آن با $W^{allowed}$ مقایسه می‌گردد. این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که $w_k^{RH} \le W^{allowed}$ شود. مقدار z_k به‌دست‌آمده تعداد مقرون به صرفه دستگاه‌های شارژ خواهد بود. حدود بالا و پایین تعداد دستگاه‌های شارژ در فرآیند تعیین اندازه ایستگاه شارژ طبق رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$Z^{min} \le Z_k \le Z^{max} \quad \forall k \in \Omega^{FCS} \qquad (۱۴)$$

پس از به‌دست‌آوردن اندازه هر ایستگاه (تعداد دستگاه‌های شارژ)، می‌توان از طریق حاصل‌ضرب توزیع احتمالی خودروهایی که به صورت هم‌زمان در زمان t شارژ می‌شوند، $\beta_{k.t}$، و نرخ شارژ دستگاه‌های شارژ سریع، ρ^{FCS}، که ثابت فرض می‌شود، تقاضای شارژ ایستگاه‌های شارژ سریع، $P_{k.t}^{FCS}$، را با استفاده از رابطه (۱۵) به‌دست آورد[۸]:

$$P_{k.t}^{FCS} = \beta_{k.t}\cdot\rho^{FCS} \qquad (۱۵)$$

$$\beta_{k,t} = \begin{cases} \left(\dfrac{\lambda_{k.t}}{\mu_q}\right)^n \dfrac{\pi_{k.0}(t)}{n!} & n < z_k \\ \left(\dfrac{\lambda_{k.t}}{\mu_q}\right)^{z_k} \dfrac{\pi_{k.0}(t)}{z_k!\,(1-\rho_{k.t})} & n = z_k \end{cases} \qquad (۱۶)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

۳- فرمول‌بندی و روش حل مسأله

۳-۱- توابع هدف و قیود

در این قسمت توابع هدف و قیود در نظر گرفته شده برای مسأله برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ معرفی می‌شود. هدف اصلی در این‌مسأله بهینه‌کردن توابع هدف مالک ایستگاه شارژ و شرکت توزیع می‌باشد. توابع هدف و قیود در نظرگرفته شده مسأله، به شرح معادلات (۱۷) تا (۲۸) است:

$$OF^{Disco} = R^{Disco}(P^{FCS}.\beta^{FCS}) - C^{Disco}(P^{FCS}) \quad (۱۷)$$

$$R^{Disco} = \beta^{FCS} \sum_{k\in\Omega^{FCS}} \sum_{t\in T} P_{k.t}^{FCS} \quad (۱۸)$$

$$C^{Disco} = \sum_{k\in\Omega^{FCS}} \sum_{t\in T} \beta_t^{up} (P_{k.t}^{FCS} + P_t^{loss-WFCS} - P_t^{loss-WOFCS}) \quad (۱۹)$$

$$P_t^{Loss} = \sum_{ij\in\Omega f} G_{ij}(V_{i.t}^2 + V_{j.t}^2 - 2V_{i.t}\, V_{j.t}\, cos\theta_{ij}) \quad (۲۰)$$

$$OF^{FCS} = R^{FCS.Sell}(P_{k.t}^{FCS}) - C^{FCS.inv}(P_{k.t}^{FCS}) - C^{FCS.En}(P^{FCS}.\beta^{FCS}) \quad (۲۱)$$

$$C^{FCS.inv} = \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{n^{FCS}}}{(1+\varepsilon)^{n^{FCS}}-1} \sum_{k\in\Omega^{FCS}} u_k(a^{CHF}Z_k + a_k^{LS}Z_k + a_k^F) \quad (۲۲)$$

$$R^{FCS.Sell} = \beta^{sell} \sum_{k\in\Omega^{FCS}} \sum_{t\in T} P_{k.t}^{FCS} \quad (۲۳)$$

$$C^{FCS.En} = \beta^{FCS} \sum_{k\in\Omega^{FCS}} \sum_{t\in T} P_{k.t}^{FCS} \quad (۲۴)$$

$$P_{i.t}^g = P_{i.t}^L + P_{i.t}^{FCS} + V_{i.t}\sum_{j\in\Omega^b} V_{j.t}(G_{ij}\cos\theta_{ij.t} + B_{ij}\sin\theta_{ij.t}) \quad (۲۵)$$
$$\forall i \in \Omega^b. \forall t \in T$$

$$Q_{i.t}^g = Q_{i.t}^L + Q_{i.t}^{FCS} + V_{i.t}\sum_{j\in\Omega^b} V_{j.t}(G_{ij}\sin\theta_{ij.t} - B_{ij}\cos\theta_{ij.t}) \quad (۲۶)$$
$$\forall i \in \Omega^b. \forall t \in T$$

$$V_i^{min} \le V_{i.t} \le V_i^{max} \quad (۲۷)$$
$$\forall i \in \Omega^b. \forall t \in T$$

$$|S_{ij.h}| \le S_{ij}^{max} \quad \forall i \in \Omega^b. \forall t \in T \quad (۲۸)$$

معادله (۱۷)، تابع هدف شرکت توزیع را نشان می‌دهد که برابر تفاضل درآمد شرکت توزیع از فروش انرژی به مالک ایستگاه‌های شارژ (معادله (۱۸)) و هزینه ناشی از خرید توان از شبکه بالادست (معادله (۱۹)) می‌باشد. هزینه خرید توان از شبکه بالادست خود شامل دو بخش است؛ بخش اول آن، هزینه مربوط به انرژی مورد نیاز ایستگاه‌های شارژ و بخش دوم آن، هزینه مرتبط با افزایش تلفات ناشی از اضافه کردن ایستگاه‌های شارژ به شبکه است. تلفات انرژی در ساعت t ام نیز از معادله (۲۰) محاسبه می‌شود. تابع هدف مالک ایستگاه‌های شارژ نیز از معادله (۲۱) محاسبه می‌شود و شامل سه بخش می‌باشد: درآمد حاصل از فروش توان به خودروهای الکتریکی (معادله (۲۳))، هزینه سرمایه‌گذاری سالانه برای نصب ایستگاه‌های شارژ (معادله (۲۲)) و هزینه خرید توان از شبکه توزیع (معادله (۲۴)). هزینه سرمایه‌گذاری ایستگاه‌های شارژ از سه بخش تشکیل شده است. دو هزینه اول در معادله (۲۲) متناسب با اندازه ایستگاه شارژ هستند: α^{CHF}، که وابسته به مکان نیست، هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات ایستگاه‌های شارژ مثل ترانسفورماتور، کابل و... می‌باشد. α_k^{LS} مربوط به هزینه‌های وابسته به مکان مانند قطعه زمین مورد نیاز برای نصب ایستگاه شارژ است. α_k^F که وابسته به اندازه ایستگاه شارژ نیست نشان‌دهنده هزینه‌های ثابت است [۸]. در معادله (۲۲) ضریب $\frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{n^{FCS}}}{(1+\varepsilon)^{n^{FCS}}-1}$ ضریب بازگشت سرمایه برای نصب ایستگاه‌های شارژ و u_k متغیر تصمیم‌گیری باینری مربوط به نصب یا عدم نصب ایستگاه شارژ در محل کاندید k ام می‌باشد. معادلات (۲۵) تا (۲۹) نشان‌دهنده قیود درنظرگرفته‌شده هستند. معادلات (۲۵) و (۲۶) قیود پخش بار و معادلات (۲۷) و (۲۸) به ترتیب مربوط به حدود ولتاژ و قید توان عبوری از خطوط می‌باشد.

