

Smart Charge and Discharge Scheduling of Electric Vehicle (EV) to maximize the profit of EV owner

Amin Alavi Eshkaftaki¹, Ali Ghiasian², Abdorreza Rabiee³

¹ Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

² Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³ Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Abstract:

Electric Vehicle (EVs) usage causes to decrease the consumption of fossil fuel resources and pollution. If such EVs include vehicle to grid (V2G) capability, then a smart scheduling can be used in order to obtain more profit. The goal of this paper is to present a charge and discharge scheduling to maximize the profit of EV owner, using genetic algorithm (GA). The suggested method can be applicable without deteriorating the normal usage of EV. Besides that, in this method the hourly traveled distance and state of charge (SOC) of EV are considered in each hour of day and night. To evaluate the accuracy of this algorithm, stochastic data are generated and the algorithm is repeated 1000 times. Finally, the expected profit of EV owner is calculated for 3 modes named without V2G ability, with V2G and 72 ampere charger and with V2G and supercharger. The results show that the 3rd mode is more profitable than the other ones.

Keywords: charge scheduling, discharge scheduling, genetic algorithm (GA), electric vehicle (EV), stochastic data, supercharger

برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی به منظور بیشینه کردن سود صاحب خودرو با استفاده از الگوریتم ژنتیک

امین علوی اشکفتکی^۱، علی قیاسیان^۲، عبدالرضا ربیعی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

alavi@stu.sku.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

ghiasian.ali@eng.sku.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران

rabiee@eng.sku.ac.ir

چکیده: استفاده از خودروی الکتریکی باعث کاهش مصرف ذخایر رو به پایان سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش آلودگی می‌شود. اگر خودروی الکتریکی قابلیت اتصال به شبکه را داشته باشد، با یک برنامه‌ریزی هوشمندانه حتی سودآور است. هدف مقاله، ارائه برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ برای بیشینه کردن سود صاحب خودرو است. برای بهینه‌سازی تابع هدف (بیشینه کردن سود صاحب خودرو) از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. روش پیشنهادی، ضمن استفاده معمولی و با آسایش از خودرو، برای صاحب خودرو نیز سود در بر خواهد داشت؛ بنابراین نگاه این بررسی متفاوت است و سودآوری صاحب پارکینگ، شبکه توزیع و جمع‌کننده مدنظر نیست. علاوه بر آن، در روش ارائه شده، مسافت طی شده و همچنین وضعیت شارژ در هر ساعت از شبانه‌روز مدنظر قرار می‌گیرند. برای بررسی صحت عملکرد این الگوریتم، داده‌های تصادفی، تولید و برنامه ۱۰۰۰ دفعه تکرار می‌شود. در نهایت، سود انتظاری صاحب خودرو برای سه حالت مختلف، وجودداشتن قابلیت اتصال به شبکه، وجود این قابلیت و استفاده از شارژر ۷۲ آمپری و در نهایت، وجود قابلیت اتصال به شبکه و استفاده از سوپرشارژر محاسبه و بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند حالت سوم، نسبت به دو حالت دیگر، سودآورتر است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی شارژ، برنامه‌ریزی دشارژ، الگوریتم ژنتیک، خودروی الکتریکی، داده تصادفی، سوپرشارژر

۱- مقدمه

تجدیدپذیر برای خودروها افزایش یابد. خودروهای الکتریکی (EV)^۱ باتری الکتریکی دارند که انرژی لازم برای موتور و سایر تجهیزات اتومبیل را تأمین می‌کنند. این باتری با شبکه^۲، پیل‌های خورشیدی و یا حتی انرژی‌های ترمزگیری خودرو شارژ می‌شود. از مزایای این نوع خودروها، سروصدای کم، ایجاد نکردن آلودگی و بازدهی بالاست و شاید از معایب آن، مسافت کم طی شده خودرو و زمان نسبتاً زیاد برای شارژ باشد؛ البته با پیشرفت تکنولوژی این مشکل تا حد بسیار زیادی مرتفع شده است؛ تاجایی که امروزه از خودروهای الکتریکی با ظرفیت باتری بالا استفاده می‌شود که قادرند مسافت زیادی را طی کنند و مدت زمان شارژ

مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی اتومبیل‌ها در سرتاسر جهان و روند رو به کاهش این نوع سوخت از یک سو و از سوی دیگر، معضل آلودگی در بیشتر شهرها باعث شده است در سال‌های اخیر توجه به منبع انرژی سبز و

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۲

نام نویسنده مسئول: عبدالرضا ربیعی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شهرکرد - دانشگاه شهرکرد -

