مدیریت و کمینه‌سازی هزینه انرژی با ساختار نیروگاه مجازی و در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه

حسن براتی[۱]، استادیار؛ فرشید عشیر[۲]، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - واحد دزفول - دانشگاه آزاد اسلامی - دزفول - ایران - barati216@gmail.com
۲- گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - واحد اهواز - دانشگاه آزاد اسلامی - اهواز - ایران - ashirfarshid@gmail.com

چکیده: نیروگاه‌های مجازی از جمله مواردی هستند که پس از تجدید ساختار سیستم‌های قدرت وارد شبکه شده‌اند. این نیروگاه‌ها، در حقیقت مجموعه‌ای از مشترکین هستند که توانایی مصرف و تولید توان دارند. با گسترش استفاده از خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه، مدیریت انرژی در این نوع نیروگاه‌ها نیازمند تحقیق و بررسی بیش‌تری است چرا که این خودروها توانایی دریافت و تزریق توان از / به شبکه را دارند. از این رو مطالعه تأثیر حضور این خودروها در مدیریت انرژی نیروگاه‌های مجازی ضرورت دارد. در این مقاله، مدیریت مصرف/تولید توان در نیروگاه‌های مجازی با حضور خودروهای الکتریکی هیبریدی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. تابع هدف مسئله مدیریت انرژی در نیروگاه‌های مجازی، کمینه‌کردن هزینه کلی می‌باشد که شامل هزینه‌های تولید انرژی در واحدهای نیروگاهی، سوخت و استهلاک باتری خودروها و هزینه خرید برق از شبکه می‌باشد. همچنین قیود عملکردی نیروگاه‌ها، بارها و خودروهای هیبریدی و نیز میزان هزینه جریمه در ازای تولید گازهای گلخانه‌ای (CO_2 و NOx) توسط واحدهای نیروگاهی و خودروها در نظر گرفته شده است. برای پیاده‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری از محیط نرم‌افزاری GAMS و سیستم قدرت نمونه استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: منابع انرژی پراکنده، نیروگاه مجازی، خودروهای الکتریکی هیبریدی، کمینه‌سازی هزینه انرژی، کمینه‌سازی گازهای گلخانه‌ای.

Management and Minimization of Energy Cost with Virtual Power Plant Formation and Considering Plug-in Hybrid Electric Vehicles

H. Barati[1], Assistant Professor; F. Ashir[2], MSc Student

1- Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran, barati216@gmail.com
2- Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, ashirfarshid@gmail.com

Abstract: Virtual power plants are among the cases that have entered to the network after restructuring of the power network. These plants are in fact a set of users that have the ability to use and generate power. With the widespread use of plug-in hybrid electric vehicles, energy management in this type of power plants requires further investigation because these vehicles are able to receive and inject power from/to the network. Therefore the study of the effect of the presence of these vehicles in the management of virtual power plants is necessary. In this thesis power consumption/generation in virtual plants has been studied in the presence of hybrid electric vehicles. The objective function of the management of virtual power plants problem is minimizing the overall cost which includes the cost of energy production in power generation units' fuel and the vehicles battery degradation cost and the cost of buying electricity from the grid; also the plant function, loads and hybrid vehicle constraints are considered. Among other item that is included in this paper is: the cost of penalty for emissions of greenhouse gases (CO2, NOx) by power generating units and vehicles. For computer implementation and simulation GAMS software system and sample power system are applied.

Keywords: Distributed energy resources, virtual power plant, hybrid electric vehicles (HEV), minimize energy cost, minimize greenhouse gases.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۵
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۶ و ۱۳۹۵/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۷
نام نویسنده مسئول: حسن براتی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - دزفول - کوی آزادگان - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق.