۳-۲- روش حل مسأله

محدوده وسیعی از مسائل بهینه‌سازی غیرخطی، شامل متغیرهای عدد صحیح یا گسسته همراه با متغیر پیوسته می‌باشند. این دسته از مسائل بهینه‌سازی در بسیاری از کاربردهای واقعی مانند مسأله بهینه‌سازی ارائه شده در این مقاله ظاهر می‌شوند و به صورت مسائل آمیخته به عدد صحیح غیر خطی(MINLP) نمایش داده می‌شوند. برای حل مسأله لازم است مقادیر سه متغیر کنترلی مشخص شوند: محل نصب ایستگاه‌های شارژ، اندازه ایستگاه‌های شارژ در هر نقطه و قیمت انرژی تبادلی بین شرکت توزیع و مالک ایستگاه شارژ. این مسأله با در نظر گرفتن توابع هدف شرکت توزیع و مالک خصوصی ایستگاه شارژ به صورت یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه مدل می‌شود. برای به‌دست‌آوردن جواب‌های بهینه جبهه پارتو این مسأله چندهدفه، از روش محدودیت اپسیلون استفاده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

می‌شود، که توسط آن مسأله چندهدفه به یک مسأله تک هدفه تبدیل می‌گردد[۲۹]. این روش با تبدیل کردن تمامی اهداف به جز یکی از آنها به محدودیت‌ها، زیر مجموعه‌ای از اهداف تکی را تولید می‌کند. جبهه پارتو را می‌توان با تغییر بردار ε به دست آورد. بنابراین، در مسأله پیشنهادی، OF_1 بهینه می‌شود در حالی‌که OF_2 به عنوان یک محدودیت در نظر گرفته می‌شود[۲۸]:

$$OF = \max(OF_1) \qquad s\cdot t \begin{cases} OF_2 \geq \varepsilon \\ other\ constraint \end{cases} \tag{۲۹}$$

با توجه به مطالب گفته شده، مراحل روش‌حل به طور خلاصه به شرح زیر است:

۱) در مرحله اول، OF_1 با توجه به تمام محدودیت‌ها در حداکثر مقدار تنظیم شده و مقدار OF_2 که حداقل مقدار است، محاسبه می‌شود.

۲) در مرحله دوم، OF_2 با توجه به تمام محدودیت‌ها در حداکثر مقدار تنظیم شده و مقدار OF_1 که حداقل مقدار است، محاسبه می‌شود. در این مرحله حداقل و حداکثر مقادیر OF_1 و OF_2 تعیین می‌شود.

۳) در مرحله سوم، یکی از اهداف (OF_2) به عنوان محدودیت برای هدف دیگری تعریف می‌شود.

۴) با توجه به تعداد تکرارهای در نظر گرفته شده، تابع هدف درگام‌های گسسته بین حداقل و حداکثر مقدار ε تغییر می‌کند و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon = \frac{OF_1^{max} - OF_1^{min}}{number\ of\ iteration} \tag{۳۰}$$

در تکرار اول، OF_1 در حداکثر مقدار آن است و OF_2 در حداقل مقدار آن است.

۵) با افزایش OF_2 برای تکرارهای مختلف، OF_1 کاهش می‌یابد. در این مرحله، مقادیر OF_1 و OF_2 برای تکرارهای مختلف محاسبه شده و مجموعه‌ای از جبهه پارتو تولید می‌شود. با توجه به روش حل مسأله، خروجی شامل چند راه‌حل نامغلوب است، که هر یک از آنها را می‌توان به عنوان استراتژی نهایی انتخاب کرد و به اجرا درآورد.

این راه‌حل‌های نامغلوب یک جبهه پارتو را تشکیل می‌دهند. اما در نهایت تنها یک پاسخ انتخاب می‌شود. در این‌جا، برای به دست آوردن پاسخی که ضمن تأمین شرایط مساعد بهره‌برداری از شبکه، منجر به سود مناسب برای مالک ایستگاه شارژ و شرکت توزیع شود، از یک سری شاخص‌های فنی و اقتصادی استفاده شده است. بدین صورت که پاسخ‌هایی که مقدار حداقل مشخص‌شده برای این شاخص‌ها را برآورده نکنند به عنوان پاسخ نهایی انتخاب نخواهند شد. شاخص‌های در نظر گرفته شده به شرح زیر هستند:

۳-۲-۱- شاخص‌های فنی

- **شاخص پروفیل ولتاژ کلی**[۱۵]: این شاخص معیاری برای مشخص کردن مقدار انحراف ولتاژ از مقدار نامی آن می باشد[۲۰]:

$$TVPI = \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{t=1}^{24} |V_{rated} - V_{i.t}| \tag{۳۱}$$

$$TVPI_{pu} = \frac{TVPI_{with\ FCS}}{TVPI_{without\ Fcs}} \tag{۳۲}$$

- **شاخص پایداری ولتاژ کلی**[۱۶]: شاخص پایداری در نظر گرفته شده به شرح معادله (۳۵) است[۳۱]:

$$VSI_{i.t} = {V_{i.t}}^4 - 4\left[\hat{P}_{i.t}^L \cdot X_b - \hat{Q}_{i.t}^L \cdot R_b\right]^2 - 4\left[\hat{P}_{i.t}^L \cdot R_b + \hat{Q}_{i.t}^L \cdot X_b\right]^2 \cdot {V_{i.t}}^2 \tag{۳۳}$$

$$TVSI = \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{t=1}^{24} VSI_{i.t} \tag{۳۴}$$

$$TVSI_{pu} = \frac{TVSI_{with\ FCS}}{TVSI_{without\ FCS}} \tag{۳۵}$$

- **شاخص تلفات کل**[۱۷]: مقدار هر واحد آن به شرح معادله (۳۷) تعریف می‌شود[۳۰]:

$$TPLI = \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{j=1}^{N_{bus}} \sum_{t=1}^{24} r_b \times I_{i.j.t}^2 \tag{۳۶}$$

$$TPLI_{pu} = \frac{TPLI_{with\ FCS}}{TPLI_{without\ FCS}} \tag{۳۷}$$

۳-۲-۲- شاخص‌های اقتصادی

به منظور ارزیابی وضعیت اقتصادی قرارداد بین مالک ایستگاه‌های شارژ و شرکت توزیع ، سه شاخص اقتصادی تعریف شده است.

- **شاخص دوره بازگشت سرمایه در بودجه‌بندی سرمایه**[۱۸]:

دوره بازگشت سرمایه به مدت زمان مورد نیاز برای بازگشت هزینه‌های سرمایه‌گذاری اشاره دارد. مقدار این شاخص یکی از عوامل بسیار مهم در تصمیم‌گیری‌های اقتصادی می‌باشد. با توجه به لیستی از سرمایه‌گذاری‌های مختلف برابر با یکدیگر، سرمایه‌گذاری که دوره بازپرداخت کوتاه‌تری دارد از نظر اقتصادی مناسب‌تر است[۳۲]. این شاخص با حل رابطه (۳۸) محاسبه می‌شود:

$$Investment\ cost - \sum_{i=1}^{pp} (cash\ inflows\ in\ i\ th\ year) = 0 \tag{۳۸}$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

- **شاخص نرخ بازده مورد انتظار[۱۹]**

مقدار بازده‌ای است که سرمایه‌گذار انتظار دارد آن را در دوره سرمایه‌گذاری کسب کند. بازده مورد انتظار معمولاً بر اساس اطلاعات مربوط به گذشته بنا شده و تضمینی برای تحقق آن وجود ندارد. از آن‌جایی که این شاخص وابسته به ریسک بازار دارایی‌ها است، طبق شرایط مختلف، متغیر است [۳۲].

- **شاخص نرخ بازده داخلی[۲۰]**

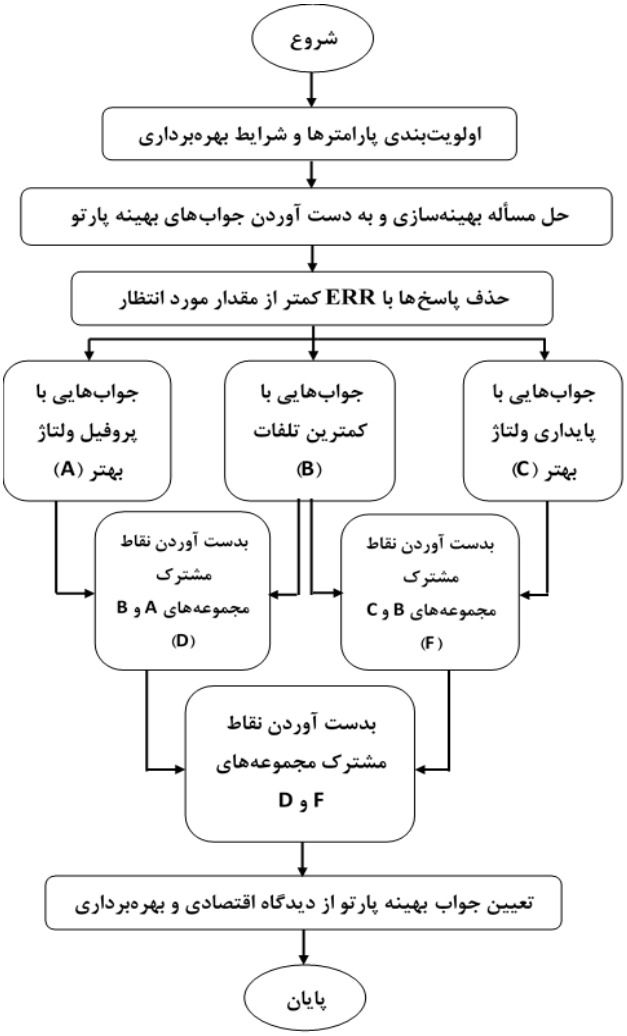
نرخ بازده‌ای است که در آن ارزش خالص فعلی هر جریان مالی برابر با صفر است[۳۲].

$$Investment\ cost - \sum_{j=1}^{N_Y}(cash\ inflows\ in\ i\ th\ year) \times \left(\frac{1+INF-R}{1+IRR}\right)^{nfcs} = 0 \qquad (۳۹)$$

روند حل مسأله در شکل(۲) نشان داده شده است. همان‌طور که ذکر شد در این مقاله، برای انتخاب پاسخ نهایی حدودی برای شاخص‌های اقتصادی و فنی در نظر گرفته شده است به طوری که رضایت هر دو طرف تأمین گردد. با توجه به شاخص‌های تعریف شده، فرض می‌شود که نرخ بازده مورد انتظار و دوره بازپرداخت با توجه به توافق مالک ایستگاه شارژ، مشخص شده است.

بنابراین، راه‌حل‌هایی که دارای مقدار بازده داخلی بیشتر از نرخ بازده مورد انتظار و مقدار دوره بازپرداخت کمتر از مقدار دوره بازپرداخت مد نظر مالک ایستگاه شارژ هستند،توسط مالک ایستگاه شارژ مورد پذیرش قرار می‌گیرند. به منظور ایجاد انگیزه برای صاحب ایستگاه شارژ، پاسخ‌های پارتو با مقادیر پایین بازده داخلی و با مقادیر بالای شاخص دوره بازپرداخت از مجموعه پارتو حذف می‌شوند. درنتیجه، نقاط باقیمانده توسط مالک ایستگاه شارژ قابل قبول خواهند بود. در مقابل، لازم است شاخص‌های مورد نظر شرکت توزیع نیز در نظر گرفته شود تا در کنار کسب سود مناسب شرایط بهره برداری قابل قبول نیز به دست آید. در نتیجه، در مرحله بعد، شاخص‌های بهره‌برداری معرفی شده برای هر نقطه باقیمانده محاسبه خواهد شد.