دانشکده فنی مهندسی

مقاله‌ای دیگر، برنامه‌ریزی شارژ خودروهای الکتریکی در فضای پارکینگ براساس الگوی حرکت اتومبیل‌ها، برای افزایش درآمد پارکینگ و افزایش تعداد خودروهای الکتریکی ارائه شده است [7]. در مرجع [8] برنامه‌ریزی بهینه برای شارژ خودروهای الکتریکی با قابلیت اتصال به شبکه ارائه شده است که در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی استفاده می‌شود و در آن، الگوریتم بهینه‌سازی از دو قسمت محاسبات پخش بار و بهینه‌سازی خطی تشکیل شده است. در [9] الگوریتم در دو گام برای برنامه‌ریزی شارژ خودروهای الکتریکی ارائه شده است. در گام نخست، تعداد خودروهایی که در هر ساعت، در بازار یک روز قبل، درخواست شارژ داشته‌اند، بهینه می‌شوند و در گام دوم، تعداد پیشینه خودروهایی تعیین می‌شود که می‌توانند شارژ بشوند. در این روش نیز به شبکه توزیع توجه می‌شود. همچنین مسئله برنامه‌ریزی شارژ خودروهای الکتریکی در فضای پارکینگ با استفاده از نظریه بازی غیرمشارکتی^۱ انجام شده است که در این روش، میزان شارژ کل، با ظرفیت ترانس تعیین می‌شود [10].

در بسیاری از این مقالات، بهینه‌سازی از نگاه صاحب پارکینگ، شبکه توزیع، جمع‌کننده و ... صورت گرفته است؛ ولی در این مقاله سعی شده است دید بهینه‌سازی کمی متفاوت باشد؛ یعنی به مسئله، از سوی صاحب خودرو نگاه شود. تغییر دیدگاه به این سمت باعث می‌شود صاحب خودرو با انگیزه کافی در برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودرو شرکت کند. نکته مهم مطرح شده در این مقاله، استفاده معمولی و با آسایش از خودرو برای کارهای روزمره بدون ایجاد هیچ‌گونه محدودیتی است. این موضوع باعث می‌شود روش پیشنهادی جنبه عملیاتی بیشتری نیز داشته باشد.

۲- برنامه‌ریزی هوشمندانه شارژ و دشارژ

همان‌طور که در مقدمه نیز ذکر شد، فرمول‌بندی مسئله بر مبنای پیشینه‌کردن سود صاحب خودرو عمل می‌کند. از طرفی در این روابط هزینه انرژی الکتریکی در طول روز ثابت نیست؛ زیرا اگر ثابت فرض شود، رغبتی برای استفاده از این الگوریتم‌های بهینه‌سازی وجود نخواهد داشت. نکته دیگر آنکه این الگوریتم برای هر ساعت از شبانه‌روز، میزان

کوتاهی را به خود اختصاص دهند. در صورتی که این خودروها قابلیت اتصال به شبکه (V2G^۲) را داشته باشند، می‌توان با در نظر گرفتن الگوریتم بهینه‌سازی، در ساعات مشخصی، برق را به شبکه فروخت که همین موضوع باعث می‌شود خودروهای الکتریکی با قابلیت اتصال به شبکه (PEV)^۳، در عین کارایی معمولی به‌عنوان خودرو، حتی برای صاحب خودرو سودآور باشند.

درباره برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی مقالات مختلفی ارائه شده‌اند. در [1]، الگوی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع ارائه شده است که در آن، به دلیل اینکه برنامه‌ریزی بهینه مطلق عملیاتی نیست، از برنامه بهینه‌سازی محلی برای کمینه کردن هزینه خودروهای الکتریکی استفاده شده است. در [2] چارچوب عملیاتی برای جمع‌کننده^۴ خودروهای الکتریکی ارائه شده که در آن، نخست الگوریتم برای کمینه‌کردن هزینه و سپس الگوریتم توزیع دینامیکی مطرح شده‌اند. در مقاله دیگر، برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی براساس قیمت لحظه‌ای و با در نظر گرفتن عدم قطعیت صورت گرفته است که در تابع هدف آن، هزینه تنزل باتری هنگام اتصال به شبکه و نیز تأمین انرژی لازم برای حرکت خودرو نیز در نظر گرفته شده‌اند [3]. تابع هدف ارائه شده در [4] کمینه‌کردن کل هزینه انرژی خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن عملکرد با آسایش مصرف‌کننده است و نشان داده می‌شود این الگوریتم ذخیره مناسب در انرژی الکتریکی، انعطاف‌پذیری بیشتر بین هزینه و آسایش مصرف‌کننده و کاهش دیماندر انرژی در طول ساعات پیک را فراهم می‌کند؛ بنابراین در این روش هم به منافع مصرف‌کننده و هم به منافع شبکه توزیع توجه شده است. در مقاله [5] برنامه‌ریزی مبتنی بر ریسک یک روز قبل^۶ و لحظه‌ای^۷ برای شارژ خودروهای الکتریکی از دید جمع‌کننده‌ها صورت گرفته است. تابع هدف، کمینه‌کردن هزینه انرژی الکتریکی خودروها و ریسک بین بار پیش‌بینی شده و بار واقعی خودروهای الکتریکی، با در نظر گرفتن رفتار تصادفی راندگی این نوع خودروهاست. در [6]، الگوی لحظه‌ای شارژ خودروهای الکتریکی در سیستم توزیع خانگی با ولتاژ پایین مطرح شده است که در این الگو، شبکه توزیع از اهمیت زیادی برخوردار است. در

