Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 16, No. 02, 2025
pp. 39- 52
Research Paper

Planning the Optimal Replacement of Fast Charging Stations for Electric Vehicles in Distribution Networks Considering the Impact of EV User's Behavior

Amin Rafrafi [1], Alireza Sobouhi [*2], Abolfazl Pirayesh Neghab [3]

[1] Dept. of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran
[2] Dept. of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran
[3] Dept. of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

Abstract:
The use of electric vehicles (EVs) as an emerging sector in transportation is effective in reducing global warming. In this paper, the optimal replacement of a fast charging station (FCS) considering the impact of EV users' behavior is investigated. The behavior of users is investigated to reduce the charging demand in EVs due to the long driving distance to reach the station. In this article, the nature of the charging behavior of EV users is considered as a fixed point equation, which is calculated by establishing a relationship between the distance entry rate, and its spatial and temporal penalty. The optimal deployment of fast charging stations is modeled by a non-linear exact optimization problem that will determine the optimal locations for FCS construction. A proposed method based on a genetic algorithm is presented to solve this problem. The simulation results prove the effectiveness of the proposed algorithm in maximizing the profit for the FCS construction company, considering the power grid constraints.

Keywords: Elastic Demand, Fast Charging Station, Genetic Algorithm, Optimization.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

https://doi.org/10.22108/ISEE.2025.141183.1684

مقاله پژوهشی

برنامه‌ریزی جایابی بهینهٔ ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن تأثیر رفتار کاربران EV

امین رفرفی[۱]، علیرضا سبوحی*[۲]، ابوالفضل پیرایش نقاب[۳]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
a_rafrafi@sbu.ac.ir

۲- استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
a_sobbouhi@sbu.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
A_Pirayesh@sbu.ac.ir

چکیده: استفاده از وسایل نقلیهٔ الکتریکی (EV)ها، به عنوان یک فناوری نوظهور در حوزهٔ حمل‌ونقل، نقشی به‌سزا در کاهش روند گرمایش جهانی ایفا می‌کند. در این پژوهش، مسئلهٔ استقرار بهینهٔ ایستگاه‌های شارژ سریع (FCS) با در نظر گرفتن تأثیر رفتار کاربران EV بررسی شده است. از آنجا که مسافت طولانی تا رسیدن به ایستگاه شارژ ممکن است باعث کاهش تقاضای شارژ در EVها شود، مدل‌سازی رفتار شارژ کاربران از اهمیتی ویژه برخوردار است. در این مطالعه، رفتار شارژ کاربران به صورت یک معادلهٔ نقطه‌ثابت در نظر گرفته شده است که در آن، با در نظر گرفتن نرخ ورود فاصله‌ای، جریمهٔ مکانی و زمانی محاسبه می‌شود. مسئلهٔ استقرار بهینهٔ FCS با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی صحیح غیرخطی فرمول‌بندی شده است که هدف آن تعیین مکان‌های بهینه برای ساخت FCS است. برای حل این مسئله، یک الگوریتم مبتنی بر ژنتیک پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی توانایی زیادی در بیشینه کردن سود شرکت متولی ساخت FCS (CSP)، با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکهٔ برق، دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، ایستگاه‌های شارژ سریع، بهینه‌سازی، رفتار کاربران EV، خودروهای الکتریکی.

۱- مقدمه

افزایش استفاده از وسایل نقلیهٔ الکتریکی (EV)[۱] ها به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای مقابله با چالش‌هایی همچون گرمایش جهانی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی مطرح شده است [۱]. پیشرفت‌های اخیر در فناوری خودروهای برقی تحولاتی شگرف را در صنعت حمل‌ونقل ایجاد کرده‌اند. از جملهٔ مزایای این فناوری می‌توان به کاهش جالب توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود پایداری شبکهٔ برق در مواجهه با نوسانات تولید انرژی‌های تجدیدپذیر اشاره کرد [۲]. با توجه به مزایای متعدد خودروهای برقی، تلاش‌هایی گسترده برای تشویق جامعه به استفادهٔ بیشتر از این نوع وسایل نقلیه انجام شده است. یکی از عوامل کلیدی در افزایش پذیرش خودروهای برقی، تأمین آرامش خاطر کاربران در طول سفر است. دسترسی محدود به ایستگاه‌های شارژ سریع یکی از دغدغه‌های اصلی کاربران EVها محسوب می‌شود [۳]. از سوی دیگر، افزایش تقاضای برق ناشی از شارژ گستردهٔ خودروهای برقی، چالش‌هایی جالب توجه را برای

[۱] تاریخ ارسال مقاله : ۱٤۰۳/۰۲/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله : ۱٤۰۳/۱۱/۲۸
نام نویسنده مسئول : علی رضا سبوحی
نشانی نویسنده مسئول: ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده برق

شبکه‌های توزیع برق به همراه دارد [۴]. گسترش ایستگاه‌های شارژ سریع (FCS)[۲] یکی از گام‌های اساسی برای ترویج استفاده از EVها است. استقرار بهینهٔ FCSها نه فقط می‌تواند موانع پیش‌روی فروش EVها را کاهش دهد، بلکه دسترسی آسان کاربران به این ایستگاه‌ها را نیز تضمین می‌کند [۵]. از سوی دیگر، برنامه‌ریزی بهینهٔ سیستم‌های ترکیبی، به ویژه در حوزهٔ EVها، با هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری انجام می‌شود. با توجه به محدودیت ظرفیت باتری EVها و برد کمتر آن‌ها نسبت به خودروهای بنزینی، برنامه‌ریزی بهینه برای شارژ EVها از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردار است و می‌تواند انگیزه‌ای قوی برای کاربران برای انتخاب این نوع خودروها باشد [۶]. با این حال، استقرار FCSها تفاوت‌های اساسی با استقرار پمپ بنزین‌ها دارد. از آنجا که EVها به دلیل محدودیت ظرفیت باتری، برد کمتری نسبت به خودروهای بنزینی دارند، پراکندگی نامناسب FCSها می‌تواند دسترسی کاربران EV را با مشکل مواجه کند. علاوه بر این، زمان شارژ طولانی‌تر EVها نسبت به خودروهای بنزینی، ضرورت وجود تعداد کافی FCS را دوچندان می‌کند. کمبود FCS و افزایش زمان انتظار برای شارژ ممکن است به کاهش تمایل کاربران به استفاده ازEVها منجر شود [۷]. به عبارت دیگر، تفاوت‌های موجود بین وسایل نقلیهٔ بنزینی وEVها مستلزم طراحی و استقرار متفاوت FCSها است.

دو موضوع زیر چالش‌هایی جدید را برای استقرار FCSایجاد می‌کنند که مستلزم اتخاذ رویکردی متفاوت و فراتر از رویه‌های سنتی هستند:

۱. نگرانی کاربران EV در رابطه با فاصلهٔ زیاد تاFCSها و در نتیجه محدودیت در مسافت پیمایش [۸]،

۲. نگرانی کاربران EV از پربودن FCSها (FCSهای پربار همیشه کمتر ترجیح داده می‌شوند) [۹].