برای این‌که تمام شاخص‌ها مقدار مناسبی داشته باشند، برای هر شاخص، نیمه اول نقاط با شرایط بهتر انتخاب می‌شود. در نهایت، از میان انتخاب‌های باقیمانده، نقطه‌ای با کمترین هزینه برای شرکت توزیع انتخاب خواهد شد. در نتیجه، رضایت مالک ایستگاه شارژ و شرکت توزیع برآورده خواهد شد زیرا مالک ایستگاه شارژ سود کافی دریافت می‌کند و سود شرکت توزیع در مقایسه با حالتی که ایستگاه شارژ نصب نشود، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، شرایط بهره‌برداری شبکه نیز مناسب خواهد بود.

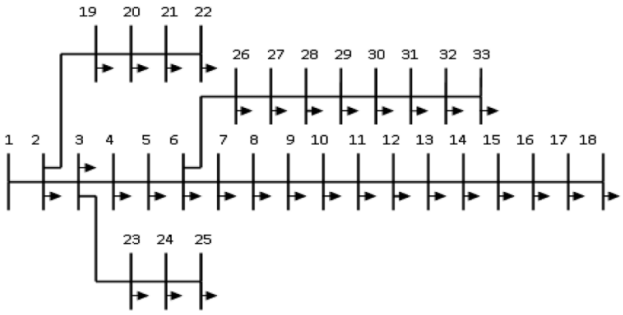


شکل (۲): روش حل پیشنهادی

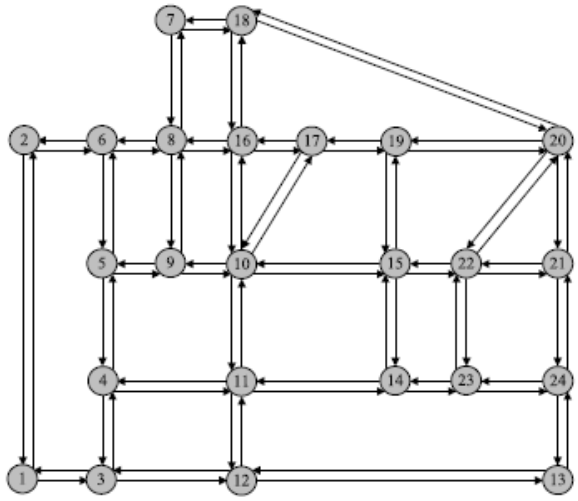
۴- نتایج شبیه‌سازی

برای پیاده‌سازی مفاهیم پیشنهادی، بررسی و ارزیابی نتایج روش ارائه شده از سیستم ۳۳ شینه‌ی IEEE (شکل(۳)) [۳۳] و شبکه ترافیک۲۴گره‌ای سوفالز[۲۱] (شکل(۴)) [۳۴]، استفاده شده است. این شبکه دارای ۷۶ مسیر، ۲۴ گره و۵۵۲ زوج مبدا- مقصد می‌باشد. بارهای موجود در شین‌های مختلف شبکه توزیع دارای منحنی بار ۲۴- ساعته مطابق شکل(۵) می‌باشند. این شبکه دارای سطح ولتاژ ۱۲.۶۶ کیلو ولت می‌باشد و از پست موجود در باس۱ تغذیه می‌شود. سایر اطلاعات این شبکه در [۳۳] موجود است. مکان‌های کاندید برای نصب ایستگاه‌های شارژ و هزینه‌های سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ در هریک از این نقاط در جدول (۲) ارائه شده است [۸].

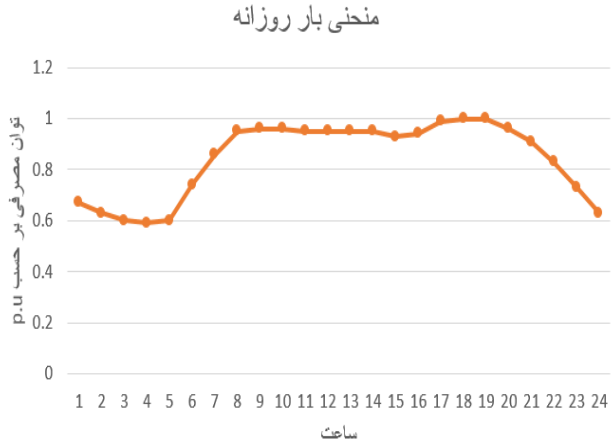
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]



شکل (۳): روش شبکه IEEE ۳۳ باسه مورد مطالعه



شکل (۴): شبکه ترافیک سوفالز ۲۴ گره ای مورد مطالعه



شکل (۵): نمودار بار روزانه مصرف کنندگان شین‌های شبکه

ظرفیت باتری خودروهای الکتریکی و توان شارژ هر نازل براساس استاندارد IEC61851 به‌ترتیب برابر ۲۰ کیلووات‌ساعت و ۴۴کیلووات در نظر گرفته شده است. همچنین بر طبق استاندارد IEC 61851-1، سطح ۳ شارژ برای ایستگاه‌های شارژ سریع انتخاب شده است. به علاوه، برای قیمت خرید انرژی از شبکه بالادست از تعرفه سه نرخی زمان استفاده شامل زمان‌های پرباری، میان‌باری و کم‌باری (جدول(۳)) استفاده شده است[۴]. سایر اطلاعات مورد نیاز در جدول (۴) ذکر شده است. پروفیل ساعتی جریان ترافیکی ماتریس O-D در شکل (۶) نشان داده شده است. هم‌چنین اطلاعات مربوط به ماتریس تقاضا در مرجع [۳۴] موجود است.