متغیرهای مسئله

میزان سود صاحب خودرو	Ω (\$)
انرژی فروخته شده به شبکه در زمان t	$E_{dch,t}$ (kWh)
انرژی خریداری شده از شبکه در زمان t	$E_{ch,t}$ (kWh)
انرژی خودرو در زمان t	E_t (kWh)
متغیر کمکی $0 \leq I_t \leq 1$	I_t
وضعیت شارژ باتری در زمان t	SOC_t (%)
زمان بر حسب ساعت	t

در این مسئله، رابطه (۱) میزان سود صاحب خودرو در طول ۲۴ ساعت (تابع هدف) را نشان می دهد. رابطه (۲) میزان انرژی خودرو را در هر ساعت محاسبه می کند. رابطه (۳) متغیری کمکی است که برای سهولت در مسئله بهینه سازی و کاهش تعداد متغیرهای مسئله در روابط (۴) تا (۶) استفاده شده است. رابطه (۷) مشخص می کند در هر ساعت، خودرو نمی تواند همزمان شارژ و دشارژ شود. رابطه (۸) نشان می دهد میزان انرژی خودرو در هر ساعت، باید در محدوده مجاز خود باشد. رابطه (۹) میزان شارژ باقیمانده باتری در هر ساعت را محاسبه می کند. نکته جالب توجه آن است که در روش ارائه شده، برخلاف بسیاری از مقالات، SOC در هر ساعت از روز ارائه می شود. همچنین رابطه (۶) نشان می دهد مسافت طی شده در هر ساعت از شبانه روز مدنظر است؛ زیرا در بسیاری از مقالات به مسافت کل طی شده در روز توجه می کنند. با توجه به رابطه (۱۰)، حل مسئله نیازمند شرط اولیه است که در زمان t_0 اتفاق می افتد. این زمان زمان برگشت به خانه در نظر گرفته می شود.

برای توضیح روابط (۴) تا (۶) ابتدا لازم است حالت های مختلف ممکن برای خودرو در نظر گرفته شوند. به طور کلی، حالات مختلف ممکن برای خودرو در جدول (۱) نشان داده شده اند. با توجه به جدول (۱)، چهار حالت مختلف در هر ساعت برای خودرو متصور می شود. برای الگو کردن مسئله در قالب بهینه سازی، دو راهکار وجود دارد. راهکار نخست عبارت است از تعریف چهار متغیر باینری برای هر کدام از چهار حالت. این کار باعث افزایش تعداد متغیرهای مسئله بهینه سازی و در نتیجه، کاهش سرعت محاسبات می شود.

شارژ، دشارژ و سایر اطلاعات و متغیرها را خواهد داد. فرمول بندی مسئله به صورت زیر است.

Objective Function: Maximize Ω

$$\Omega = \sum_{t=0}^{23} Price_t \times (\eta_{dch} \times E_{dch,t} - \frac{E_{ch,t}}{\eta_{ch}}) \quad (1)$$

$$E_{t+1} = E_t - E_{dch,t} + E_{ch,t} + Dist_t \times C_{EV} \quad (2)$$

$$0 \leq I_t \leq 1 \quad (3)$$

$$0 \leq E_{ch,t} \leq \frac{I_t}{I_t + \epsilon} \times Rate_{ch} \quad (4)$$

$$0 \leq E_{dch,t} \leq \frac{I_t}{I_t + \epsilon} \times Rate_{dch} \quad (5)$$

$$Dist_t \times I_t = 0 \quad (6)$$

$$E_{ch,t} \times E_{dch,t} = 0 \quad (7)$$

$$E_{min} \leq E_t \leq E_{max} \quad (8)$$

$$SOC_t = E_t \frac{100}{Cap_{bat}} \quad (9)$$

$$E_{t_0} = SOC_{t_0} \frac{Cap_{bat}}{100} \quad (10)$$

که متغیرهای به کاررفته در فرمول بندی فوق و ورودی های مسئله نیز در زیر مشاهده می شوند.

ورودی های مسئله

قیمت انرژی الکتریکی در هر ساعت از روز	$Price_t$ ($\frac{\$}{kWh}$)
بازدهی مبدل و باتری هنگام شارژ	η_{ch}
بازدهی مبدل و باتری هنگام دشارژ	η_{dch}
میزان مسافت طی شده در هر ساعت از روز	$Dist_t$ (km)
میزان مصرف خودروی الکتریکی	C_{EV} ($\frac{kWh}{km}$)
میزان شارژ	$Rate_{ch}$ ($\frac{kWh}{hr}$)
میزان دشارژ	$Rate_{dch}$ ($\frac{kWh}{hr}$)
کمینه مقدار انرژی خودرو	E_{min} (kWh)
بیشینه مقدار انرژی خودرو	E_{max} (kWh)
یک عدد بسیار کوچک (Epsilon)	ϵ
ظرفیت باتری	Cap_{bat} (kWh)
وضعیت شارژ باتری ^۹ در شرط اولیه	SOC_{t_0} (%)
میزان انرژی در شرط اولیه	E_{t_0} (kWh)
زمان مربوط به شرط اولیه	t_0 (hr)

جدول (۱): چهار حالت مختلف خودروی الکتریکی

حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم
ایستاده و شارژ	ایستاده و دشارژ	ایستاده بدون شارژ و دشارژ	حرکت
مسافت طی شده صفر و ضریب I_t مخالف صفر است.	مسافت طی شده صفر و ضریب I_t مخالف صفر است.	مسافت طی شده برابر صفر بوده و ضریب I_t می‌تواند صفر باشد یا نه.	مسافت مخالف صفر و ضریب I_t حتما صفر است.