در نتیجه، شرکت‌های ارائه‌دهندهٔ خدمات شارژ (CSP) تحت فشار زیادی قرار خواهند گرفت تا با اتخاذ تصمیم‌های هوشمندانه دربارهٔ استقرار FCSها، تعادلی میان ارائهٔ خدمات باکیفیت به مشتریان و بیشینه کردن سود خود برقرار کنند. به‌تازگی، پژوهش‌هایی گسترده برای حل چالش‌های استقرار FCSها انجام شده‌اند. پژوهشگران عمدتاً بر روی بهینه‌سازی هزینه‌ها و بهبود کیفیت خدمات تمرکز کرده‌اند. برای مثال، مطالعهٔ [۱۰] با هدف کاهش هزینه‌ها، به دنبال تعیین کمترین تعداد FCSهایی بود که بتوانند تمام مسیرهای شبکهٔ حمل‌ونقل را پوشش دهند. در مطالعهٔ [۱۱]، چارچوبی دقیق‌تر ارائه شد که در آن، هزینه‌های مربوط به شبکهٔ برق، از جمله هزینهٔ تنظیم ولتاژ و گسترش شبکهٔ توزیع، به طرزی جامع‌تر بررسی شدند؛ با این حال، در این مطالعات، درآمد CSP به طور صریح ارزیابی نشد. در همین راستا، مطالعهٔ [۱۲] مسئلهٔ استقرار FCSرا به عنوان یک مسئلهٔ بهینه‌سازی گسسته فرموله کرد و هدف آن کمینه کردن مسافت پیموده‌شده توسط کاربران EVبرای رسیدن به ایستگاه‌های شارژ بود، به شرط آنکه کل منطقهٔ تقاضا تحت پوشش قرار گیرد. مطالعهٔ [۱۳] نیز با تمرکز بر کاهش زمان انتظار برای شارژ، هزینه‌های ساخت و تأثیر جریان ترافیک بر استقرار FCS را بررسی کرد. مطالعهٔ [۱۵] فرایند برنامه‌ریزی ایستگاه‌ها را با هدف بیشینه کردن سود طرفین بررسی کرد، اما به رفتار کاربران EVتوجهی نداشت. خلاصهٔ نتایج مطالعات مختلف در جدول (۱) ارائه شده است.

اگرچه مطالعات پیشین بر کاهش مسافت پیموده‌شده تا ایستگاه‌های شارژ یا کاهش زمان انتظار برای شارژ تمرکز داشته‌اند، همگی از این فرض اولیه برخوردار هستند که تقاضای شارژ در یک مکان ثابت باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، مدل‌های موجود عمدتاً برای پاسخ‌گویی به تقاضای شارژ ایستا طراحی شده‌اند. این ویژگی در واقعیت بسیار رایج است، اما چارچوب‌های مدل‌سازی موجود را با چالش جدی مواجه می‌کند. در این پژوهش، تمرکز بر حل مسئلهٔ استقرارFCS ها با در نظر گرفتن تأثیر رفتار دینامیک کاربران EV بر تقاضای شارژ است. هدف اصلی یافتن بهترین مکان برای استقرار FCSها به منظور بیشینه کردن سود CSP و در عین حال، حفظ کیفیت زیاد خدمات ارائه‌شده به کاربران است. برای حل این مسئله، الگوریتم ژنتیک (GA)[۳] به کار گرفته شده است تا کاربران EV بر اساس داده‌های موجود به خوشه‌هایی مختلف تقسیم شوند و سپس، ایستگاه‌ها به هر خوشه اختصاص یابند. این

رویکرد نـه فقـط محاسـبات را بهینـه‌تر می‌کنـد، بلکـه بـه مدل‌سازی واقع‌بینانه‌تری از رفتار کاربران نیز کمک می‌کند. به طور خلاصه، ایـن پـژوهش بـا هـدف بهبـود مـدل‌های استقرار FCS و ارائهٔ راه‌حل‌های عملی برای ایـن چـالش، تأثیر رفتار دینامیک کاربران EV بر تقاضای شـارژ و ارائـهٔ یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تعیین مکان بهینهٔ FCSها را بررسی کرده است.

جدول (۱): خلاصهٔ نتایج مطالعات مختلف

مرجع	مدل‌سازی اقتصادی برای CSPها	در نظر گرفتن کاربران به عنوان منطقه (مسئلهٔ خوشه‌بندی)	مدل‌سازی رفتار کاربران EV از نظر مسافت
[۷]	✓	✗	✗
[۸]	✗	✗	✗
[۹]	✗	✗	✓
[۱۰]	✗	✗	✓
[۱۲]	✓	✗	✗
طرح پیشنهادی	✓	✓	✓

به طور کلی، مراحل این مقاله به شرح زیر هستند:

- این مقاله، با در نظر گرفتن رفتار تصادفی کـاربران EV، بـه صـورت احتمـالاتی مسـئلهٔ اسـتقرار FCSهـا را بررسی می‌کند. برای توصـیف دقیـق‌تر رابطـهٔ بـین تعـداد ایستگاه‌های شارژ و برنامهٔ بهینهٔ استقرار آن‌ها، یـک معادلـهٔ نقطه‌ثابت ارائه شده است که بـا اسـتفاده از روش نیـوتن ـ رافسون[۴] حل می‌شود.
- مسئلهٔ استقرار بهینهٔ FCSها به عنوان یـک مسـئلهٔ بهینه‌سازی عدد صحیح غیرخطی پیچیده فرمول‌بندی شـده است. با توجـه بـه پیچیـدگی ایـن مسـئله، یـک الگـوریتم ابتکاری نوآورانه برای تعیین بهینهٔ مکـان FCSهـا پیشـنهاد شده است. نتایج شبیه‌سـازی تـأثیر روش پیشـنهادی را در بهبود سود و کاهش احتمال از دست دادن مشتری‌ها نشـان می‌دهد. علاوه بر این، اهمیت رفتار کاربران EV بر استقرار FCSها نشان داده شـده اسـت. ادامـهٔ ایـن مقالـه بـه ایـن صورت است که جزئیات مدل سیستم در بخش دوم آورده شده اسـت. در بخـش سـوم، مسـئلهٔ اسـتقرار بهینـهٔ FCS فرموله شده و یک الگوریتم کارآمد برای حـل آن پیشـنهاد شـده اسـت. در بخـش چهـارم، نتـایج عـددی رویکـرد پیشنهادی آورده شده است و در نهایت، در بخـش پـنجم، نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- مدل‌سازی پیشنهادی

در این بخش، مدل سیستم برای مسـئلهٔ اسـتقرار FCS ارائه شده است. در این مدل، هر کاربر EV در یک منطقـهٔ خـاص قـرار دارد. شـرکت ارائه‌دهنـدهٔ خـدمات شـارژ ایستگاه‌هایی را در برخی از منـاطق مسـتقر کـرده اسـت و کاربران EV از مناطق مختلف، نزدیک‌ترین ایستگاه را برای شارژ انتخاب می‌کنند.

۲-۱- ساختار FCS

فرض می‌شود:

I مجموعه‌ای از مناطق تقاضا باشد که:

$$I = \{1, 2, \ldots, i, \ldots, I\}$$

J مجموعه‌ای از مکان‌های نامزد FCS:

$$J = \{1, 2, \ldots, k, \ldots, K\}$$

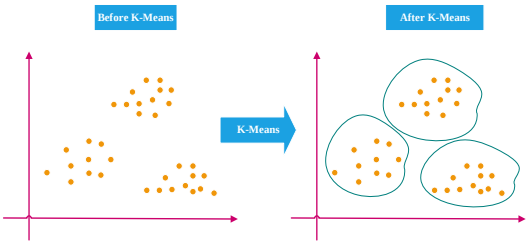
تقاضای شارژ در منطقهٔ i با استفاده از توزیـع پواسـون خواهد بود که با نرخ λi توزیع می‌شود.

بردار تقاضا به‌صورت $\lambda = (\lambda 1, \lambda 2, \ldots, \lambda I)$ تعریف شده است.

در ادامه، مسائل پیش‌رو، نحوهٔ استفاده از آن‌ها و روابط بین آن‌ها را به طور مفصل‌تر تشریح خواهیم کرد.