جدول (۲): هزینه‌های سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ

مکان‌های کاندید	۱	۲	۳	۴	۵
گره شبکه ترافیک	۱۲	۳	۱۰	۱۵	۱۸
شماره باس	۵	۱۰	۲۰	۲۵	۳۲
$[10^4 US\$]c^{CHF}$	۸/۰	۸/۰	۸/۰	۸/۰	۸/۰
$[10^4 US\$]c_i^{LS}$	۴/۰	۴/۲	۳/۲	۳/۶	۴/۰
$[10^4 US\$]c_i^{F}$	۴۰	۴۲	۳۲	۳۶	۳۸

جدول (۳): قیمت خرید توان از شبکه بالادست در طول روز

زمان در روز	قیمت ($/kWh)
پرباری (۲۰-۱۴)	۰/۵
میان‌باری (۱۴-۷ و ۲۲-۲۰)	۰/۲
کم‌باری (سایر زمان‌ها)	۰/۱۵

جدول (۴): مقدار پارامترهای مدلسازی

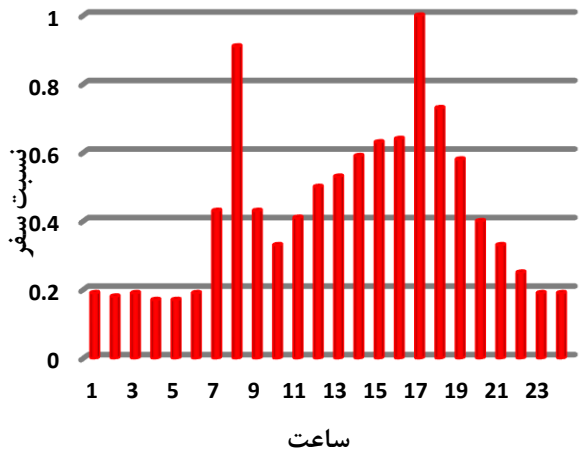
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
z_{min}	۶	$w^{allowed}$	۵ دقیقه
z_{max}	۱۰	ε	۰/۱
H	۳۶۰۰	ω	۰/۲
b	۰/۱۵	V	۱
r^{FCS}	۱۰	*INF-R*	۰/۰۵

همچنین قیمت فروش انرژی توسط ایستگاه‌های شارژ (γ^{sell}) برابر با ۰/۲۶ دلار بر کیلووات‌ساعت می‌باشد. مسأله بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از حل‌کننده SBB در برنامه GAMS حل شده است. سود مالک ایستگاه شارژ و شرکت توزیع وابسته به یکدیگر هستند. بنابراین، خروجی شامل چند راه‌حل نامغلوب است که هر یک از آنها را می‌توان به عنوان استراتژی نهایی انتخاب کرد و به اجرا درآورد. مجموعه بهینه پارتو که شامل راه‌حل‌های نامغلوب می‌باشد، در شکل (۷) نشان داده شده است. محور افقی جبهه پارتو سود مالک ایستگاه شارژ سریع را نشان می‌دهد و محور عمودی نشان‌دهنده‌ی سود شرکت توزیع می‌باشد.

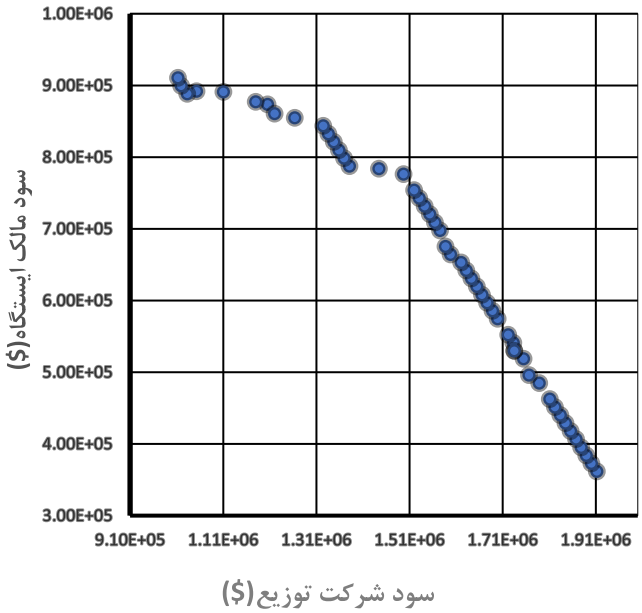
با توجه به این‌که در عمل تنها یک راه‌حل اجرا می‌شود، لازم است از یک روش مناسب برای انتخاب راه‌حل نهایی استفاده شود. برای پیدا کردن راه‌حل بهینه، مقادیر مختلف بازده مورد انتظار در نظر گرفته شده و راه‌حل بهینه برای هر مقدار بازده بر اساس فلوچارت شکل (۲) انتخاب شده است. اطلاعات مربوط به هر راه‌حل در

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

جدول (۵) نشان داده شده است. در این جدول، برای هر بازده مورد انتظار، مقدار شاخص‌های بهره‌برداری، شاخص‌های اقتصادی، سود مالک ایستگاه شارژ و سود شرکت توزیع آورده شده است.



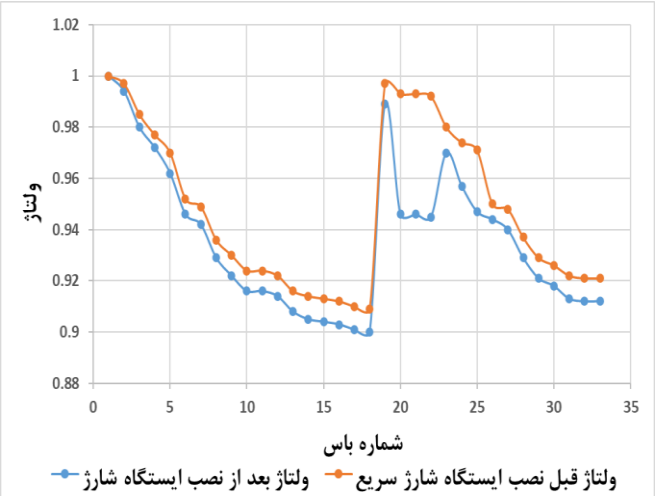
شکل (۶): پروفیل ساعتی جریان ترافیکی ماتریس O-D