جدول (۲): اطلاعات سه نوع الگو از خودروهای تسلا موتور

نام خودرو	نوع خودرو	ظرفیت باتری (kWh)	رنج (miles)	حداکثر سرعت (mph)
Tesla Model s	P90D (Ludicrous)	۹۰	۲۷۰	۱۵۵
Tesla Model s	90D	۹۰	۲۹۴	۱۵۵
Tesla Model s	60D	۶۰	۲۱۸	۱۳۰

جدول (۳): زمان لازم برای شارژ کامل باتری

نوع خودرو	شارژر ۴۸ آمپری (ساعت)	شارژر ۷۲ آمپری (ساعت)	سوپرشارژر (ساعت)
P90D (Ludicrous)	۷:۵۰	۵:۱۲	۱:۰۵
90D	۸:۳۴	۵:۴۱	۱:۱۳
60D	۶:۲۳	۴:۱۴	۰۰:۴۷

جدول (۴): اطلاعات ورودی مربوط به خودرو

۱۷/۵۷	$Rate_{ch} (kWh/hr)$ (72 A Charger)	۰	$E_{min} (kWh)$
۱۷/۵۷	$Rate_{ach} (kWh/hr)$ (72 A Charger)	۹۰	$E_{max} (kWh)$
۸۵/۷۱	$Rate_{ch} (kWh/hr)$ Supercharger	10^{-20}	ϵ
۸۵/۷۱	$Rate_{ach} (kWh/hr)$ Supercharger	۹۰	$Cap_{bat} (kWh)$
۵ و ۰	$E_{t_0} (kWh)$	۹۵٪	$\eta_{ch} \& \eta_{ach}$
تصادفی بر اساس زمان برگشت به خانه	$t_0 (hr)$	۰/۲۰۷۳	$C_{EV} (kWh/km)$

همچنین قیمت انرژی الکتریکی با توجه به [۱۲] در سه‌بازه قیمتی به صورت زیر است.

جدول (۵): قیمت انرژی الکتریکی

ساعت	۱۰-۱۷	۱۷-۲۲	۲۲-۸
قیمت انرژی الکتریکی ($\$/kWh$)	۱۰/۳۵	۱۵/۰۲	۶/۵۳۸

راهکار دوم، الگوکردن مسئله در قالب روابط (۴) تا (۷) است. این روش در عین سادگی، همه حالت‌های مختلف را پوشش می‌دهد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. با توجه به رابطه (۴)، اگر Dis_t مخالف صفر باشد، (خودرو در ساعت t در حال حرکت باشد)، متغیر I_t حتماً برابر صفر خواهد شد؛ اما اگر خودرو در ساعت t در حال حرکت نباشد (Dis_t مساوی صفر)، در این صورت متغیر I_t می‌تواند مخالف صفر باشد؛ بنابراین با توجه به روابط (۵) تا (۷)، امکان شارژ یا دشارژ برای خودرو وجود خواهد داشت. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، خودرو شارژ یا دشارژ شود، امکان وقوع همزمان این دو وجود ندارد. این موضوع در رابطه (۷) مشاهده می‌شود.

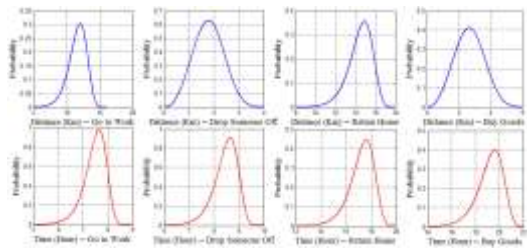
۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

برای شبیه‌سازی روش ارائه‌شده، از سه نوع خودروی الکتریکی تسلا موتور استفاده شده که اطلاعات مربوط و نیز زمان لازم برای شارژ کامل آنها به ترتیب در جداول (۲) و (۳) آورده شده‌اند [۱۱].

در این مقاله، خودروی P90D (Ludicrous) برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. شبیه‌سازی یک‌بار برای شارژر ۷۲ آمپری و بار دیگر برای سوپرشارژر انجام می‌شود. انتظار می‌رود در آینده‌ای نه‌چندان دور، تمامی شارژرها قابلیت سوپرشارژ را داشته باشند. به هر حال، اطلاعات ورودی مسئله که مربوط به خودرو هستند، در جدول (۴) مطرح شده‌اند.

در روابط فوق، R به صورت تصادفی بین ۰ تا ۱ انتخاب می‌شود.

به دلیل آنکه متغیرهای مسئله پیوسته فرض شدند، مسئله بهینه‌سازی، از نوع برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) است.



شکل (۱): نمودارهای مربوط به توزیع‌های ویبال مسافت و بازه زمانی حرکت

برای بیشینه‌سازی تابع هدف (سود دارنده خودرو) که در رابطه (۱) آورده شده است، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. برای محاسبه سود انتظاری^{۱۱} این کار ۱۰۰۰ بار تکرار خواهد شد.