۲-۱-۱- الگوریتم K-Means

در این پژوهش، برای دسـته‌بندی دقیـق و منطقه‌بنـدی کاربران EV، از الگوریتم سـادهٔ K-means اسـتفاده شـده است [۱۶]. این الگوریتم بر اساس یک فرایند تکرارشونده عمل می‌کند و هدف آن تقسیم داده‌ها به گروه‌های متمـایز و بدون هم‌پوشانی است که به هر یک از این گروه‌ها یـک خوشه گفته می‌شود. به عبارت دیگر، هر داده فقط به یـک خوشـه تعلـق دارد. شـکل (۱) نحـوهٔ کـارکرد الگـوریتم خوشه‌بندی K-means را بـه صـورت شـماتیک نمـایش می‌دهد.



شکل (۱): نحوهٔ عملکرد الگوریتم K-Means

در این مقاله، از داده‌های موقعیت مکانی یک مجموعهٔ EV که با استفاده از تولید تصادفی در نرم‌افزار متلب ایجاد شده، استفاده شده است. با بهره‌گیری از الگوریتم خوشه‌بندیK-means ، هر خودرو به یک منطقهٔ خاص (خوشه) اختصاص داده می‌شود. این خوشه‌بندی به گونه‌ای انجام می‌شود که خودروهای هر خوشه از نظر فاصلهٔ مکانی به یکدیگر نزدیک هستند و مرکز خوشه به عنوان نمایندهٔ آن خوشه در نظر گرفته شده است. برای محاسبهٔ فاصلهٔ بین خوشه‌ها از رابطهٔ (۱) استفاده شده است. در نهایت، نتایج حاصل از خوشه‌بندی K-means به عنوان ورودی یک الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در نظر گرفته شده است تا بهترین ترکیب خوشه‌ها از نظر کمترین فاصلهٔ بین خودروهای هر خوشه به دست آید.

$$WCD = \sum_{i} \sum_{x \in c_i} d(x, m_i) \qquad (۱)$$

که در آن، x همان EVها، d فاصله و m مرکز خوشه خواهد بود.

۲-۱-۲- عملکرد مسئلهٔ مکان‌یابی در مدل‌سازی

یکی از محدودیت‌های مهم در مدل‌سازی این پروژه فاصلهٔ FCSهای تا کاربران EVها است. با توجه به این محدودیت، هدف اصلی این است که ایستگاه‌هایی که از نظر مکانی از کاربران دور هستند و کاندیدای استقرار نیز محسوب می‌شوند، از لیست گزینه‌ها حذف شوند. برای رسیدن به این هدف، از رابطهٔ (۲) استفاده شده است که با در نظر گرفتن نرخ تقاضا و هزینه‌های تحمیلی، به ارزیابی مناسب بودن هر نقطه برای استقرار ایستگاه کمک می‌کند.

$$\min C_j = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i D_i^{min} \qquad (۲)$$

که در آن، C هزینهٔ هر ایستگاه و D فاصلهٔ هر منطقه تا ایستگاه خواهد بود.

۲-۲- تشریح مدل سیستم

شرکت ارائه‌دهندهٔ خدمات شارژ ابتدا برخی از نامزدها را از میان مجموعهٔ J برای ساخت FCS انتخاب می‌کند. با استفاده از راهبرد مکان‌یابی در رابطهٔ $x = (x_k)_{k \in J}$ جایی که $x_k = 1$ و k^{th} نامزد انتخاب توسط CSP باشد، منظور آن است که منطقهٔ نامزد J توسط CSP انتخاب شده است و زمانی که $x_k = 0$ ، یعنی منطقهٔ نامزد J توسط CSP انتخاب نشده است. بردار اندازه با $z = (z_j)_{j \in J}$ نشان داده خواهد شد، که در آن، z_j اندازهٔ ایستگاه (CP) (از CP برای اشاره به عنصری در زیرساخت استفاده می‌شود که انرژی الکتریکی را برای شارژ مجدد وسایل نقلیهٔ الکتریکی تأمین می‌کند؛ بنابراین، «ایستگاه شارژ» به مکانی گفته می‌شود که چندین CP در آن وجود داشته باشد.) در FCSj است.

در ادامه، CSP اندازه را تعیین می‌کند، یعنی تعداد CP برای هر FCS انتخاب خواهد شد.

۲-۲-۱- رفتار کاربران EV

مطابق مرجع [۱۷]، تمام کاربران EV در منطقهٔ i، به نزدیک‌ترین FCS تخصیص داده می‌شوند. اگر بیش از یک FCS شرط را تأمین کند، به طور تصادفی یکی از آن‌ها انتخاب می‌شود. متغیر باینری s_{ij} برای نشان دادن راهبرد انتساب معرفی می‌شود. اگر منطقهٔ i به ایستگاه j متصل شود، مقدار s_{ij} برابر یک وگرنه برابر صفر خواهد شد، یعنی:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if FCS } j \text{ is assigened to demand zone } i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۳)$$
$$\forall i \in I, j \in J$$

شکل (۲) به صورت شماتیک یک سیستم شارژ

معمولی را نمایش می‌دهد. در این سیستم، پنج منطقه با تقاضای شارژ و چهار مکان پیشنهادی برای استقرار FCSها وجود دارند. شرکت ارائه‌دهندهٔ خدمات شارژ مکان‌های ۱، ۳ و ٤ را برای ساخت FCS انتخاب و تعداد CPهای مورد نیاز در هر یک از این مکان‌ها را تعیین کرده است. در مدل پیشنهادی، فرض بر این است که تمامی کاربران EV در هر منطقهٔ تقاضا، به نزدیک‌ترین FCS مراجعه می‌کنند و شرایطی یکسان برای دریافت خدمات شارژ دارند. برای مثال، کاربران منطقهٔ ۲ به FCS شمارهٔ ۳ مراجعه خواهند کرد؛ زیرا این ایستگاه به منطقهٔ ۲ نزدیک‌تر است. علاوه بر فاصله، دو عامل مهم دیگر در انتخاب ایستگاه توسط کاربران، تعداد CPهای موجود در ایستگاه و مدت زمان انتظار در صف هستند که در ادامه، به‌تفصیل بررسی خواهند شد. به طور کلی، کاربران EV ترجیح می‌دهند به ایستگاه‌هایی با ازدحام کمتر و در عین حال، نزدیک به محل سکونت خود مراجعه کنند. تمایل کاربران به استفاده از FCSهای پربار یا دورتر کمتر است که این امر ممکن است به کاهش مشتریان و در نتیجه کاهش درآمد منجر شود. در ادامه، به صورت دقیق‌تر رفتار کاربران را بر اساس فاصلهٔ بین مناطق تقاضا و ایستگاه‌های شارژ بررسی خواهیم کرد.