شکل (۷): جبهه پارتو

علاوه براین، اندازه ایستگاه‌های شارژ سریع، مکان‌های بهینه آن‌ها و مقدار قیمت انرژی تبادلی نشان داده شده است. از آن‌جایی‌که نرخ بهره در نظر گرفته شده ۱۰٪ می‌باشد، مقدار بازده مورد انتظار باید بیشتر از ۱۰٪ باشد، تا سود حاصل از سرمایه‌گذاری رضایت مالک را فراهم نماید. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، شاخص بازده داخلی همیشه بالاتر از بازده مورد انتظار مربوطه است. این واقعیت سیاست‌های انگیزشی که در روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد تا سرمایه‌گذاران را به سرمایه‌گذاری بیشتر در پروژه‌های ایستگاه‌های شارژ سریع تشویق کند. علاوه بر این، طبق داده‌های موجود در این جدول، بین راه حل بهینه و بازده مورد انتظار ارتباط خاصی وجود ندارد، به عنوان مثال، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای بازده مورد انتظار ۱۵٪ و ۲۰٪ در جدول (۵)، تنها یک راه حل معتبر است؛ با این حال، برای مقادیر دیگر بازده مورد انتظار، بیش از یک راه‌حل به دست می‌آید. دلیل آن این است که هیچ کدام از نقاط با بازده داخلی بین ۱۵٪ و ۲۰٪ دارای شاخص‌های بهره‌برداری مناسب در مقایسه با نقاط دیگر نیستند. بنابراین، برای بازده مورد انتظار در بازه‌ی ۱۵٪ تا ۲۰٪، تنها یک نقطه با شاخص‌های بهره‌برداری و اقتصادی قابل قبول وجود دارد، و این نقطه تنها راه‌حل خواهد بود تا زمانی که بازده مورد انتظار کمتر از ۲۰٪ باشد. پس از این مقدار بازده مورد انتظار، راه‌حل بهینه تغییر می‌یابد و نقطه بهینه‌ای متفاوت با شرایط اقتصادی مناسب‌تر به دست می‌آید.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از روش پیشنهادی نه تنها مالک ایستگاه شارژ سود مورد انتظار خود را دریافت می‌کند، سود شرکت توزیع نیز در مقایسه با حالتی که ایستگاه‌های شارژ نصب نشوند افزایش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به اینکه حضور ایستگاه‌های شارژ اختلالاتی نظیر افزایش تلفات و افت ولتاژ را به همراه دارد، با استفاده از روش پیشنهادی پروفیل ولتاژ و شاخص افزایش تلفات در حد قابل قبولی قرار گرفته است. پروفیل ولتاژ شبکه پس از نصب ایستگاه‌های شارژ در شکل(۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود که ولتاژ باس‌های مختلف شبکه پس از نصب ایستگاه‌های شارژ در بازه قابل قبول قرار دارد. کمترین مقدار ولتاژ در باس ۱۸ است؛ زیرا باس ۱۸ در انتهای یک فیدر بلند است که بارهای زیادی را تغذیه می‌کند. در نتیجه جریان قابل توجهی از این فیدر عبور کرده و این جریان باعث افت ولتاژ بیشتر می‌شود. وضعیت باس ۳۳ هم مشابه باس ۱۸ است و مقدار ولتاژ این باس هم پایین است.



شکل (۸): پروفیل ولتاژ

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

جدول (۵): خلاصه نتایج شبیه‌سازی

بازده مورد انتظار(%)	%۱۵	%۲۰	%۲۵
سود شرکت توزیع($)	۱،۴۹۷،۵۲۶	۱،۴۹۷،۵۲۶	۱،۳۲۴،۹۴۵
سود مالک ایستگاه شارژ($)	۷۷۶،۰۶۱	۷۷۶،۰۶۱	۸۴۳،۳۰۹
مکان بهینه نصب	[۵،۲۰،۲۵]	[۵،۲۰،۲۵]	[۱۰،۲۰،۲۵]
اندازه هر ایستگاه شارژ	[۶،۶،۹]	[۶،۶،۹]	[۸،۶،۹]
مبلغ قرارداد($)	۰/۱۶۱	۰/۱۶۱	۰/۱۶۰
TVPI	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۷۱
TVSI	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۸۷
TPLI	۱/۴۴	۱/۴۴	۱/۸
PP(سال)	۶/۶۶	۶/۶۶	۶/۰۹۹

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن توابع هدف مالک ایستگاه شارژ و شرکت توزیع ارائه شده‌است. اندازه ایستگاه‌های شارژ از طریق تخصیص ترافیک و با استفاده از نظریه صف محاسبه شده است و مکان نصب ایستگاه‌های شارژ و هم چنین قیمت قرارداد طرفین به نحوی مشخص شده‌اند که سود شرکت توزیع و مالک ایستگاه حداکثر شود. مسأله با استفاده از یک روش مبتنی بر محدودیت اپسیلون حل و پاسخ نهایی با توجه به شاخص‌های فنی و اقتصادی انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش ارائه شده می‌تواند به عنوان روش مناسبی برای برنامه‌ریزی نصب ایستگاه‌های شارژ با یک سیاست محرک مناسب به منظور تشویق سرمایه‌گذاران استفاده شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، با استفاده از روش پیشنهادی، نه تنها مالک ایستگاه شارژ و شرکت توزیع به سود قابل قبول دست پیدا می‌کنند، بلکه با توجه به در نظر گرفتن شاخص‌های فنی و بهره‌برداری شبکه، جواب به دست‌آمده از لحاظ فنی نیز مناسب است.

همچنین با توجه به فضای حاکم بر ایران و افزایش سیاست‌های خصوصی‌سازی در صنعت برق و سایر بخش‌ها احتمالاً در آینده صاحبان ایستگاه‌های شارژ ارگان‌های خصوصی خواهند بود. بنابراین روش ارائه شده در این مقاله، قابلیت پیاده‌سازی در سیستم برق ایران را دارا می‌باشد.

در کارهای آینده می‌توان توابع هدف سایر ارگان‌ها یا صاحبان خودروهای الکتریکی را در مسأله در نظر گرفت.

