مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع با در نظر گرفتن شبکه حمل و نقل و درحضور منابع تولید پراکنده

رضا سعادتی [۱]، میثم جعفری نوکندی [۲] و جواد صائبی [۳]
[۱]دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، reza.saadati94@nit.ac.ir
[۲]دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، m.jafari@nit.ac.ir
[۳]دانشگاه بجنورد، j.saebi@ub.ac.ir

چکیده - استفاده از خودروهای الکتریکی به جای خودروهای احتراق داخلی، کاهش آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی را به همراه دارد. به همین منظور دولت مردان برای بهبود وضعیت زیست محیطی، تشویق به استفاده از خودروهای الکتریکی می‌شوند. در مقابل، به دلیل آنکه ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای برقی به صورت همزمان توسط تعداد زیادی از خودروها استفاده می‌شوند می‌توانند باعث اثرات منفی روی شبکه الکتریکی از جمله افزایش تلفات و افت ولتاژ شوند. لذا یافتن مکان و اندازه‌ی بهینه این ایستگاه‌ها با هدف کاهش اثرات منفی آن‌ها در شبکه یکی از چالش‌های عمده در بکارگیری گسترده خودروهای الکتریکی می‌باشد. از سوی دیگر، حضور منابع تولید پراکنده (DG) می‌تواند از این اثرات منفی بکاهد. لذا در این مقاله مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن پوشش مسیرهای حرکت خودروها در شبکه حمل و نقل در حضور DG صورت گرفته است. مدل‌سازی مسئله بر اساس برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP)[۱] صورت گرفته و از نرم افزار GAMS برای حل آن استفاده می‌شود. مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه حمل و نقل بزرگراهی که دارای ارتباط با شبکه توزیع فشار قوی است پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کاهش اثرات منفی این ایستگاه‌ها با مکان یابی مناسب ایستگاه‌های شارژ سریع و DG ها می‌باشد.

کلید واژه- خودروهای برقی، ایستگاه شارژ سریع، شبکه ترافیکی، تولید پراکنده.

۱- مقدمه

با توجه به افزایش روز افزون آلودگی ناشی از خودروهایی که با سوخت فسیلی کار می‌کنند(احتراق داخلی) و مشکلات ناشی از آن نیاز به خودروهایی که از سوخت پاک استفاده می‌کنند احساس می‌شود. کاهش منابع سوختی، نگرانی‌های زیست محیطی و همچنین پیشرفت فن‌آوری‌های سازگار با محیط زیست باعث توسعه خودروهای الکتریکی گردیده است. جهت تسهیل شارژ باتری این خودروها، باید زیرساخت‌های مناسب فراهم گردد. یکی از مهمترین زیرساخت‌های لازم، ایستگاه‌های شارژ سریع خودروها است. فراگیر شدن استفاده از خودروی برقی موجب پیدایش نیاز به ایستگاه‌های شارژ می‌شود تا بتوانند انرژی الکتریکی را به این خودروها انتقال دهند.

در چند دهه گذشته، برنامه‌ریزی جایگاه‌های سوخت بنزینی مورد مطالعه قرار گرفته و روش‌های مربوط به آن‌ها برای برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته عمده تقسیم کرد [۱]:

الف) برنامه‌ریزی مبتنی بر تقاضا
ب) برنامه‌ریزی مبتنی بر شبیه‌سازی حمل و نقل
ج) برنامه‌ریزی مبتنی بر ترافیک (مسیرهای حرکت)

هدف روش‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر تقاضا، شارژ خودروهای الکتریکی بر روی برخی از گره‌های جغرافیاییِ منطقه‌ی تحت برنامه‌ریزی است؛ به صورتی که بیشترین تقاضا در گره‌های مجاور تحت پوشش قرار گیرد. با این حال، این روش‌ها تنها فاصله‌های جغرافیایی بین گره‌های متناظر با نقاط شارژ را در نظر می‌گیرند در حالی که محدودیت‌های تراکم شبکه حمل و نقل نادیده گرفته می‌شوند. در روش‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر شبیه‌سازی حمل و نقل، برای تخمین تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها اغلب براساس داده‌های جمع‌آوری شده از

[۱] Mixed-Integer linear Programming (MILP)

سفرهای فردی به دست می‌آیند.

جمع‌آوری چنین اطلاعاتی می‌تواند برای برخی از مناطق برنامه‌ریزیِ هدف، هزینه‌بر باشد. با توجه به رفتار حرکتی (سیّار بودن) خودروهای الکتریکی، برخی از محققان روش‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر ترافیک را پیشنهاد کردند. این روش‌ها از مسیر میان مبدأ و مقصد[۱] برای تخمین تقاضاهای شارژ استفاده می‌کنند. در این روش‌ها، مدل مکان جذب جریان ترافیکی[۲] (FCLM) به کار می‌رود و هدف آن احداث تعدادی ایستگاه در یک شبکه حمل و نقل به منظور حصول بیش‌ترین جذب (پوشش) جریان ترافیکی است. در مدل FCLM محدوده رانندگی خودروهای الکتریکی در نظر گرفته نمی‌شود و فرض می‌شود که در صورت وجود حداقل یک ایستگاه شارژ در طول مسیر، کل مسیر توسط خودرو قابل پیمایش است. لذا برای شبکه‌های حمل و نقل بزرگ (بزرگراهی) FCLM قابل اصلاح به مدل مکان‌یابی برای سوخت‌گیری مجدد[۳] (FRLM) است که در آن، یک خودرو می‌تواند در یک مسیر طولانی با چند بار سوخت‌گیری به مقصد برسد که در این صورت، آن مسیر پوشش داده شده است.