شکل (۲): یک سیستم شارژ سریع معمولی [۲۰]

جریمهٔ مسافت: $\mathcal{P}_{ij}^{D}$ احتمال آن را نشان می‌دهد که یک کاربر در منطقهٔ i به FCSj مراجعه کند. به عبارت دیگر، این جریمه احتمال انحراف کاربران از مسیر بهینه (نزدیک‌ترین مسیر) را مشخص می‌کند. بدیهی است، اگر کاربران EV در منطقهٔ i به FCSj اختصاص داده شوند، $\mathcal{P}_{ij}^{D}$ باید به طور یکنواخت با افزایش فاصلهٔ بین منطقهٔ i و FCSj (d_{ij}) کاهش یابد، یعنی:

$$\mathcal{P}_{ij}^{D}=f_D(s_{ij},d_{ij}) \ , \ \forall i\in I \ , j\in J \qquad (٤)$$

بر اساس مراجع [۱۸] و [۱۹]، از تابعی که متعلق به مجموعهٔ تابع‌های {fT} است برای در نظر گرفتن تمایل کاربران EV به شارژ خوروهایشان با توجه به مسافت پیموده‌شده استفاده می‌شود.

$$\mathcal{P}_{ij}^{D}=\frac{s_{ij}}{1+\alpha_i d_{ij}} \ , \ \forall i\in I \ , j\in J \qquad (۸)$$

فرض می‌شود احتمال انتخاب FCSj توسط کاربری در منطقهٔ i، با نماد $\mathcal{P}_{ij}^{D}$ نشان داده شود. همچنین، فاصلهٔ بین منطقهٔ i و ایستگاه شارژ j را با d_{ij} نشان می‌دهیم. برای مدل‌سازی تأثیر فاصله بر تصمیم‌گیری کاربران، از یک جریمهٔ فاصله‌ای به صورت $e^{(-\alpha_i d_{ij})}$ استفاده می‌کنیم. در این رابطه، α_i یک پارامتر مثبت است ($\alpha_i = \alpha > 0, \forall i \in I$) که میزان حساسیت کاربران به فاصله را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار α، حساسیت کاربران به فاصله بیشتر می‌شود. با در نظر گرفتن این جریمهٔ فاصله‌ای، می‌توان میزان کل ورودی به FCSj را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$G_j=\sum_{i\in I}\lambda_i\mathcal{P}_{ij}^{D} \ , \ \forall j\in J \qquad (٦)$$

۳- استقرار بهینهٔ FCS

در این بخش، ابتدا مسئلهٔ استقرار بهینهٔ FCS فرموله و سپس، یک الگوریتم برای حل آن پیشنهاد می‌شود. برای هر FCSj انتخاب‌شده، یک دورهٔ مشاهدهٔ Δt در نظر گرفته و درآمد FCS بر این اساس در رابطهٔ (٦) توصیف می‌شود:

$$U_j=p.\Delta E.\ G_j.\Delta t \ , \ \forall \ j\in J \qquad (٦)$$

که در آن، ΔE انرژی به‌دست‌آمده در یک فرایند شارژ است. $p = p_c - p_e$ تفاوت بین قیمت هر واحد شارژ و هزینهٔ هر واحد برق است که فرض می‌شود برای تمام FCSها یکسان است. هزینهٔ FCS به طور کلی شامل هزینهٔ ساختمان و هزینهٔ عملیاتی است؛ با این حال، از آنجا که

هزینهٔ عملیاتی به طور عمده شامل هزینهٔ برق نیز است، چنین هزینه‌ای به طور ضمنی در رابطهٔ (۷) لحاظ شده است؛ بنابراین، هزینهٔ در نظر گرفته‌شده در اینجا را می‌توان به صورت رابطهٔ (۷) توصیف کرد:

$$C_j = C^{cs} \quad , \forall \ j\in J \qquad (۷)$$

که در آن، c^{cs} هزینهٔ ساختمان یک ایستگاه شارژ را نشان می‌دهد که عمدتاً شامل هزینهٔ زیرساخت، هزینهٔ نیروی کار و هزینهٔ تولید برق است؛ به این ترتیب، می‌توان مسئلهٔ استقرار FCS را به شرح زیر تعریف کرد:

$$\max_{x,r} \sum_{j\in J} f_j = \sum_{j\in J} (U_j - C_j) \qquad (۷الف)$$

$$\text{s.t.}\ x_k \in \{0,1\} \ , \forall\ k\in J \qquad (۷ب)$$

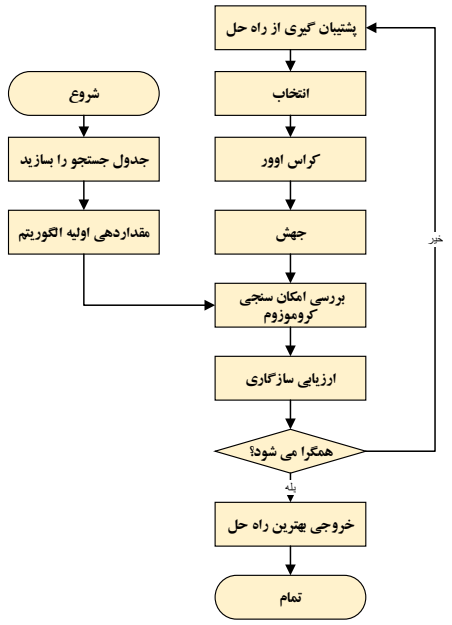
مسئله بیشینه کردن سود کل CSP است.

۱-۳- الگوریتم حل مسئله

اگر تمامی موقعیت‌های ممکن برای استقرار FCS بررسی شوند، به طور نظری می‌توان به بهترین محل برای استقرار این ایستگاه‌ها دست یافت؛ با این حال، به دلیل مسئلهٔ انفجار داده‌های ممکن برای محل استقرار ایستگاه‌ها، انجام چنین بررسی جامعی از لحاظ محاسباتی بسیار طولانی و عملاً غیرممکن است؛ به همین دلیل، در این مقاله، از یک چارچوب مبتنی بر GA برای یافتن بهترین راهبرد جای‌گذاری ایستگاه‌های شارژ استفاده شده است. اجزای اصلی این الگوریتم در شکل (۳) به تصویر کشیده شده‌اند و در ادامه، به طور مفصل توضیح داده خواهند شد.

۱- برای ارزیابی کیفیت راه‌حل‌های مختلف در مسئلهٔ استقرار FCS، از GA استفاده می‌شود. در هر نسل از الگوریتم، تناسب جمعیت ارزیابی می‌شود تا بهترین راه‌حل‌ها انتخاب شوند؛ با این حال، برای رسیدن به یک جواب پایدار، معمولاً به تعداد زیادی تکرار نیاز است. اگرچه زمان اجرای هر تکرار از الگوریتم کم است، انجام صدها تکرار ممکن است زمان‌بر باشد. برای تسریع این فرایند، می‌توان از روش‌هایی مختلف مانند بهینه‌سازی کد یا استفاده از سخت‌افزارهای قدرتمندتر استفاده کرد. همچنین، می‌توان از یک جدول جست‌وجو برای ذخیرهٔ نتایج هر تکرار استفاده کرد. این جدول شامل اطلاعاتی مانند بهترین تناسب، میانگین تناسب، انحراف استاندارد تناسب و زمان اجرای هر تکرار خواهد بود. با استفاده از این جدول می‌توان روند همگرایی الگوریتم را تحلیل و در صورت لزوم، پارامترهای الگوریتم را تنظیم کرد. همچنین، می‌توان از این جدول برای مقایسهٔ عملکرد الگوریتم‌های مختلف استفاده کرد. گفتنی است، نرخ کل ورود فاصله‌ای، که به عنوان یکی از معیارهای ارزیابی راه‌حل‌ها در نظر گرفته می‌شود، به راهبرد قرارگیری ایستگاه‌های شارژ بستگی دارد. به عبارت دیگر، G_j تابعی از x است.

۲- مقداردهی اولیهٔ الگوریتم: در مقداردهی اولیه، ابتدا تمام پارامترهای الگوریتم شامل اندازهٔ جمعیت N_{pop}، نرخ بقا در انتخاب X_{sele} و احتمال جهش X_{muta} تعریف می‌شوند. پس از آن، جمعیتی از کروموزوم‌ها ایجاد می‌شود که هر یک نشان‌دهندهٔ یک انتخاب ممکن در میان تمام مکان‌های نامزد FCS است. در این قسمت، کروموزوم توسط راهبرد قرار گرفتن x مشخص شده است.