۳-۱- بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یکی از الگوریتم‌های مبتنی بر روند تکاملی است. این الگوریتم راه‌حل‌های بالقوه مسئله را در قالب کروموزوم‌های ساده‌ای کد می‌کند و سپس عملگرهای ترکیبی را بر روی این ساختارها اعمال می‌کند. الگوریتم ژنتیک بیشتر روشی برای بهینه‌سازی توابع شناخته می‌شود. در این مقاله نیز برای به دست آوردن الگوی بهینه شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی از روش مذکور استفاده می‌شود. رابطه (۱) در قسمت قبل بیان‌کننده تابع هدف و روابط (۲) تا (۱۰) نیز مربوط به قیود تساوی و نامساوی خطی و غیرخطی‌اند. برای اعمال کردن قیود در الگوریتم ژنتیک، از تابع جریمه مطرح‌شده در رابطه (۱۵) استفاده می‌شود. در این روابط w_i ، توابع قیود تساوی و g_i ، توابع قیود نامساوی است و V برداری است که در رابطه (۱۵) ارائه شده است. شروط مربوط به توابع قیود برابری و نابرابری نیز در روابط (۱۶) و (۱۷) ارائه شده‌اند.

تنها داده ورودی که تکلیف آن مشخص نیست، مسافت طی شده در ساعات مختلف ($Dist_t$) است. برای این منظور، چهار کار پرتکرار در طول روز در نظر گرفته شده و برای هر یک از این کارها بازه زمانی و مسافت طی شده مدنظر قرار می‌گیرد. این چهار کار پرتکرار عبارت‌اند از: رفتن سر کار، پیاده‌کردن فرد، بازگشت به خانه و انجام خرید خانه. برای ارزیابی کارایی الگوریتم مطرح‌شده باید آن را به‌ازای داده‌های تصادفی مختلف آزمود. به همین دلیل برای چهار کار پرتکرار مطرح‌شده، هشت توزیع در نظر گرفته می‌شود که از میان آنها چهار توزیع بر حسب مسافت طی شده و چهار توزیع مبتنی بر بازه زمانی حرکت خواهند بود. توزیع‌های در نظر گرفته شده در نمودارهای شکل (۱)، از نوع ویبال^{۱۱} با ضرایبی است که در جدول (۶) ذکر شده‌اند [۱۴، ۱۳]. رابطه (۱۱) بیان‌کننده توزیع ویبال است.

$$f = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (11)$$

جدول (۶): ضرایب مربوط به توزیع‌های ویبال مسافت و بازه زمانی حرکت

روز	ضرایب توزیع ویبال مسافت	ضرایب توزیع ویبال زمان	چهار کار پرتکرار در روز
۱۲/۲۱	α	۷/۶۷۴۵۴	رفتن سر کار
۱۰	β	۲۰/۳۸۱۲	کار
۳/۲۴	α	۸/۶۷۴۵۴	پیاده‌کردن فرد
۲	β	۲۱/۳۸۱۲	فرد
۱۴/۴۲	α	۱۷/۶۷۴۵۴	بازگشت به خانه
۱۵	β	۲۱/۳۸۱۲	خانه
۳/۱۶	α	۱۹/۶۷۴۵۴	انجام خرید خانه
۳	β	۲۱/۳۸۱۲	خانه

اکنون تمامی داده‌های ورودی کاملاً مشخص شده‌اند و باید داده‌های تصادفی از هشت توزیع ویبال که چهارتای آن بر حسب زمان و چهارتای آن بر حسب مسافت است، با روابط (۱۲) و (۱۳) در نرم‌افزار MATLAB تولید شوند.

$$t = \alpha(-\ln(1 - R))^{1/\beta} \quad (12)$$

$$dist = \alpha(-\ln(1 - R))^{1/\beta} \quad (13)$$

درصد کروموزوم‌های دو رگه حاصل عمگر تقاطع 0.8^{12} و روش ایجاد آن از نوع پراکنده^{۱۳} و همچنین درصد کروموزوم‌های جهش‌یافته 0.2^{14} و الگوی تولید آن از نوع متحدالشکل^{۱۵} فرض می‌شود. تعداد حداکثر تکرار ۲۰۰ در نظر گرفته می‌شود. طبیعتاً هرچه تعداد تکرارها افزایش یابد، دقت جواب نیز بهبود خواهد داشت؛ همچنین مدت زمان اجرای برنامه افزایش می‌یابد؛ ولی انتظار می‌رود معیار پایان‌دهنده تکرار برنامه، میزان خطای جواب (مثلاً 10^{-6}) باشد، نه تعداد حداکثر تکرار. در این مقاله معیار توقف الگوریتم ژنتیک میزان خطای جواب و برابر 10^{-3} در نظر گرفته شده است. اگر چنانچه بعد از ۲۰۰ تکرار معیار میزان خطای جواب هنوز برآورده نشده باشد، تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک ادامه خواهد یافت.