در مرجع [۱] جایابی ایستگاه شارژ با در نظر گرفتن ارتباط بین شبکه‌های حمل و نقل و توزیع و با استفاده از مدل سوخت‌گیری در طی مسیر با قید ظرفیت[۴] (CFRLM) به صورت مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح پیشنهاد شده است که در آن علاوه بر مکان ایستگاه، ظرفیت ایستگاه نیز مشخص می‌شود. ناحیه جغرافیایی مورد نظر در برنامه‌ریزی، یک شبکه حمل و نقل بزرگراهی است که توسط یک شبکه توزیع فشار قوی با شعاع سرویس‌دهی وسیع تغذیه می‌شود. همچنین قیود امنیت شبکه توزیع از جمله ولتاژ گره‌ها و حد جریان عبوری از خطوط توزیع نیز در نظر گرفته شده است. تابع هدف مسئله، حداقل نمودن هزینه سرمایه‌گذاری (احداث) ایستگاه‌های شارژ با توجه به تقاضای شارژ وسایل نقلیه و همچنین هزینه‌های توسعه خطوط توزیع و ظرفیت پست‌ها است.

مرجع [۲] برنامه‌ریزی چند هدفه ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی را با در نظر گرفتن قیود شبکه ترافیکی، تلفات و انحراف ولتاژ ارائه می‌کند. در این پژوهش از مدل برنامه‌ریزی مبتنی بر FCLM به منظور بیشینه کردن سرویس‌دهی تعداد معینی از ایستگاه‌های شارژ استفاده می‌گردد. روش پیشنهادی در این پژوهش به سیستم آزمایشی شامل شبکه توزیع ۳۳ شینه و شبکه ترافیکی با ۲۵ گره اعمال شده و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی تلفات و انحراف ولتاژ شبکه را در سطح قابل قبولی حفظ کرده و پوشش مسیرهای حرکت خودروها را افزایش می‌دهد.

در مرجع [۳] تعیین مکان و ظرفیت بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن هزینه توسعه ایستگاه و هزینه‌های مورد انتظار ناشی از شارژ خودروی الکتریکی به عنوان تابع هدف پیشنهاد شده‌است. خصوصیات جغرافیایی مربوط به پست‌های الکتریکی، مسیرهای شهری و نواحی موجود در سطح شهر در این مرجع لحاظ شده‌اند. جمعیت خودروهای الکتریکی در هر ساعت در نواحی مختلف براساس اطلاعات ترافیکی در هر ساعت محاسبه می‌شود. همچنین رفتار رانندگان خودروهای الکتریکی نیز به منظور تعیین مقدار مورد انتظار تقاضای شارژ و هزینه‌های مورد انتظار مصرف‌کنندگان این خودروها مورد توجه قرار گرفته‌است. در ضمن هزینه مورد انتظار ناشی از تلفات شبکه با استفاده از پخش بار و با در نظر گرفتن بارهای شبکه به صورت سناریوهای ساعتی محاسبه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک به زمان محاسبه طولانی برای یافتن مکان و اندازه بهینه ایستگاه شارژ نیاز دارد. در حالی که الگوریتم کلونی مورچگان کارایی خوبی برای حل این مسئله دارد.

در مرجع [۴]، یک روش مکان‌یابی برای ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی و واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر انرژی خورشیدی و بادی به صورت یک مسأله مخروطی درجه دوم[۵] پیشنهاد شده است. علاوه بر این، این پژوهش تغییرات زمانی تقاضا و تولید را در نظر می‌گیرد که حل واقع گرایانه‌ای را برای این مسئله در مقایسه با نگاه استاتیک فراهم می‌کند. رویکرد پیشنهادی روی یک فیدر توزیع با اطلاعات واقعی در استانبول آزمایش شده و همچنین داده‌های هواشناسی لازم برای آن منطقه از اداره هواشناسی گرفته شده است. تابع هدف پیشنهادی، کمینه کردن هزینه‌ها، بهبود افت ولتاژ و کاهش تلفات است که با توجه به نتایج بدست‌آمده، کاهش تلفات و همچنین افت ولتاژ قابل قبول وجود دارد. در این پژوهش شبکه حمل و نقل در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۵]، با فرض این که چهار ایستگاه شارژ در شبکه ۶۹ شینه IEEE قرار دارد میزان افت ولتاژ و تلفات در شبکه با پخش بار به‌دست می‌آید. سپس با الگوریتم تجمع ذرات[۶] مکان و اندازه منابع تجدیدپذیر در این ایستگاه‌ها برای کاهش اثرات منفی بر شبکه مشخص می‌شوند. در این تحقیق تابع هدف از چهار