شکل (۳):: نمودار چگونگی الگوریتم حل مسئله

۳- بررسی امکان‌سنجی کروموزوم‌ها: برای هر کروموزوم، ابتدا G_j برای هر FCS انتخاب‌شده با توجه به x محاسبه و سپس سود P_j^{max} به نوبهٔ خود پیدا می‌شود.

اگر هیچ منطقه‌ای ایستگاه کاندید را با توجه به قیود تعریف‌شده انتخاب نکند، آنگاه x_j به صفر تبدیل خواهد شد که نشان‌دهندهٔ غیرقابل قبول بودن آن است. این فرآیند تا زمانی تکرار می‌شود که هر FCS انتخاب‌شده قابل قبول باشد، یعنی کروموزوم خود امکان‌پذیر است.

٤- ارزیابی سازگاری: در این قسمت کیفیت هر کروموزوم از جمعیت ارزیابی خواهد شد. معمولاً سه مرحله را دنبال می‌کنیم:

الف- نرخ کل ورود فاصله‌ای هر $\mathrm{FCS_j}$ (G_j) انتخاب‌شده را با توجه به کروموزوم x محاسبه می‌کنیم.

ب- برای محاسبهٔ سود کل برنامهٔ استقرار فعلی، که معادل مقدار سازگاری کروموزوم فعلی است، از رابطهٔ (۷الف) استفاده می‌شود.

۵- بررسی معیارهای توقف: در هر تکرار از الگوریتم، پس از ارزیابی سازگاری جمعیت، شرط همگرایی بررسی می‌شود. اگر الگوریتم به همگرایی رسیده باشد، بهترین راه‌حل موجود تا آن مرحله به عنوان جواب نهایی انتخاب و الگوریتم متوقف می‌شود؛ در غیر این صورت، الگوریتم به تکرار بعدی می‌رود. تشخیص همگرایی الگوریتم همیشه آسان نیست. یکی از روش‌های متداول برای توقف الگوریتم تعیین تعداد مشخصی تکرار است. به عبارت دیگر، الگوریتم تا رسیدن به تعداد مشخصی تکرار N_{round} اجرا و سپس متوقف می‌شود. این روش در الگوریتم مدنظر نیز به کار رفته است.

٦-پشتیبان‌گیری از راه‌حل: برای حفظ بهترین راه‌حل پیداشده تا کنون، در هر نسل، بهترین کروموزوم با بهترین کروموزوم نسل‌های گذشته مقایسه می‌شود. اگر کروموزوم جدید بهتر باشد، به عنوان بهترین کروموزوم جدید در نظر گرفته می‌شود. این کار مانع از دست رفتن بهترین راه‌حل در اثر عملیات‌های ژنتیکی مانند ترکیب (کراس‌اوور)[۵] و جهش می‌شود.

۷- ارزیابی: در هر نسل، کروموزوم‌هایی با سازگاری بیشتر برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند. این فرایند شبیه انتخاب طبیعی در طبیعت است. در روش انتخاب رقابتی، ابتدا بخشی از جمعیت که بهترین سازگاری را دارند، به طور تصادفی انتخاب (X_{sele}) می‌شوند. سپس، این بخش انتخاب‌شده به عنوان والدین برای تولید نسل بعدی استفاده می‌شوند. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که اندازهٔ جمعیت نسل جدید برابر اندازهٔ جمعیت نسل قبلی شود.

۸- کراس اوور: کراس‌اوور، یکی از عملگرهای اصلی در الگوریتم ژنتیک، از فرایند ترکیب ژنتیکی در موجودات زنده الهام گرفته است. در این فرایند، دو کروموزوم والدین انتخاب می‌شوند و بخشی از اطلاعات ژنتیکی آن‌ها با هم مبادله می‌شود تا دو کروموزوم فرزند جدید تولید شوند .این عمل مشابه ترکیب ژن‌های والدین در تولیدمثل است .برای مثال، فرض کنید دو کروموزوم به صورت رشته‌هایی از اعداد نمایش داده شده‌اند. در کراس‌اوور، به طور تصادفی نقطه‌ای از این رشته‌ها انتخاب می‌شود و بخش‌هایی که در سمت راست این نقطه قرار دارند، با هم مبادله می‌شوند؛ به این ترتیب، فرزندان ویژگی‌هایی از هر دو والد را به ارث می‌برند. انتخاب والدین و نقطهٔ برش در کراس‌اوور معمولاً به صورت تصادفی انجام می‌شود؛ اما روش‌هایی پیشرفته‌تر نیز وجود دارند که این انتخاب را هوشمندانه‌تر انجام می‌دهند. هدف از کراس‌اوور ایجاد تنوع در جمعیت و کمک به الگوریتم برای یافتن راه‌حل‌های بهتر است.

۹- جهش: جهش مهم‌ترین مرحله و عملیات در طراحی الگوریتم است؛ زیرا عملیات اصلی برای جلوگیری از گیر افتادن یا وقفهٔ الگوریتم در یک بهینه‌سازی جزئی است. تنوع موجود در آن از جهش ژن در جهان طبیعی تقلید می‌کند. احتمال جهش (X_{muta}) تنظیم‌شده در مقداردهی اولیهٔ الگوریتم برای کنترل درجهٔ جهش استفاده می‌شود. به طور ویژه، بیت‌های $X_{muta} \times |J| \times N_{pop}$ در حین کار تغییر می‌کنند. زمانی که بیت خاصی برای جهش انتخاب شود، آن بیت را نیز تضمین می‌کند. علاوه بر این، X_{muta} برای نسل سازگار است، به طوری که هرچه تکرارهای بیشتری در الگوریتم انجام شده باشند، احتمالاً بیت‌های بیشتری جهش یافته‌اند؛ زیرا زمانی که الگوریتم به‌تدریج به همگرایی می‌رسد، نقش این عملیات برای جلوگیری از گیر افتادن الگوریتم در بهینه‌سازی جزئی بیشتر اهمیت پیدا می‌کند.

۴- شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری

در این بخش، از طریق اجرای چندین شبیه‌سازی، کارایی و عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارزیابی شده است. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی نتایج حاصل از این الگوریتم و به طور ویژه، تحلیل تأثیر الگوهای رفتاری مصرف انرژی EV و اهمیت تطابق ظرفیت شبکهٔ برق با تقاضای شارژ است.

۴-۱- تنظیمات

الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش به گونه‌ای طراحی شده است که با انواع مختلف داده‌ها، شامل داده‌های واقعی و تولیدشده به صورت تصادفی، سازگاری داشته باشد. با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های واقعی ترافیک شهری در این مطالعه، داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی به صورت تصادفی تولید شده‌اند.

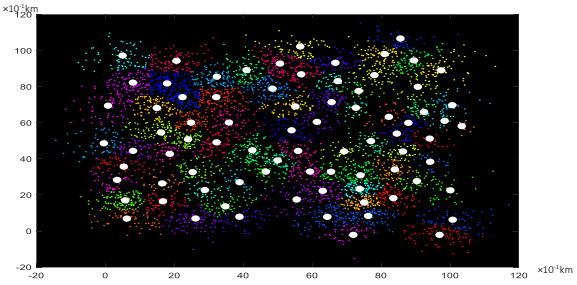
۴-۱-۱- مجموعهٔ داده‌ها

در شبیه‌سازی، مجموعه‌ای از داده‌های EVها در نظر گرفته شده است که شامل مسیر تعداد متغیری از EVها در یک ساعت است.