۲-۳- تحلیل نتایج حاصل

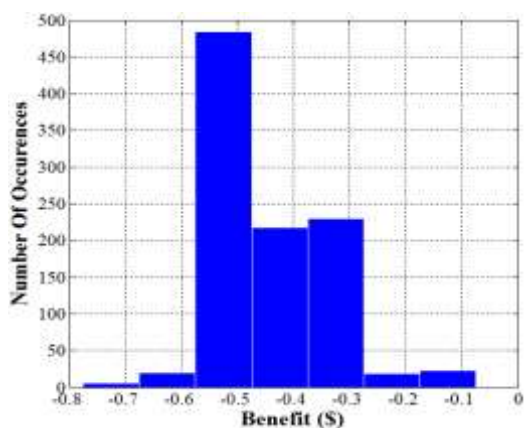
برنامه ارائه‌شده در سه شرایط مختلف زیر بررسی شده است.

(۱) وجودنداشتن قابلیت V2G و استفاده از شارژر ۷۲ آمپری

(۲) وجود قابلیت V2G و استفاده از شارژر ۷۲ آمپری

(۳) وجود قابلیت V2G و استفاده از سوپرشارژر

نمودار فراوانی به‌دست‌آمده برای سود صاحب خودرو به‌ازای سه وضعیت مختلف بالا در شکل‌های (۳) تا (۵) ارائه شده‌اند. در اولین حالت، شرط آغازین، صفر و برای دو حالت دیگر، ۵ فرض می‌شود.



شکل (۳): نمودار فراوانی وضعیت اول (وجودنداشتن قابلیت اتصال به شبکه و استفاده از شارژر ۷۲ آمپری)

$$f = -\Omega - R \times V \quad (14)$$

$$V = \max\{0, w_1(x), \dots, w_{N_{ec}}(x), \dots, g_1(x), \dots, g_{N_{iec}}(x)\} \quad (15)$$

$$w_i(x) = 0 \quad (16)$$

$$g_i(x) \leq 0 \quad (17)$$

در رابطه (۱۴)، پارامتر R، ضریب جریمه مربوط به تابع نگارش‌شده و N_{ec} و N_{iec} به ترتیب تعداد قیود برابری و نابرابری اند. X نیز بردار متغیرهای به کار گرفته شده در مسئله‌اند. الگوریتم ژنتیک ذاتاً الگوریتم مینیم‌ساز است؛ ولی تابع هدف بیشینه‌کردن سود صاحب خودرو است؛ بنابراین، در روند استفاده از الگوریتم ژنتیک علامت منفی منظور می‌شود. این موضوع در تابع جریمه مطرح شده هم مشاهده می‌شود؛ بنابراین کمینه‌کردن تابع جریمه ذکرشده در روابط فوق به بیشینه‌کردن تابع هدف اصلی مسئله در رابطه (۱) منجر خواهد شد.

برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک جمعیت اولیه با تعداد ۵۰ کروموزوم در نظر گرفته می‌شود. طبیعتاً هرچه تعداد جمعیت اولیه و همین‌طور کیفیت آن افزایش یابد، دقت نتیجه به‌دست‌آمده بیشتر خواهد شد؛ ولی مدت زمان اجرای برنامه نیز افزایش محسوسی خواهد داشت. ژن‌های این کروموزوم متغیرهای مسئله یعنی انرژی الکتریکی، انرژی فروخته‌شده، انرژی خریداری‌شده و متغیر کمکی‌اند که هر کروموزوم شامل ۹۶ ژن است. این موضوع در شکل (۲) مشاهده می‌شود.



شکل (۲): کروموزوم استفاده‌شده در الگوریتم ژنتیک

ژن‌های x_i در شکل (۲) بیان‌کننده متغیرهایی‌اند که در رابطه (۱۸) مشاهده می‌شوند.

$$X = [E_0, \dots, E_{23}, E_{dch,0}, \dots, E_{dch,23}, \dots, E_{ch,0}, \dots, E_{ch,23}, I_0, \dots, I_{23}]_{1 \times 96} \quad (18)$$

تا کنون هدف، بررسی کارآمد بودن روش با استفاده از داده‌های تصادفی برای ۱۰۰۰ تکرار بود. اکنون به‌ازای داده‌های قطعی جدول (۸)، برای مسافت طی‌شده و بازه زمانی چهار کار پرتکرار، مقادیر شارژ و دشارژ و سایر متغیرها برای وضعیت سوم در جدول (۹) ذکر شده‌اند.