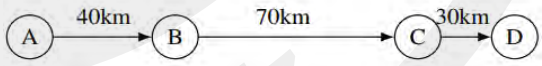
[۱] Origin-Destination (OD)
[۲] Flow-capturing Location Model (FCLM)
[۳] Flow-refueling location model (FRLM)
[۴] Capacitated Flow Refueling Location Model
[۵] Second order Conic problem
[۶] Particle Swarm Optimization (PSO)

پارامتر تشکیل شده است که عبارت‌اند از: ۱- پروفیل ولتاژ ۲- تلفات شبکه ۳- اندازه و مکان مولدهای تولید پراکنده. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده کاهش تلفات و بهبود افت ولتاژ در شبکه توزیع است. مرجع [۶] نیز جایابی و تعیین ظرفیت همزمان منابع تجدیدپذیر و ایستگاه‌های شارژ را با هدف ضریب بار بهینه، کاهش افت ولتاژ و کاهش تلفات توسط الگوریتم تکاملی تفاضلی[۱] انجام داده است.یکی از مشکلات نصب ایستگاه‌های شارژ سریع، افزایش افت ولتاژ در شبکه است. این در حالی است که حضور منابع تولید پراکنده، می‌تواند با تأمین بار مورد نیاز ایستگاه های شارژ، افت ولتاژ شبکه را کاهش دهد. لذا، در مقاله حاضر، تأثیر حضور منابع تولید پراکنده بر مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن همزمان قیود شبکه‌های الکتریکی و ترافیکی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل پیشنهادی در واقع مدل بهبودیافته‌ی مرجع [۱] با در نظر گرفتن حضور DG بوده و با استفاده از آن، جذب جریان ترافیکی در شبکه حمل و نقل افزایش می‌یابد. در بخش دوم مقاله حاضر، مدل ریاضی مسئله تشریح می‌شود. بخش سوم، به ارائه نتایج شبیه‌سازی اختصاص دارد و در بخش چهارم، به جمع بندی نتایج به دست آمده، پرداخته می‌شود.

۲- مدل ریاضی مسئله

۲-۱- مفهوم سوخت‌گیری مجدد و مکان ایستگاه‌های شارژ

در این بخش مفهوم سوخت‌گیری مجدد شرح داده می‌شود [۷] و سپس از این مفهوم برای گسترش شبکه و تخصیص ایستگاه‌ها در یک مسیر استفاده می‌شود. شکل ۱ مسیر نمونه ساده‌ای را با چهار گره A، B، C و D نشان می‌دهد.



شکل۱: یک مسیر نمونه از شبکه حمل و نقل

با فرض آن که یک وسیله نقلیه با محدوده رانندگی ۱۰۰ کیلومتر سفر خود را از A به سمت D شروع می‌کند، هدف این است که ترکیب‌های مناسب برای محل ایستگاه‌های شارژ در آن مسیر نشان داده شود. اگر یک ایستگاه شارژ در A وجود داشته باشد و خودرو بتواند باتری خود را پر کند، در بهترین حالت می‌تواند بین گره B و C برسد. بنابراین در گره B نیز باید ایستگاه شارژ باشد. این قاعده‌ی اول است که بر اساس آن، فاصله بین دو ایستگاه باید کمتر از محدوده رانندگی باشد. دومین قاعده، مقدار شارژ موجود در باتری خودرو، قبل از ورود به گره A و همچنین حداقل شارژ باقیمانده در زمان رسیدن به گره D (مقصد) است که مقدار هردو، پنجاه درصد فرض شده است [۸]. با توجه به این قواعد، ترکیبات $\{A,B,C,D\}$، $\{A,B,C\}$، $\{A,B,D\}$، $\{B,C,D\}$،$\{B,D\}$ و $\{B,C\}$ می‌توانند به عنوان ترکیب های قابل قبول برای نصب ایستگاه و سوخت‌گیری در طول مسیر نمونه، انتخاب شوند.

۲-۱-۱- مسئله تخصیص ایستگاه برای مسیر نمونه

در این قسمت، مدلی ریاضی برای مسئله‌ی تعیین محل ایستگاه های شارژ در طول یک مسیر معرفی می‌شود [۷]. این کار با توسعه یا گسترش مسیر ترافیکی بر اساس مفهوم قوس‌های میان گره‌ها صورت می‌گیرد. در این قسمت مسیر نمونه شکل ۱ برای گسترش شبکه در نظر گرفته می‌شود. قبل از گسترش شبکه لازم است برخی از پارامترهای مورد نیاز تعریف شوند [۷].

اطلاعات مسیر q در شبکه ترافیکی به صورت $G=(N^q,A^q)$ تعریف می‌شود که در آن N^q و A^q به ترتیب مجموعه‌ای از گره‌ها و قوس‌های موجود در مسیر q هستند. $D_q(i,j)$ نشان‌دهنده طول زیرمسیر بین گره‌های i و j است. همچنین $ord_q(i)$ یک شاخص مرتب‌سازی است که ترتیب گره i در مسیر q را نشان می دهد. به عنوان مثال برای گره C، در مسیر شکل ۱ داریم $ord_q(C)=3$.