فهرست علائم

۱. مجموعه ها

مجموعه باس‌های شبکه	Ω^b
مجموعه گره‌های کاندید نصب ایستگاه‌های شارژ در شبکه حمل و نقل	$\mho$
مجموعه گره‌های شبکه حمل و نقل	NT
مجموعه نقاط کاندید برای نصب ایستگاه شارژ	Ω^{FCS}
مجموعه بازه های زمانی (۲۴ ساعت)	T

۲. هزینه ها و درآمدها

هزینه مربوط به تجهیزات مورد نیاز برای احداث ایستگاه شارژ	a^{CHF}
هزینه ثابت در باس k	a_k^F
هزینه وابسته به مکان و اندازه ایستگاه شارژ در باس k	a_k^{LS}
هزینه سرمایه‌گذاری	$C^{FCS.inv}$
هزینه شرکت توزیع ناشی از اضافه کردن ایستگاه شارژ	C^{Disco}
درآمد شرکت توزیع ناشی از فروش انرژی	R^{Disco}
قیمت خرید انرژی از شبکه بالادست در ساعت t	β_t^{up}
درآمد مالک ایستگاه شارژ از فروش انرژی	$R^{FCS.Sell}$
هزینه خرید توان از شبکه توزیع	$C^{FCS.En}$
قیمت خرید انرژی توسط مالک از شرکت توزیع	β^{FCS}
قیمت فروش انرژی توسط مالک	β^{sell}

۳. پارامترهای شبکه

کنداکتانس بین فیدر i و j	G_{ij}

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

بار باس i در ساعت t	$P_{i.t}^{L}$
توان مصرفی ایستگاه k ام در ساعت t	$P_{k.t}^{FCS}$
میزان تولید در باس i در ساعت t	$P_{i.g}^{g}$
کل تلفات شبکه در ساعت t	P_{t}^{Loss}
تلفات شبکه در حضور ایستگاه‌ها در ساعت t	$P_{t}^{loss-WFCS}$
تلفات شبکه بدون حضور ایستگاه‌ها در ساعت t	$P_{t}^{loss-WOFCS}$
اختلاف فاز باس‌های i و j در ساعت t	$\theta_{ij.h}$
ظرفیت توان ظاهری فیدر ij	S_{ij}^{max}
ولتاژ باس i	V_i
حدود پایین و بالای ولتاژ	$V_i^{min}.V_i^{max}$
مقاومت و راکتانس خطوط	$X_b.R_b$
فاصله بین ایستگاه‌ها شارژ در گره m و n	d_{m-n}
حداقل فاصله مجاز بین هر جفت ایستگاه	d^{min}
ضریب اصلاح فاصله	ξ
نرخ میانگین شارژ روزانه در ایستگاه‌های شارژ	ω
زمان معمول شارژ وسایل نقلیه در منطقه برنامه‌ریزی	H
ضریب جریان ترافیکی نرمال در زمان t	ε_t
طول عمر ایستگاه شارژ	r^{FCS}
میانگین زمان انتظار در صف	w_k^{RH}

۵. سایر پارامترها و متغیرها

تعداد باس‌های شبکه	N_{bus}
تعداد ایستگاه‌های شارژ	N^{FCS}
اندازه ایستگاه شارژ k ام	Z_k
حد بالای اندازه ایستگاه شارژ	Z^{max}
حد پایین اندازه ایستگاه شارژ	Z^{min}
جریان ترافیکی در جاده a	fr_a
زمان سفر در جاده a	$t_a(fr_a)$
جریان ترافیک در مسیر k بین مبدأ و مقصد	fp_k^{ru}
جریان کل ترافیک بین جفت مبدأ و مقصد	q_{ru}
متغیر باینری، در صورتی که مسیر k ام شامل جاده a ام باشد، ۱ و در غیر صورت صفر	$\delta_{a.k}^{ru}$
میانگین تعداد خودروهای الکتریکی درحال رسیدن به ایستگاه‌های شارژ در یک بازه زمانی	$\lambda_{k.t}$
مجموع fr_a مربوط به همان مسیر	$fn_{k.t}$
متغیر تصمیم‌گیریی باینری برای نصب ایستگاه شارژ	u_k
احتمال نبود هیچ مشتری در ایستگاه شارژ در ساعت t	$\pi_{k.0}(t)$

۶- مراجع

[۱] شفابخش غلامعلی، شاه حسینی امیر، "آنالیز حساسیت جریان ترافیک بزرگراه‌های برون شهری نسبت به عوامل هندسی مسیر" ، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۲، صفحه ۵۳-۶۴، پاییز ۱۳۹۴.

[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] 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.

[4] Zheng, Y., Dong, Z.Y., Xu, Y., Meng, K., Zhao, J.H., Qiu, J., "*Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning"*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, no.1, pp. 221-229, 2014.

[5] Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., and Kazemi-Karegar, H., *"Optimal fast charging station placing and sizing"*, Applied Energy, Vol. 125, pp. 289-299, 2014.

[6] Zhang, H., Hu, Z., Xu, Z., and Song, Y., *"An Integrated Planning Framework for Different Types of PEV Charging Facilities in Urban Area"*, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.7, no.5, 2015.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Wang, G., Xu, Z., Wen, F., and Wong, K.P., *"Traffic-Constrained Multi-objective Planning of Electric-Vehicle Charging Stations"*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, no.4, pp. 2363-2372, 2013.

[10] Guo, S., Zhao, H., *"Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective"*, Applied Energy, Vol. 158, pp. 390-402, 2015.

[11] 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.

[12] Awasthi, A., Venkitusamy, K., Padmanaban, S., Selvamuthukumaran, R., Blaabjerg, F., Singh, A.K., *"Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm"*, Energy, Vol. 15, no. 133, pp. 70-78, 2017.

[13] Zhang, H., Moura, S., Hu, Z., Song, Y., *"PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks"*, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.9, no.4, pp.2595-2605, 2018.

[14] Dong, X., Mu, Y., Jia, H., Wu, J., and Yu, X., *"Planning of Fast EV Charging Stations on a Round Freeway"*, IEEE

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

Transactions on Sustainable Energy, Vol. 7, No.4, pp.1452-1461, 2016.

[15] Zhang, H., Moura, S.J., Hu, Z., Qi, W., Song, Y., *"A Second Order Cone Programming Model for Planning PEV Fast-Charging Stations"*, IEEE Transactions on power Systems, Vol.33, no.3, pp.2763-2777, 2018.

[۱۶] مرادی محمدحسن، مظفر مصطفی رضایی، محمدعلیزاده پرهام، "جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر و ایستگاه شارژ خودروی برقی به صورت همزمان با استفاده از الگوریتم بهینه سازی GA-PSO"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، دوره ۱۵، شماره ۴، صفحه ۲۵۸-۲۶۸،زمستان ۱۳۹۶.

[۱۷] آقاپور راضیه ، سپاسیان محمدصادق، "ارائه یک مدل احتمالاتی برای جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع"، نشریه علمی پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، دوره ۶، شماره ۱۲، صفحه ۱۱-۲۴ ،۱۳۹۶.