جدول (۷): داده‌های قطعی ورودی به الگوریتم

کار پرتکرار	رفتن سر کار	پیاده‌کردن یک فرد	بازگشت به خانه	خرید خانه
بازه زمانی (ساعت)	۷-۸	۸-۹	۱۷-۱۸	۱۹-۲۰
مسافت (کیلومتر)	۱۲/۲۱	۳/۲۴	۱۴/۴۲	۳/۱۶

جدول (۸): داده‌های قطعی ورودی به الگوریتم

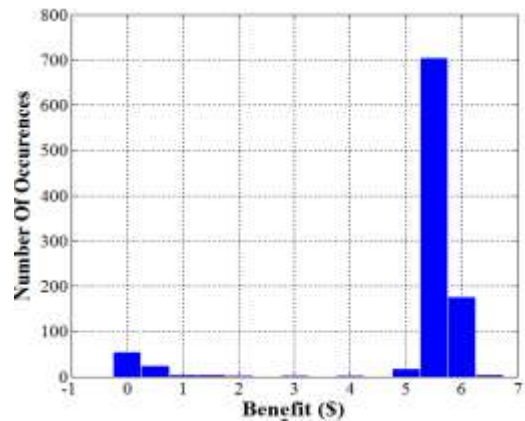
کار پرتکرار	رفتن سر کار	پیاده‌کردن یک فرد	بازگشت به خانه	خرید خانه
بازه زمانی (ساعت)	۷-۸	۸-۹	۱۷-۱۸	۱۹-۲۰
مسافت (کیلومتر)	۱۲/۲۱	۳/۲۴	۱۴/۴۲	۳/۱۶

جدول (۹): خروجی‌های برنامه به‌ازای ورودی‌های قطعی

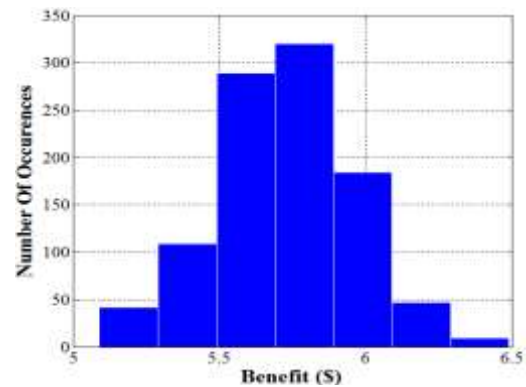
جدول (۸)

بازه زمانی (ساعت)	۰	۱	۲	۳	۴	۵
$E_{dch,t}$ (kWh)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
$E_{ch,t}$ (kWh)	۰/۰۹۴	۰/۰۷۲	۱/۷۲۲	۱/۷۲۲	۰/۵۱۱	۰/۱۶۸
E_t (kWh)	۰/۰۹۴	۰/۱۶۶	۱/۸۸۹	۳/۶۱۱	۴/۱۲۲	۴/۲۹۰
SOC_t (%)	۰/۱۰۵	۰/۱۸۵	۲/۰۹۹	۴/۰۱۲	۴/۵۸۰	۴/۸۳۶۷
بازه زمانی (ساعت)	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
$E_{dch,t}$ (kWh)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
$E_{ch,t}$ (kWh)	۸۵/۷۱	۰	۰	۰	۰	۸۵/۷۱۰
E_t (kWh)	۹۰	۸۷/۴۶۹	۸۶/۷۹۷	۹۰	۴/۲۹۰	۴/۲۹۰
SOC_t (%)	۱۰۰	۹۷/۱۸۸	۹۶/۴۴۱	۱۰۰	۴/۸۳۶۷	۴/۸۳۶۷
بازه زمانی (ساعت)	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
$E_{dch,t}$ (kWh)	۱/۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
$E_{ch,t}$ (kWh)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
E_t (kWh)	۲/۹۹۰	۲/۹۹۰	۲/۹۹۰	۲/۹۹۰	۲/۹۸۹	۵/۶۵۵
SOC_t (%)	۳/۳۳۳	۳/۳۳۳	۳/۳۳۳	۳/۳۳۳	۳/۳۳۱	۶/۲۸۳
بازه زمانی (ساعت)	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳
$E_{dch,t}$ (kWh)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
$E_{ch,t}$ (kWh)	۵/۶۵۵	۰	۰	۰	۰	۰
E_t (kWh)	۵	۱/۳۵	۰	۰	۰	۰
SOC_t (%)	۵/۵۵۶	۱/۳۸۹	۰	۰	۰	۰

Ω (\$)
۵/۷۴۸



شکل (۴): نمودار فراوانی وضعیت دوم (وجود قابلیت اتصال به شبکه و استفاده از شارژر ۷۲ آمپری)



شکل (۵): نمودار فراوانی وضعیت سوم (وجود قابلیت اتصال به شبکه و استفاده از سوپرشارژر)

مقادیر انتظاری سود صاحب خودرو با توجه به نمودارهای فراوانی فوق، به‌ترتیب $۰/۴۲۰۵$ ، $۵/۴$ و $۵/۸۳۴۴$ برای حالت‌های اول، دوم و سوم به دست می‌آیند. همان‌طور که انتظار می‌رفت میزان متوسط سود در وضعیت سوم بیشتر از بقیه خواهد بود؛ دلیل این امر استفاده از سوپرشارژر و وجود قابلیت اتصال به شبکه است. به عبارتی، در این حالت برای انجام کارهای عادی و روزمره با یک خودروی الکتریکی، هزینه‌ای پرداخت نمی‌شود و در طول روز نیز با شرایطی که ذکر شد، درآمد چشمگیری به دست می‌آید. وضعیت نخست طبیعتاً درآمدی ایجاد نخواهد کرد؛ زیرا خودرو به شبکه متصل نیست؛ بنابراین سود آن منفی خواهد شد. سود انتظاری وضعیت دوم مناسب است؛ ولی از مورد سوم کمتر است و دلیل آن، استفاده از شارژر ۷۲ آمپری است. مشاهده می‌شود در این وضعیت به‌ازای برخی حالات تصادفی، سود، منفی نیز می‌شود؛ ولی مقدار انتظاری پذیرفتنی است.