برای ساختن شبکه توسعه یافته، که کلیه مسیرهای ممکن برای رسیدن از یک نقطه مبدأ به یک نقطه مقصد را نشان می‌دهد، چهار مرحله زیر انجام می‌شود:

شکل۲: شبکه گسترش یافته مسیر نمونه

مرحله ۱: دو گره جدید به گره‌های مسیر اضافه می‌شوند که یک گره به عنوان گره منبع (S) و یک گره هم به عنوان گره مقصد (T) است. در این صورت گره‌های مسیر q شامل S و T نیز می‌شود و گره‌های شبکه گسترش یافته با $\hat{N}^q$ نمایش داده می‌شود. همچنین قوس‌های (S,A) و (D,T) به A^q افزوده می‌شود و قوس‌های شبکه گسترش یافته را با $\hat{A}^q$ نشان می‌دهیم.

مرحله ۲: با توجه به محدوده رانندگی خودروها، همه قوس‌های ممکن از گره منبع به سایر گره‌ها را مشخص می‌کنیم، یعنی:

$$\forall\, i \in N^q: d_q(A.i) \le \frac{R}{2} \rightarrow (S.i) \in \hat{A}^q$$

به عنوان مثال در شکل ۲، قوس (S,B) به شبکه‌ی گسترش‌یافته اضافه می‌شود.

مرحله ۳: از هر گره i از مسیر q که خودروی موجود در آن بتواند

[۱] Differential Evolution algorithm (DEA)

با یک مخزن نیمه پر یا کم‌تر به گره مقصد (T) برسد، به گره مقصد یک قوس متصل می شود. یعنی :

$$\forall\, i \in N^q : d_q(i.D) \le \frac{R}{2} \rightarrow (i.T) \in \hat{A}^q$$

به عنوان مثال در شکل ۲، شبکه گسترش یافته شامل قوس (C,T) نیز هست. فاصله بین گره S و A و فاصله بین گره D و T نیز به صورت $d_{S,A}=(1\text{-}SOC_a)R$ و $d_{D,T}=(1\text{-}SOC_d)R$ محاسبه می‌شود که در آن، R محدوده رانندگی و SOC_a میزان شارژ خودرو در هنگام ورود به مسیر (گره A) و SOC_d میزان شارژ باقیمانده در انتهای مسیر (گره D) است.

مرحله ۴: بین هر دو گره i و j از مسیر q که i قبل از j باشد (شاخص مرتب‌سازی i کمتر از j باشد) و خودرو با شارژ کامل باتری قادر به رسیدن از i به j باشد یک قوس در نظر گرفته می‌شود. یعنی:

$$\forall\, i.j \in N^q : \left(ord_q(i) < ord_q(j)\right) \cap \left(d_q(i.j) \le R\right) \rightarrow (i.j) \in \hat{A}^q$$

بنابراین در شکل ۲، شبکه گسترش یافته شامل قوس‌های (A,B)، (B,C)، (B,D) و (C,D) است. این قوس‌ها، تمامی مسیرهای قابل تردد با باتری کاملاً شارژ شده را مشخص می‌کنند و از آنها برای تعیین محل های شارژ باتری خودروها در مسئله بهینه‌سازی استفاده خواهد شد.

۲-۲- مدل برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ

در این مقاله، فرض می‌شود که مکان و ظرفیت DG های نصب شده در شبکه، از قبل مشخص است. بنابراین تابع هدف مسئله، حداقل نمودن هزینه سرمایه‌گذاری (احداث) ایستگاه‌های شارژ با توجه به تقاضای شارژ وسایل نقلیه و همچنین هزینه‌های توسعه خطوط توزیع و ظرفیت پست است و بر اساس شبکه گسترش‌یافته در بخش قبل، به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\min\ \{C_{sta} + C_{gri} + C_{pen}\} \quad (۱)$$

که :

$$C_{sta} = \sum_{i\in N} (c_{1.i}\, s_i + c_{2.i} y_i) \quad (۲)$$

$$C_{gri} = \sum_{i\in N} (c_{3.i}\, l_i p_i + c_{4.i} p_i^{sub}) \quad (۳)$$

$$C_{pen} = \sum_{q\in Q} (c_p\, x_{st}^q F_q) \quad (۴)$$

که در آن داریم:

$c_{1.i}$: هزینه ثابت برای ساخت یک ایستگاه شارژ جدید در گره i، شامل هزینه تأسیسات و غیره.