۴-۱-۲- پیش‌پردازش داده‌ها

الف- برای تولید مجموعهٔ داده‌های فرضی، از اطلاعات مسیرهای تخمینی EVها در شهری مانند شانگهای در بازهٔ زمانی یک‌ساعته استفاده شده است. این داده‌ها بر اساس جمعیت مناطق مختلف و با در نظر گرفتن تقاضای شارژ متغیر (λ) به مناطق تقاضا تقسیم‌بندی شده‌اند. برای هر منطقه، مجموعه‌ای از مکان‌های نامزد برای نصب FCS_j در نظر گرفته شده‌اند که توسط GA قابل انتخاب هستند.

ب- برای پیش‌پردازش داده‌ها، از یک الگوریتم خوشه‌بندی ساده استفاده شده است. همان‌طور که در بخش ۲ توضیح داده شد، این الگوریتم بر پایهٔ GA است و داده‌ها را برای مثال به ۸۰ منطقهٔ تقاضا با بیشینهٔ نرخ تقاضای شارژ متفاوت، به صورت بهینه تقسیم‌بندی می‌کند. نتایج این خوشه‌بندی در شکل (٤) نمایش داده شده است.



شکل (٤): نمونه‌ای از تقسیم EVها به مناطق مختلف با استفاده از GA

پ- تعداد مناطق تقاضا و تعداد مکان‌های نامزد FCS به‌ترتیب با N_Z و N_{FCS} نشان داده شده است. باید توجه داشت، از آنجا که مکان‌های تقاضا به طور کلی پراکنده‌تر از مکان‌های عرضه هستند، N_Z باید به طور کلی کوچک‌تر از N_{FCS} باشد.

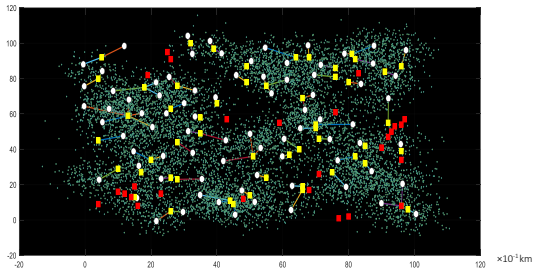
۴-۱-۳- اجرای شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در محیط MATLAB انجام می‌شود. نوع EV در نظر گرفته شده در اینجا Nissan Leaf PEV با ظرفیت باتری ٢٤ کیلووات ساعت است [٢١]. فرض بر آن است که ΔE برابر است با نیمی از ظرفیت باتری EV در نظر گرفته شده.

۴-۱-۴- کاربران GA در حل مسئله

پس از اجرای مسئله در GA، الگوریتم با هدف بهینه‌سازی مکان استقرار FCSها فعالیت می‌کند. این بهینه‌سازی با در نظر گرفتن عامل اصلی، یعنی کمینه کردن فاصله تا نزدیک‌ترین ایستگاه، انجام می‌شود و در نهایت، به بیشینهٔ سود CSP منجر می‌شود. در یکی از تنظیمات شبیه‌سازی، با استفاده از خوشه‌بندی، EVها به ۸۰ منطقه تقسیم شدند. سپس، ۸۰ موقعیت پیشنهادی برای استقرار FCS در نظر گرفته می‌شوند. GA با توجه به محدودیت‌های تعریف‌شده، تعداد بهینهٔ FCSها را مشخص و مابقی مکان‌های نامزد را حذف می‌کند. شکل (۵) نتایج این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این شکل، هر منطقه به نزدیک‌ترین FCS متصل شده است. FCSهای

منتخب با مربع‌های زردرنگ و FCSهای حذف‌شده با مربع‌های قرمزرنگ نمایش داده شده‌اند. پس از اجرای مسئله در GA، الگوریتم با هدف بهینه‌سازی مکان استقرار FCSها فعالیت می‌کند.



شکل (۵): یک نمونه از انتخاب ایستگاه‌ها توسط GA

۵-۱-۴- معیارهای عملکرد

در CSPها، طرحی که بیشترین سود را به همراه داشته باشد، مطلوب است. از سوی دیگر، کاربران EVها ترجیح می‌دهند در زمان نیاز به شارژ، FCS کم‌ترافیک و نزدیک به محل خود بیابند. بر اساس این دو عامل، می‌توان معیارهای عملکرد زیر را برای ارزیابی طرح‌های استقرار FCSها تعریف کرد:

- **سود:** کل درآمد منهای هزینه‌ها در یک بازهٔ زمانی است.
- **احتمال از دست دادن مشتری:** احتمال اینکه کاربران EV به دلیل مسافت طولانی رانندگی تا ایستگاه از شارژ کردن وسیلهٔ نقلیهٔ خود صرف‌نظر کنند.

۲-۴- تأثیر رفتار کاربران

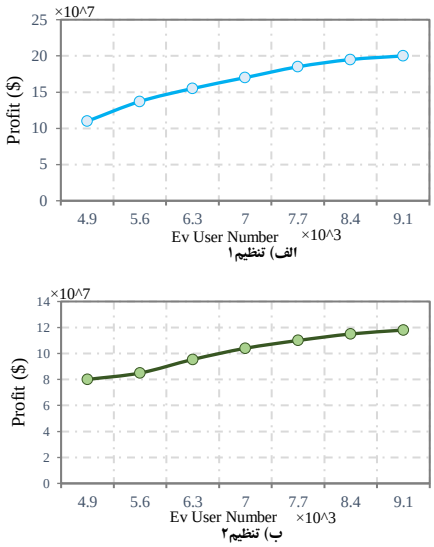
۱-۲-۴- تأثیر تنظیم دسته‌بندی

جدول (۲) دو تنظیم مختلف از پارامترهای دسته‌بندی را نشان می‌دهد و تأثیر هر یک از این تنظیمات بر نتایج نهایی را بررسی می‌کند. گفتنی است، در بخش ۲، فرض بر این بوده است که FCSها به طور گسترده در دسترس هستند و کاربران EVها نزدیک‌ترین ایستگاه شارژ را برای شارژ خودروی خود انتخاب می‌کنند. این فرض با تنظیم ۱ در جدول (۲) مطابقت دارد. در این تنظیم، مکان‌های نامزد برای استقرار FCSها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که به هر منطقهٔ تقاضا، یک ایستگاه شارژ اختصاص یابد. به عبارت دیگر، تعداد مناطق تقاضا با تعداد مناطق خدمات‌دهی FCSهماهنگ است. با کاهش N_{FCS}، همانند تنظیم ۲، شاهد افزایش چشمگیر نرخ از دست دادن مشتریان هستیم که دلیل آن افزایش مسافت بین EVها و نزدیک‌ترین FCS است. در این شرایط، کاربران مجبور هستند مسافتی طولانی‌تر را برای شارژ خودروی خود طی کنند. کاهش تعداد مشتریان به طور مستقیم بر کاهش سوددهی سیستم تأثیر می‌گذارد و در نتیجه، تعداد FCSهای احداث‌شده نیز کاهش می‌یابد؛ با این حال، باید توجه داشت افزایش تعداد ایستگاه‌های نامزد تنها عامل مؤثر بر سوددهی و میزان از دست دادن مشتریان نیست.