۴- نتیجه‌گیری

برای افزایش انگیزه اقتصادی صاحبان خودرو، در این مقاله به بیشینه‌کردن سود آنها با برنامه‌ریزی هوشمندانه شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی پرداخته شد که در آن SOC ساعتی باتری نیز در نظر گرفته شده است. همچنین مسافت طی‌شده خودرو در هر ساعت در مسئله دیده شده است. با استفاده از روش ارائه‌شده، صاحب خودرو ضمن انجام کارهای روزمره خود با خودروی الکتریکی، سود هم به دست می‌آورد. نتایج به‌دست‌آمده برای سود صاحب خودرو و همین‌طور مقدار انتظاری آن، کارآمد بودن روش ذکر شده و صحت آن را به اثبات رسانید. بهترین وضعیت هم مربوط به استفاده از سوپرشارژرها و با در نظر گرفتن قابلیت اتصال به شبکه بود. همچنین در قسمت سوم برنامه‌ریزی قطعی نیز برای اتوموبیل مطرح شد که جنبه عملیاتی دارد. شرایط اولیه برنامه از شارژ باقی‌مانده در خودرو به دست می‌آید و با وارد کردن رفتار رانندگی در روز به این برنامه خروجی شارژ و دشارژ بهینه به دست آمده است که به صورت هوشمند به خودرو منتقل می‌شود. لازمه عملیاتی شدن آن، وجود ایستگاه‌های شارژ بیشتر در نقاط مختلف، پیشرفت شارژرها، پیشرفت صنعت باتری خودرو و درنهایت، هوشمند شدن شبکه برق است که به نظر می‌آید رسیدن به این نقطه در آینده‌ای نه‌چندان دور، امکان‌پذیر باشد.

مراجع

- Electric Vehicle Charging," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 2, pp. 693-702, March 2014.
- [6] X. Luo and K. W. Chan, "Real-time scheduling of electric vehicles charging in low-voltage residential distribution systems to minimise power losses and improve voltage profile," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, No. 3, pp. 516-529, March 2014.
- [7] M. Ş Kuran, A. Carneiro Viana, L. Iannone, D. Kofman, G. Mermoud and J. P. Vasseur, "A Smart Parking Lot Management System for Scheduling the Recharging of Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 6, pp. 2942-2953, Nov. 2015.
- [8] F. Baccino, S. Grillo, S. Massucco and F. Silvestro, "A Two-Stage Margin-Based Algorithm for Optimal Plug-in Electric Vehicles Scheduling," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 2, pp. 759-766, March 2015.
- [9] V. Aravinthan and W. Jewell, "Controlled Electric Vehicle Charging for Mitigating Impacts on Distribution Assets," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 2, pp. 999-1009, March 2015.
- [10] L. Zhang and Y. Li, "A Game-Theoretic Approach to Optimal Scheduling of Parking-Lot Electric Vehicle Charging," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 6, pp. 4068-4078, June 2016.
- [11] Performance and safety. (2016). Retrieved from <https://www.teslamotors.com/models>.
- [12] H. Sugihara, K. Yokoyama, O. Saeki, K. Tsuji and T. Funaki, "Economic and Efficient Voltage Management Using Customer-Owned Energy Storage Systems in a Distribution Network With High Penetration of Photovoltaic Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 1, pp. 102-111, Feb. 2013.
- [13] E. Pashajavid and M. A. Golkar, "Charging of plug-in electric vehicles: Stochastic modelling of load demand within domestic grids," *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*, Tehran, 2012, pp. 535-539.
- [14] D. Tang and P. Wang, "Probabilistic Modeling of Nodal Charging Demand Based on Spatial-Temporal Dynamics of Moving Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 2, pp. 627-636, March 2016.
- [1] Y. He, B. Venkatesh and L. Guan, "Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 3, pp. 1095-1105, Sept. 2012.
- [2] D. Wu, D. C. Aliprantis and L. Ying, "Load Scheduling and Dispatch for Aggregators of Plug-In Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 368-376, March 2012.
- [3] M. A. Ortega-Vazquez, "Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, No. 6, pp. 1007-1016, June 2014.
- [4] D. T. Nguyen and L. B. Le, "Joint Optimization of Electric Vehicle and Home Energy Scheduling Considering User Comfort Preference," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 1, pp. 188-199, Jan. 2014.
- [5] L. Yang, J. Zhang and H. V. Poor, "Risk-Aware Day-Ahead Scheduling and Real-time Dispatch for

¹ Electric Vehicle

² Grid

³ Vehicle to Grid

⁴ Plug In Electric Vehicle

⁵ Aggregator

⁶ Day-ahead

⁷ Real-time

⁸ Non-Cooperative Game Theory

⁹ State of Charge

¹⁰ Weibull

¹¹ Expected Profit

¹² Cross-over

¹³ Scattered

¹⁴ Mutation

¹⁵ Uniform