$c_{2.i}$: هزینه نصب هر جایگاه شارژ در یک ایستگاه در گره i، شامل هزینه‌های استفاده از زمین و خرید جایگاه شارژ.

c_p : جریمه بابت عدم تأمین تقاضای شارژ خودروها

F_q : حجم جریان ترافیک در مسیر q

x_{st}^q : متغیر باینری که یک بودن آن، نشان دهنده اتصال مستقیم نقاط s و t (عدم پوشش یا جذب ترافیک مسیر q توسط ایستگاه‌های شارژ آن مسیر) است.

s_i : متغیر باینری است که یک بودن آن، به معنی نصب ایستگاه شارژ در گره i است.

y_i : تعداد جایگاه (نقاط) شارژ در ایستگاه شارژ گره i.

l_i : طول خط توزیع مورد نیاز برای نصب ایستگاه شارژ در گره i.

$c_{3.i}$: هزینه نصب خط توزیع برای احداث ایستگاه شارژ در گره i برحسب $\$/(kVA\cdot km)$

$c_{4.i}$: هزینه توسعه ظرفیت پست در گره i بر حسب $\$/(KVA)$.

در رابطه (۱)، جملات اول و سوم به ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری ایستگاه شارژ و هزینه‌های مربوط به توسعه شبکه توزیع و افزایش ظرفیت پست است و جمله سوم، هزینه (جریمه) متناظر با شارژ نشدن خودروها در شبکه ترافیکی است. هزیه توسعه پست، متناسب با کل ظرفیت شارژ ایستگاه متصل به گره i (p_i) بوده و می‌توان آن را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$p_i = p y_i\ .\ \forall\, i \in N \quad (۵)$$

که در آن، p، نرخ شارژ هریک از جایگاه‌های شارژ (شارژر) است.

در بعضی از نقاط، پست‌های برق موجود، توانایی تأمین توان مورد نیاز شارژ خودروها را ندارند لذا باید ظرفیت پست‌هایی که با این محدودیت مواجه هستند افزایش یابد. افزایش ظرفیت پست از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p_i^{sub} = \max\left(0, p_i - p_{i.0}^{sub}\right)\ \forall\, i \in N \quad (۶)$$

که در آن، $p_{i.0}^{sub}$ نشان‌دهنده ظرفیت مازاد پست در گره i و همچنین p_i^{sub} میزان توسعه ظرفیت پست در گره i است.

۳-۲- محدودیت‌های شبکه ترافیکی

شبکه ترافیکی به کمک محدودیت‌های زیر به مسأله اضافه می‌شوند[۱].

$$\sum_{(j|(i.j)\in \hat{A}^q)} x_{ij}^q - \sum_{(j|(i.j)\in \hat{A}^q)} x_{ji}^q = \begin{cases} 1. & i = s \\ -1\,.\, & i = t\,. \\ 0. & i \ne s.t \end{cases} \quad (۷)$$
$$\forall\, q \in Q.\ \forall i \in \hat{N}^q$$

$$x_{ij}^q \ge 0. \quad \forall\, q \in Q. \forall (i.j) \in \hat{A}^q \quad (۸)$$

$$\sum_{q\in Q_i} \sum_{(j|(i.j)\in A^q)} F_q\, x_{ij}^q \le g(y_i)\ \forall i \in N \quad (۹)$$

$$y_i \leq \widehat{y_i}\, s_i \quad \forall i \in N \tag{۱۰}$$

$$y_i \in \mathbb{Z}. \forall i \in \hat{N}\ .\ s_i \in (0.1)\ .\ \forall i \in N \tag{۱۱}$$

که در آن:

i و j: اندیس گره‌ها برای برای شبکه حمل و نقل

(i,j):شاخص قوس‌ها از گره i به گره j

N: تعداد گره‌های شبکه حمل نقل

و$g(y_i)$: توانایی سرویس‌دهی ایستگاه شارژ گره i (شامل تعداد y_i جایگاه شارژ) برای شارژ خودروها است. رابطه (۷) و (۸) تعادل جریان ترافیکی را در هر گره از شبکه حمل و نقل، برقرار کرده و نشان می‌دهد که جمع جریان ترافیکی ورودی و خروجی به هر گره داخلی (به جز گره های مبدأ و مقصد) باید صفر باشد. رابطه (۹)، توانایی سرویس‌دهی برای هر ایستگاه شارژ را نشان می‌دهد. جریان ترافیکی خودروها در صورتی می‌تواند از یک گره در شبکه حمل و نقل عبور کند که در آن گره، یک ایستگاه با تعداد نقاط شارژ کافی احداث شده باشد و کل جریان‌های ترافیکی که از مسیرهای مختلف به گره مورد نظر وارد می‌شود نباید از ظرفیت ایستگاه شارژ موجود در آن گره، بیشتر باشد. تابع $g(y_i)$ در رابطه (۹) یک تابع غیرخطی است که با استفاده از روابط ارائه شده در مرجع [۱]، قابل خطی‌سازی است. رابطه (۱۰)، در صورتی که یک ایستگاه شارژ در گره i وجود داشته باشد کران بالای تعداد نقاط شارژ را بیان می‌کند.