جدول (۲): تنظیم‌های مختلف مربوط به تقاضای الاستیک

عنوان	تنظیم ۱: $N_Z = 120$ $N_{FCS} = 350$	تنظیم ۲: $N_Z = 80$ $N_{FCS} = 80$
میانگین سود	۱/٦۷٤٤×۱۰^۸	۰/٦۸۷۵×۱۰^۸
میانگین احتمال خروج	۰/۳۵٤۸	۰/۵۹۵۱
میانگین کل FCSهای ساخته‌شده	۱۱٤	٦۰

با تقسیم کاربران EV به مناطق مختلف با استفاده از GA و روش خوشه‌بندی، می‌توانیم با افزایش تعداد مناطق، تقاضای هر منطقه را با ظرفیت FCS نزدیک به آن هم‌راستا کنیم؛ به این ترتیب، FCSها قادر خواهند بود به مناطق کوچک‌تر و با تقاضای کمتر خدمات ارائه دهند. افزایش تعداد ایستگاه‌ها به کاهش مسافت طی‌شده توسط کاربران برای شارژ خودرو منجر می‌شود و در نتیجه، احتمال از دست دادن مشتریان به دلیل طولانی بودن مسیر کاهش می‌یابد. همچنین، با توزیع بهتر تقاضا بین ایستگاه‌ها، احتمال از دست دادن مشتریان به دلیل شلوغی ایستگاه‌ها نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، سود حاصل از تنظیم ۱ حدود ۱/۷ برابر بیشتر از تنظیم ۲ است و میانگین ترک مشتری در تنظیم ۲ بیش از ۱/۸ برابر تنظیم ۱ است.

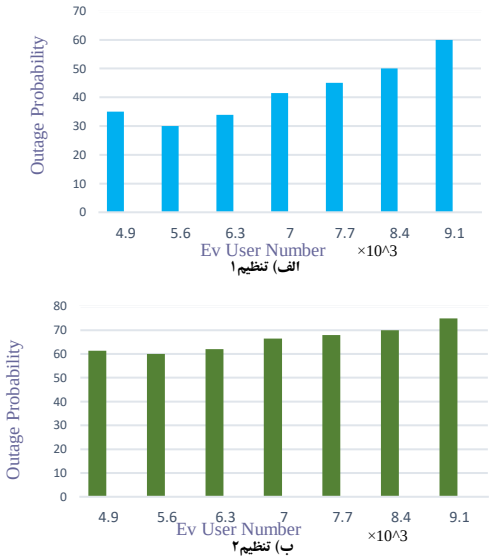


شکل (٦): میزان سود در مقابل نرخ ورود کل $\|\boldsymbol{\lambda}\|_1$

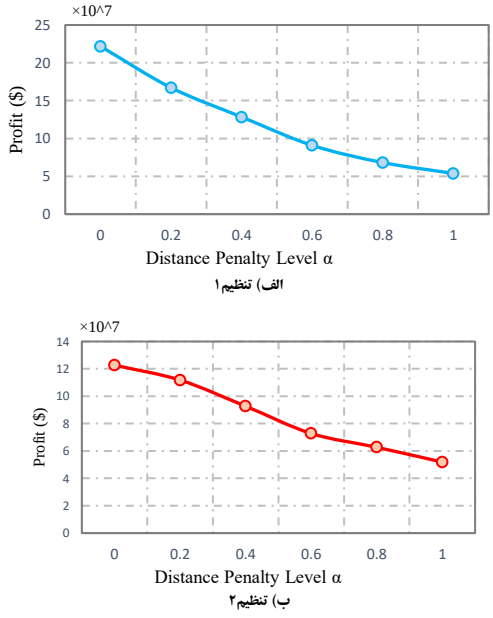
۲-۲-۴- میزان تأثیر رفتار کاربران EV

شکل‌های (٦) و (٧) تغییرات سود و میزان خسارت را با افزایش تقاضای کلی کاربران در تنظیم‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند. در شکل (٧)، مشاهده می‌شود با افزایش تقاضا، ابتدا میزان از دست دادن مشتریان اندکی کاهش می‌یابد؛ با این حال، زمانی که تقاضا از ظرفیت FCSها فراتر رود، شاهد افزایش چشمگیر میزان از دست دادن مشتریان خواهیم بود. علت اصلی این افزایش، افزایش زمان انتظار کاربران در FCS برای شارژ است. از سوی دیگر، با افزایش تقاضا، تعداد FCSها نیز افزایش می‌یابد. این امر باعث کاهش مسافت مورد نیاز برای رسیدن به نزدیک‌ترین FCS می‌شود و در نتیجه، میزان از دست دادن مشتریان به دلیل جریمهٔ مسافت کاهش می‌یابد.

شکل (٧) نشان می‌دهد با افزایش تعداد کل مشتریان، سود CSP نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که هر مشتری بالقوه می‌تواند به درآمد CSP بیافزاید؛ با این حال، هنگامی که تعداد مشتریان از یک نقطهٔ آستانه فراتر رود، روند افزایشی سود متوقف می‌شود و حتی ممکن است کاهش یابد. تحلیل مقایسه‌ای تنظیم‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد تنظیم ۱ به طور متوسط ۱/۹ برابر سودآورتر از تنظیم ۲ و میزان خسارت در آن ٦٨ درصد کمتر است. تأثیر رفتار کاربران بر استقرار FCS در شکل‌های (٨) و (٩) نشان داده شده است. در شکل (٩)، میزان از دست رفتن مشتری با افزایش سطح جریمهٔ مسافت افزایش می‌یابد. این امر بدیهی است؛ زیرا سطح جریمهٔ مسافت به این معناست که تعداد افراد بیشتری به دلیل مسافت طولانی رانندگی تا FCS، تمایلی به دریافت شارژ ندارند. این امر همچنین به کاهش سود منجر می‌شود؛ زیرا مشتری کمتر، درآمد کمتری به همراه دارد. در واقع، میزان جریمهٔ مسافت نشان‌دهندهٔ حساسیت کاربران EV به مسافت طولانی رانندگی برای دریافت شارژ است.



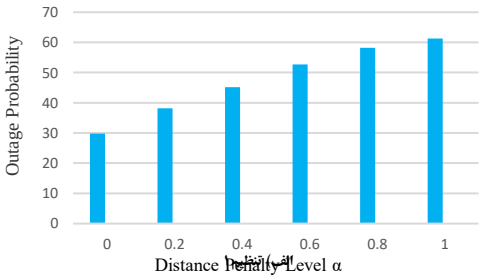
شکل (٧): میزان خسارت در مقابل نرخ ورود کل $\|\boldsymbol{\lambda}\|_1$



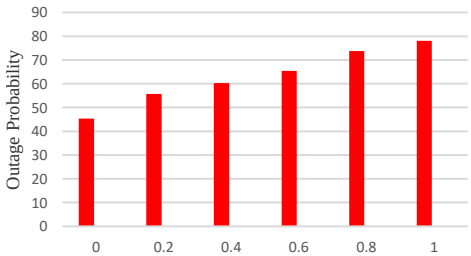
شکل (٨): میزان سود در مقابل جریمهٔ فاصلهٔ سطح α.

۵- ارزیابی عملکرد رویکرد پیشنهادی

به منظور ارزیابی کارایی رویکرد پیشنهادی، نتایج حاصل از آن با دو رویکرد پیشنهادی در مراجع [۷] و [۱۲] مقایسه شده است. مقالهٔ [۷] از روش الگوریتم مکان تصادفی (RLA) که یک روش ساده و سریع برای جایابی اولیه است، اما به دلیل عدم تضمین بهینگی، عدم استفاده از اطلاعات قبلی و وابستگی زیاد به شانس، برای حل مسائل پیچیده و با محدودیت‌های زیاد مناسب نیست، استفاده کرده است. مرجع [۱۲] از روش الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) که برای جایابی اولیه و مسائل با فضای جست‌وجوی ساده‌تر مناسب‌تر است استفاده کرده است، در حالی که GA برای مسائل جایابی با محدودیت‌های پیچیده و نیاز به اکتشاف فضای جست‌وجو به صورت گسترده مناسب‌تر است. شکل (۱۰) عملکرد قابل قبول رویکرد پیشنهادی را نسبت به این روش‌ها نشان خواهد داد. در این ارزیابی، تلاش شده است تا کارایی دو روش پیشنهادی در مراجع [۷] و [۱۲] با رویکرد پیشنهادی در بهینه‌سازی سود CSP و با در نظر گرفتن تعداد متنوع EVها مقایسه شود.