[۱۸] آزاد مهران، قاینی محسن، "ارائه روش جدید برای جایابی ایستگاه‌های شارژ سریع خودرو برقی در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، فصل نامه عصر برق، دوره ۴، شماره ۷، صفحه ۱۶-۲۰، ۱۳۹۶.

[۱۹] ساداتی سید محمد باقر، مشتاق جمال و شفیعی خواه میعادرضا، " تاثیر خودروهای الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار بر بهره‌برداری بهینه از شبکه‌ی توزیع در چهارچوب یک مدل دو سطحی جدید"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، ، صفحه ۴-۴، پاییز ۱۳۹۷.

[20] Ameli, A., Bahrami, S., Khazaeli, F., and Haghifam, M. R., *" A multiobjective particle swarm optimization for sizing and placement of DGs from DG owner's and distribution company's viewpoints"*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.29, no.4, 1831-1840,2018.

[۲۱] حدادمقدم حسین، دیدبان عباس، " بهینه‌سازی زمان سفر با ناوگان حمل و نقل عمومی شهری با استفاده از مدل‌سازی با شبکه‌های پتری"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، صفحه ۶-۶، پاییز۱۳۹۷.

[22] Wardrop, J.G., *"Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*", Proceedings of the institution of civil engineers , vol.1, pp.325-362,1952.

[۲۳] مدرس محمد، تیموری ابراهیم، **نظریه صف**، چاپ ششم، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران ، ۱۳۹۳.

[24] Beckmann, M., McGuire, C., and Winsten, C.B., *Studies in the Economics of Transportation*, Studies in the Economics of Transportation, No.226 pp, 1956.

[25] Sheffi, Y., *"Urban transportation network: equilibrium analysis with mathematical programming methods"*, Prentice Hall, 1985.

[26] Xiang, Y., Liu, J., et al, *"A traffic flow based planning strategy for optimal siting and sizing of charging stations"*, IEEE PES Asia-Pacific power and energy conference, Brisbane, Australia, pp. 1–5, 2015.

[27] 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.

[28] 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.

[29] Abapour, S., Nojavan, S., and Abapour, M., *"Multi-objective short-term scheduling of active distribution networks for benefit maximization of DisCos and DG owners considering demand response programs and energy storage system"*, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 6, no.1, pp.95-106, 2018.

[30] Moradi, M.H., and Abedini, M., *"A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems"*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 34, no. 7, pp. 66–74, 2006.

[31] Charkravorty, M., and Das, D., *" Voltage stability analysis of radial distribution networks"*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 23, no. 2, pp. 129–135, 2001.

[32] Neveu Raymond, P., *Fundamentals of Managerial Finance*, 3rd ed. Cincinnati, OH, USA: South-Western, 1986.

[33] 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.

[34] Gera, H.Bar., *Transportation network test problems*,2002.

[35] Shaoyun, Ge., Feng, Liang., and Liu, Hong., *"The planning of electric vehicle charging station based on grid partition method"* In Electrical and Control Engineering (ICECE), International Conference on IEEE, pp. 2726-2730,2011.

[36] Tang, X., Liu, J., Wang, X., and Xiong, J., *"Electric vehicle charging station planning based on weighted Voronoi diagram"*, In Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), International Conference on, IEEE, pp. 1297-1300,2011.

[37] Liu, Z., Zhang, W., Ji, X., and Li, K., *"Optimal planning of charging station for electric vehicle based on particle swarm optimization"* In Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia) IEEE, pp. 1-5, 2012.

[38] Jia, L., Hu, Z., Song, Y., and Luo, Z., *"Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations"* In Electric Vehicle Conference (IEVC) IEEE International, pp. 1-6, 2012.

[39] Bai, X., Chin, K. S., & Zhou, Z., *"A bi-objective model for location planning of electric vehicle charging stations with GPS trajectory data"*, Computers & Industrial Engineering, 128, pp. 591-604, 2019.

[40] Pahlavanhoseini, A., & Sepasian, M. S., (2019) *"Optimal planning of PEV fast charging stations using an auction-based method"*. Journal of Cleaner Production, p.118999, 2020.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

Multi-objective planning of charging stations considering benefits of distribution company and charging stations owners

Yusef Sahraei[1], Afshin Pahlavanhoseini[2], Mohammad Sadegh Sepasian

1.2.3 Faculty of Electrical and Computer Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

ABSTRACT: In recent years, electric vehicles have attracted significant attention due to environmental issues. Charging stations installation requires a systematic consideration of relevant issues such as determination of the location and size of charging stations. On the other hand, it is necessary to encourage private investors to invest in charging stations installations and to provide proper conditions for them so that they can profit from their investment. In this paper, the fast charging station (FCS) planning problem is modeled as a mixed integer nonlinear programming (MINLP), in which the objective function of distribution company (DISCO) and FCS owner (FCSO) have been considered, separately. In the proposed model, the location and size of FCSs as well as the price of transacted energy between DISCO and FCSO are determined, such that the objective functions of DISCO and FCSO are optimized. In the proposed method, queuing theory and user equilibrium based traffic assignment model are used to determine the size of FCSs. Then, the problem of multi-objective planning of FCSs has been investigated, considering the objectives of DISCO and FCSO. In addition, the final solution is chosen from the Pareto front solutions based on the economic and operational indices. Finally, the efficiency of the proposed method is demonstrated by numerical results.

Keywords: Electric vehicles, Fast charging station planning , private investors, Queuing theory, ε_constraint

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.4.6]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.341]

۷- زیرنویس‌ها

[1] Genetic algorithm
[2] Particle swarm optimization
[3] Improved differential evolution algorithm
[4] Crossover entropy algorithm
[5] Screening
[6] Primal- dual interior point
[7] Queueing Theory
[8] Bargaining Theory
[9] e-constraint
[10] Pareto front
[11] Origin–Destination
[12] System Optimization (SO) assignment model
[13] Bureau of Public Roads
[14] Kendal
[15] Total Voltage Profile Index (TVPI)
[16] Total Voltage Stability Index (TVSI)
[17] Total Power-Loss Index (TPLI)
[18] Payback Period
[19] Expected Rate of Return (ERR)
[20] Internal Rate of Return (IRR)
[21] Sioux falls