۲-۴- محدودیت‌های شبکه الکتریکی

جریان شاخه‌ها و ولتاژ گره‌ها باید در قوانین KCL و KVL صدق کنند [۱و۹]:

$$sf + g + g_{DG} = d^{ev} + d^{base} \tag{۱۲}$$

$$z_b f_b + [S]^T_{rowl} v = 0 \quad \forall b \in B^{branch} \tag{۱۳}$$

که در آن S ماتریس تلاقی گره با شاخه‌ای برای شبکه توزیع و z_b امپدانس شاخه b است. f_b جریان شاخه b و d^{ev} ، بردار ستونی جریان شارژ گرهی ایستگاههای شارژ ، d^{base} بردار ستونی جریان بار پایه گرهی، V بردار ستونی ولتاژ گره‌ای است. g، بردار ستونی تزریق جریان گرهی، g_{DG} ظرفیت منابع تولید پراکنده در نودهای شبکه توزیع بر حسب مگاوات است.

جریان شارژ ایستگاههای شارژ در شین توزیع n برابر با مجموع تمام جریان‌های شارژ در گره‌های حمل و نقل وابسته به آن است:

$$d_n^{ev} = \sum_{i \in \hat{N}^q} {}^{p_i}/_{\hat{V}}\ .\ \forall n \in N_{dn} \tag{۱۴}$$

که در آن d_n^{ev} ، جریان شارژ PEV در شین توزیع n و $\hat{V}$ ولتاژ مرجع در شبکه توزیع است.

قیود KCL و KVL، تقریب خطی محدودیت‌های جریان توان بهینه در شبکه‌های توزیع را فراهم می‌کنند که در [۹] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. جریان‌های خطوط توزیع و ولتاژهای شین‌ها نباید محدوده مجاز خود را نقض کنند که به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$|f_b| \leq \bar{f}_b \quad \forall b \in B^{branch} \tag{۱۵}$$

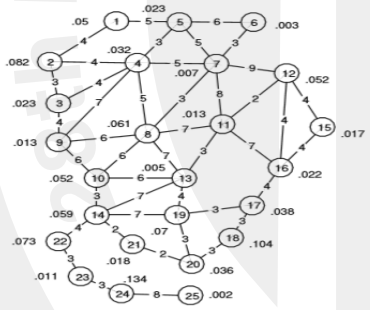
$$\underline{V_n} \leq V_n \leq \overline{V_n} \quad \forall n \in N_{dn} \tag{۱۶}$$

که در آن $\bar{f}_b$، حداکثر جریان شاخه b است و رابطه (۱۶) نیز حدود ولتاژ مجاز شین‌های شبکه توزیع را نشان می‌دهد.

۲-۵- مطالعه موردی

۲-۵-۱ معرفی سیستم مورد مطالعه

برای شبیه‌سازی مدل پیشنهادی، یک شبکه حمل و نقل بزرگ‌راهی ۲۵ گرهی همراه با یک شبکه توزیع فشار قوی ۱۱۰ کیلوولتی در نظر گرفته شده است. شبکه حمل و نقل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل۳: شبکه حمل نقل ۲۵ گرهی

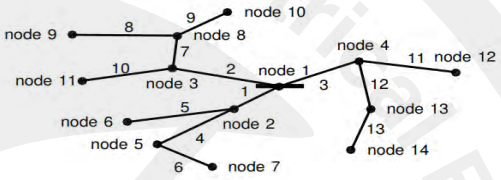
عدد روی هر قوس نشان‌دهنده فاصله بین دو گره مربوطه است. فرض می‌شود که طول مبنا در شکل ۲ برابر با ۱۰ کیلومتر است. برای مثال طول قوس (۲، ۱)۴ واحد است، که متناظر با ۴۰ کیلومتر است. عدد اعشاری متناظر با هر گره، وزن گره (W_i) یا مطلوبیت آن برای خودروها به عنوان مقصد سفر است. مطابق رابطه (۱۷)، وزن مسیر ترافیکی میان گره i و j بر اساس وزن گره‌ها و طول مسیر بین آنها محاسبه شده و تعداد خودروهای متناظر با هر مسیر با رابطه (۱۸) مشخص می‌شود: [۱۰]:

$$F_{ij} = \frac{1.5 W_i W_j}{d_{ij}}\ .\ \forall i.j.i \neq j \tag{۱۷}$$

$$F_{ij}^{PEV} = F_{total}^{PEV} * \frac{F_{ij}}{\sum_{i \neq j} F_{ij}} \quad \forall i.j.i \neq j \tag{۱۸}$$

که در آن F_{total}^{PEV} تعداد میانگین خودروهایی است که از طریق این شبکه حمل و نقل در طول ساعت پیک عبور می‌کنند. F_{ij}^{PEV}، جریان ترافیکی خودروها از گره i تا گره j در طول ساعت پیک است.

برای افزایش دقت مسئله برنامه ریزی، گره‌های کمکی اضافی در قوس‌های با طول بزرگ‌تر از ۲۰ کیلومتر اضافه شده‌اند. در نتیجه، شبکه حمل و نقل تغییر یافته ۹۳ گره دارد و طولانی‌ترین فاصله تمامی قوس‌های آن ۲۰ کیلومتر است. ایستگاه‌های شارژ می‌تواند در گره‌های اصلی و کمکی واقع شوند. وزن گره‌های کمکی صفر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ نیز شبکه توزیع فشار قوی را نشان می‌دهد.