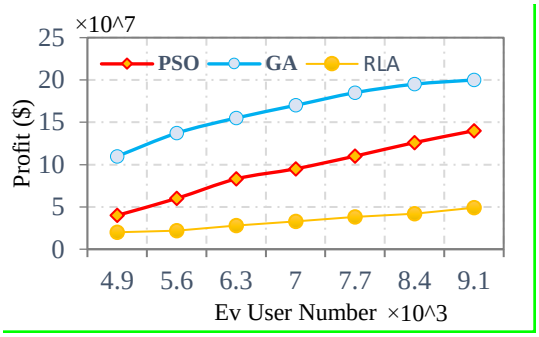


الف) تنظیم۱



ب) تنظیم۲

شکل (۹): میزان خسارت در مقابل جریمهٔ فاصلهٔ سطح α.



شکل (۱۰): مقایسهٔ عملکرد

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئلهٔ استقرار بهینهٔ FCS که شامل تقاضای شارژ الاستیک به صورت تصادفی است، بررسی شد. این مسئله به عنوان یک مسئلهٔ برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی فرموله شد که از یک الگوریتم حل مسئلهٔ مبتنی بر GA برای حل آن استفاده شد. با توجه به تقاضای شارژ و مجموعه‌ای از مکان‌های نامزد FCS، CSP می‌تواند با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و حل مسئلهٔ استقرار FCS به طور مؤثر به نتیجهٔ دلخواه برسد؛ بنابراین، مکان‌های بهینه برای ساخت FCS و تعداد بهینهٔ CPها در هر FCS انتخاب‌شده به دست می‌آیند. نتایج شبیه‌سازی اثربخشی مطالعات و روش پیشنهادی را اثبات می‌کند. در مقایسه با روش‌های متداول که در آن‌ها، فقط ساخت FCS در نزدیکی منطقه‌ای با بیشترین تقاضای شارژ در نظر گرفته شده است، رویکرد پیشنهادی می‌تواند باعث افزایش سود و کاهش خسارات به میزانی جالب توجه شود. علاوه بر این، یافته‌های اصلی دربارهٔ تأثیر تقاضای الاستیک بر اساس سه رکن پایه‌ریزی شده است.

- **رکن اول:** گسترش دادن FCSهای مستقرشدهٔ بیشتر با اندازه‌های کوچک، درآمد بیشتر و نرخ خروج کمتری را نتیجه می‌دهد که ناشی از خاصیت الاستیک تقاضای شارژ کاربران EV با توجه به مسافت رانندگی و زمان انتظار است.
- **رکن دوم:** تقاضای الاستیک تا حدی زیاد مکان‌های مطلوب FCS و اندازهٔ آن‌ها را تعیین خواهد کرد.
- **رکن سوم:** تطابق بین ظرفیت شبکهٔ برق و میزان

تقاضای شارژ نقشی مهم در بهبود سود و کاهش خسارت CSP دارد و همچنین، می‌تواند صرفه‌جویی در انرژی را در پی داشته باشد.

مراجع

[1] C. Lin, J. Zhou, C. Guo, H. Song, G. Wu, M. S. Obaidat, "TSCA: A Temporal-Spatial Real-Time Charging Scheduling Algorithm for On-Demand Architecture in Wireless Rechargeable Sensor Networks", IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 17, pp. 211–224, 2017. https://doi.org/10.1109/TMC.2017.2703094

[2] I. Goroohi Sardou, M. Shahriyari, "Power system probabilistic scheduling with electric vehicles considering renewable energy sources uncertainties", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 111–130, 2019. https://doi.org/10.22108/isee.2019.118470.1264

[3] P. Tadayon Roody, M. Ramezani, H. Falaghi, "Locating electric vehicle charging stations based on trip success in urban transportation system", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 29–40, 2020. https://doi.org/10.22108/isee.2020.122220.1351

[4] C. Shao, T. Qian, Y. Wang, X. Wang, "Coordinated planning of extreme fast charging stations and power distribution networks considering on-site storage", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 493–504, 2021. https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3016765

[5] C. Luo, Y. F. Huang, V. Gupta, "Placement of EV charging stations—balancing benefits among multiple entities", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, pp. 759–768, 2017. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2508740

[6] S. Pirouzi, "Stochastic planning of the hybrid system with wind turbine and biomass energy unit system besides battery and electric vehicles parking lot considering storage degradation", Intelligent Systems in Electrical Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 111–126, 2023. https://magiran.com/p2624348

[7] S. Davidov M. Pantoš, "Planning of electric vehicle infrastructure based on charging reliability and quality of service", Energy, vol. 118, pp. 1156–1167, 2017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.142

[8] H. Zhang, S. Moura, Z. Hu, Y. Song, "PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, pp. 2595–2605, 2016. https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2614939

[9] Z. Sun, X. Zhou, J. Du, X. Liu, "On charging station deployment with budget constraints", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 66, pp. 2915–2926, 2017. https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2593712

[10] Z. Miljanic, V. Radulovic, B. Lutovac, "Efficient placement of electric vehicles charging stations using integer linear programming", Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol. 18, pp. 11–17, 2018. https://doi.org/10.4316/AECE.2018.02002

[11] Q. Cui, Y. Weng, C. W. Tan, "Electric vehicle charging station placement method for urban areas", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, pp. 6552–6563, 2019. https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2907262

[12] Y. Qiao, K. Huang, J. Jeub, J. Qian, Y. Song, "Deploying electric vehicle charging stations considering time cost and existing infrastructure", Energies, Vol. 11, no. 9, 2018. https://doi.org/10.3390/en11092436

[13] G. Celli, F. Pilo, G. Monni, G. G. Soma, "Optimal multi-objective allocation of fast charging stations," 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp. 1–6, 2018. https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494553

[14] A. Lam, Y. Leung, X. Chu, "Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, pp. 2846–2856, 2014. https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2344684

[15] K. Gorgani Firouzjah, P. Hosseinzadeh, "Economic charging of plug-in electric vehicles at the charging station and its evaluation in distribution network considering possible scenarios", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 29–48, 2018. https://doi.org/10.22108/isee.2018.109126.1095

[16] W. G. Shepherd, "Operations research in education", Management Science, Vol. 11, No. 4, pp. 13–19, 1965. https://doi.org/10.1287/mnsc.11.4.C13

[17] A. Rajabi-Ghahnavieh, P. Sadeghi-Barzani, "Optimal zonal fast-charging station placement considering urban traffic circulation", IEEE Transactions on

Vehicular Technology, Vol. 66, pp. 45–56, 2016. https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2555083

[18] R. Aboolian, O. Berman, Z. Drezner, "Competitive facility location and design problem," European Journal of Operational Research, Vol. 182, pp. 40–62, 2007. https://doi.org/10.1080/07408170701411385

[19] D. L. Huff, "A programmed solution for approximating an optimum retail location", Land Economics, Vol. 42, pp. 293–303, 1966. https://doi.org/10.2307/3145346

[20] X. Gan, H. Zhang, G. Hang, Z. Qin, H. Jin, "Fast-charging station deployment considering elastic demand", IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 6, pp. 158–169, 2020. https://doi.org/10.1109/TTE.2020.2964141

H. Zhang, Z. Hu, Z. Xu, "An integrated planning framework for different types of PEV charging facilities in urban area", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, pp. 2273–2284, 2016. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2436069

[1] Electric Vehicles
[2] Fast Charging Station
[3] Genetic Algorithm
[4] Newton-Raphson
[5] Crossover