شکل۴: شبکه توزیع $110\ kV$

فرض می‌شود که گره یک، به یک ترانسفورماتور ۲۲۰KV/۱۱۰KV با توان ۱۵۰مگاوات متصل شده است. اطلاعات شبکه توزیع از مرجع [۱] اخذ شده و نحوه اتصال گره‌های شبکه‌های توزیع و حمل و نقل در جدول ۱ مشخص شده است. فرض می‌شود که آن دسته از گره‌های حمل و نقل که در جدول ۱ نیستند به نزدیک‌ترین گره شبکه توزیع متصل شده‌اند. حداقل و حداکثر مقدار ولتاژ شین‌ها، ۹۵/. و ۱/۰۵ است.

جدول۱: ارتباط بین شبکه توزیع و حمل و نقل

شبکه توزیع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
شبکه حمل و نقل	-	۱۳	۸	۱۲	۲۲	۱۴	۲۴	۴	۲	۵	۹	۱۵	۱۷	۲۰

فرض می‌شود فاصله ایستگاه شارژ تا نزدیک‌ترین پست (l_i)، ۱۰٪. فاصله بین ایستگاه شارژ تا نزدیک‌ترین گره شبکه توزیع ۱۱۰ کیلوولتی است. در عمل، هزینه استفاده از زمین و هزینه نیروی کار وابسته به مکان نصب است. برای مدل‌سازی این ویژگی، هزینه‌های مبنا یعنی $c_{1.i}$، $c_{2.i}$ و $c_{4.i}$ در هر مکان i، به اندازه $0.05\mathrm{W_i}$ بیشتر از مقادیر مبنا در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که پست متناظر با هر گره حمل و نقل، یک مگاوات ظرفیت مازاد دارد که می‌تواند برای ایستگاه‌های شارژ به کار رود، در حالی که گره‌های کمکی فاقد ظرفیت اضافی پست هستند.

جدول۲: پارامترهای مورد نیاز در مطالعه موردی

soc(a,d)	p kw	(C_p)	R km	$(C_{4,i})$ $\$/_{KVA}$	$(C_{3,i})$ $\$/_{KVA.km}$	$(C_{2,i})$ $\$$	$(C_{1,i})$ $\$$
۰,۵	۴۴	۱۰۶	۲۰۰	۷۸۸	۱۲۰	۳۱۶۴۰	۱۶۳۰۰۰

حداکثر نقاط شارژ در یک ایستگاه ۲۰۰ بوده و ظرفیت DG های نصب شده در گره‌های شبکه توزیع به صورت زیر فرض می‌شود:

جدول۳: ظرفیت منابع تولید پراکنده نصب شده در شبکه توزیع

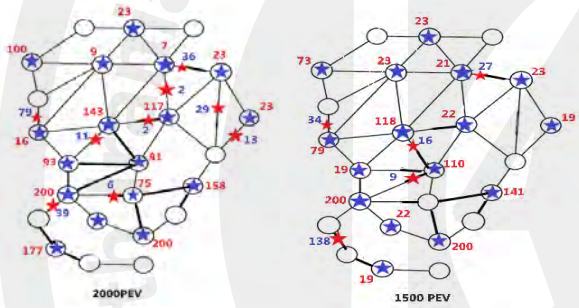
برحسب مگا وات

شین شبکه توزیع	۳	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۳	۱۴
ظرفیت (MW)	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴

۶-۲- نتایج بدست آمده

در این مقاله ابتدا نتایج مکان‌یابی بدون حضور DG و سپس با حضور DG بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به صورت زیر است:

محل نصب ایستگاه و تعداد جایگاه شارژ در تعداد ۱۵۰۰و۲۰۰۰ خودرو مطابق شکل ۵ به دست آمده است (بدون منابع تولید پراکنده). برای درک بیشتر، مقایسه‌ای بین تعداد خودروها نسبت به تعداد ایستگاه‌ها و جایگاه‌های شارژ انجام می‌شود این مهم در شکل ۶ نشان‌داده شده است.

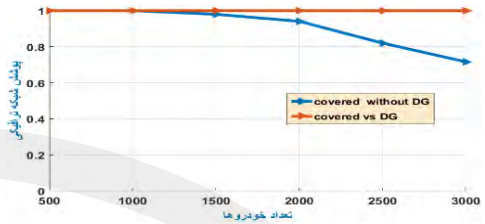


شکل۵: محل نصب و تعداد نقاط شارژ

شکل۶: تعداد خودروها نسبت به تعداد ایستگاه‌ها و نقاط شارژ

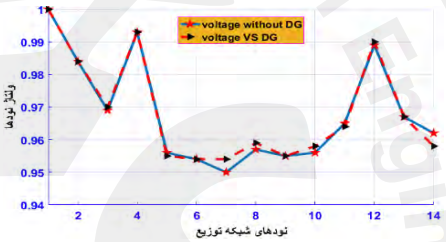
همانطور که ملاحظه می‌شود از ۲۰۰۰ خودرو به بعد، تعداد ایستگاه‌های شارژ با افزایش تعداد خودروها کم‌تر می‌شود. اما در مورد جایگاه‌های شارژ، هر چه تعداد خودروها بیشتر می‌شود تعداد جایگاه‌های شارژ نیز بیشتر می‌شود و این بدان معنی است که برای حداقل شدن هزینه در تعداد بالای خودرو به جای نصب ایستگاه، جایگاه شارژ افزایش داده می‌شود. بررسی پوشش شبکه ترافیکی نسبت به تعداد خودروها نیز در نوع خود جالب است. هر چه تعداد خودروها در شبکه ترافیکی بیشتر می‌شود پوشش شبکه ترافیکی کاهش می‌یابد (تمام صاحبان خودروها به دلیل مسائل پایداری شبکه

نمی‌توانند خودروی خود را شارژ کنند). در شکل ۷ این مهم نشان داده شده است.



شکل۷: تعداد خودروها نسبت به پوشش خودروها

دلیل کاهش پوشش در تعداد خودروهای بالا، کاهش ولتاژ در بعضی از شین‌ها که از منبع (شین۱) دور هستند، است. در شکل ۸ برای ۳۰۰۰ خودرو ولتاژ شبکه توزیع در قبل و بعد ازحضور DG رسم شده است. هدف ما در این مقاله بررسی پوشش شبکه ترافیکی در حضور DG است.



شکل۸: پروفیل ولتاژ در تعداد ۳۰۰۰ خودرو

همانطور که در شکل ۸ می‌بینید در بعضی از شین‌ها ولتاژ قبل از حضور DG حداقل مقدار خود یعنی ۰/۹۵ را دارد (در ۳۰۰۰ خودرو-در این حالت پوشش ۰/۸۴ است) برای بهتر کردن شرایط، در شین‌هایی که بیشترین افت ولتاژ را دارند DG قرار داده می‌شود ظرفیت‌های مورد نیاز برای پوشش صد درصد در تعداد ۳۰۰۰ خودرو در جدول ۲ مشاهده می‌شود. نتایج نشان دهنده این است که علاوه بر افزایش پوشش، شاهد بهتر شدن ولتاژ شین‌ها و افزایش پایداری شبکه الکتریکی هستیم. در شکل ۷ مقایسه پوشش شبکه ترافیکی بدون حضور DG و در DG نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با حضورDG شاهد پوشش ۱۰۰ درصد در تعداد ۳۰۰۰ خودرو هستیم.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با در نظر گرفتن قیود شبکه ترافیکی در حضور منابع تولید پراکنده انجام شد. مشاهده می‌شود که وقتی تعداد خودروها در شبکه ترافیکی افزایش می‌یابد پوشش شبکه کاهش و این کاهش پوشش ناشی از افت ولتاژ شین‌های شبکه توزیع است. نصب منابع تولید پراکنده در شین‌هایی که افت ولتاژ بالایی دارند، باعث کاهش افت ولتاژ و در مقابل افزایش پوشش شبکه ترافیکی را به همراه دارد. به طور کلی نصب DG باعث افزایش پوشش تقاضای شارژ خودروها در شبکه ترافیکی می‌شود.

مراجع

[1] 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. PP, no. 99, pp. 1-11, 2016.

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

[3] A. Rajabi-Ghahnavieh and P. Sadeghi-Barzani, "Optimal Zonal Fast-Charging Station Placement Considering Urban Traffic Circulation," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 1, pp. 45-56, Jan. 2017.

[4] O. Erdinc, A. Tascikaraoglu, N. G. Paterakis, I. Dursun, M. C. Sinim and J. P. S. Catalão, "Optimal sizing and siting of distributed generation and EV charging stations in distribution systems," *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Torino, 2017, pp. 1-6.

[۵] میکائیل رامین و غلامرضا کامیار، «جایابی بهینه ایستگاههای شارژ خودروهای الکتریکی و ذخیره سازهای انرژی به صورت همزمان با الگوریتم ژنتیک»، کنفرانس بین المللی تحقیقات بنیادین در مهندسی برق، تهران، دانشگاه ابرار.۱۳۹۶.

[6] M. Moradi, M. Abedini, S. Tousi and S. Hosseinian, "Optimal siting and sizing of renewable energy sources and charging stations simultaneously based on Differential Evolution algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 1015-1024, 2015.

[7] S. A. MirHassani and R. Ebrazi, "A flexible reformulation of the refueling station location problem," Transport. Sci., vol. 47, no. 4, pp. 617–628, 2013.

[8] Kuby M, Lim S, Upchurch C (2005) Dispersion of nodes added to a network. Geographical Anal. 37(4):383–409.

[9] S. Haffner, L. F. A. Pereira, L. A. Pereira, and L. S. Barreto, "Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation part I: problem formulation," IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 2, pp. 915–923, 2008.

[10] M. J. Hodgson, "A flow-capturing location-allocation model," Geogr. Anal., vol. 22, no. 3, pp. 270–279, 1990.