فهرست علائم

• پارامترها

T،U،V: مجموعه PHEVها، EPها و فاصله‌های زمانی

$I_{v,t}$: در صورتی که PHEV vام در زمان t در دسترس باشد ۱ و در غیر این صورت صفر است.

l_t^{TIE}: تقاضای انرژی برای تأمین بارهای TIE در زمان t (kWh)

$\underline{G_{u,t}}$ و $\overline{G_{u,t}}$: بیشینه و کمینه انرژی تولیدی توسط uامین EP (تأمین‌کننده انرژی) در زمان t (kWh)

$\underline{P_v}$, $\overline{P_v}$: بیشینه و کمینه شارژ باتری vامین PHEV (kWh)

$P0_V$: انرژی اولیه ذخیره‌شده در باتری vامین PHEV (kWh)

ρ_v^- , ρ_v^+: مقدار کل انرژی قابل انتقال به/ از vامین PHEV در مدت یک پریود زمانی (kWh)

τ_u^- , τ_u^+: حداقل زمان روشن و خاموش بودن uامین EP

η_u^{EP}: بازده uامین EP با توجه به تلفات سمت نیروگاه و سیستم انتقال

η_v^- , η_v^+: بازده شارژ و دشارژ باتری vامین PHEV

$C_{u,t}^{EP}$: قیمت خرید انرژی از uامین EP در زمان t (توسط VPP به uامین EP پرداخته می‌شود)

C_t^{gas}: قیمت بنزین در زمان t

CS_v: میانگین استفاده بنزین vامین PHEV (گالن بر مایل)

$d_{v,t}^{total}$: کل مسافت پیموده‌شده در زمان t توسط vامین PHEV (مایل)

E_V: انرژی مورد نیاز برای این که vامین PHEV یک مایل را با استفاده از برق طی کند (kWh /mile)

• متغیرها

$e_{u,t}^{EP}$: مقدار انرژی تأمین‌شده توسط uامین EP در زمان t (kWh)

$e_{v,t}^{PHEV}$: سطح انرژی باتری vامین PHEV در پایان زمان t (kWh)

$e_{v,t}^-$, $e_{v,t}^+$: انرژی انتقال‌داده‌شده به / از vامین PHEV در زمان t (kWh)

$x_{v,t}$: اگر در پریود t، vامین PHEV در حال شارژ باشد یک و در غیر این صورت صفر است.

$d_{v,t}^{CD}$, $d_{v,t}^{CS}$: مسافت پیموده‌شده در مد CD (شارژ-تخلیه) و مد CS (شارژ-نگه‌داری)، در زمان t توسط vامین PHEV (مایل)

$E_{v,t}^{req}$: انرژی مورد نیاز برای vامین PHEV در زمان t (kWh)

$\delta_{v,t}$: DOD (عمق تخلیه) برای vامین PHEV در زمان t

$f(\delta)$: هزینه مورد نیاز جایگزینی باتری به‌عنوان تابعی از DOD

$O_{u,t}$, $S_{u,t}$, $Z_{u,t}$: اگر uامین EP آنلاین، شروع به کار شده یا خاموش باشد یک و در غیر این صورت صفر هستند.

۱- مقدمه

با گرایش رو به رشد به منابع و تکنولوژی‌های متنوع انرژی، نفوذ زیاد PHEV[1]ها (خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه) در شبکه برق و استفاده گسترده از DER[2]ها (منابع انرژی پراکنده) مانند میکروتوربین‌ها، پیل سوختی، سیستم‌های فتوولتائیک و سیستم‌های بادی، در آینده نزدیک پیش‌بینی می‌شود [۱]. هزینه انرژی، عدم قطعیت در تولید، نگرانی‌های زیست‌محیطی مصرف سوخت‌های فسیلی و روند کاهشی این منابع، جهان را به بازنگری در ترکیب منابع تولید انرژی مجبور ساخته و باعث گسترش منابع مختلف تجدیدپذیر و تولید انرژی پاک شده است. با استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی، مشترکین به غیر از هزینه تولید دیگر مجبور به پرداخت هزینه‌های انتقال و توزیع انرژی و نیز به‌طور غیرمستقیم هزینه‌های مربوط به ضایعات سلامتی و پاک‌سازی محیط زیست نیستند [۲]. همچنین مدیریت بهینه انرژی با حضور منابع تولید پراکنده، سبب کاهش هزینه‌های تولید و نیز کاهش هزینه برق مصرفی می‌شود. در مرجع [۳]، از یک سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری، جهت بهره‌برداری بهینه از منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبکه متصل به شبکه سراسری به‌منظور کمینه‌سازی هزینه کلی تولید و نیز کاهش قیمت برق مصرفی استفاده شده است. از سوی دیگر پیشرفت‌های پی‌درپی در خودروهای الکتریکی، منجر به استفاده گسترده از آن‌ها شده است، چنانچه تعداد قابل توجهی از این خودروها در آینده سیستم قدرت قابل تصور است. استفاده از خودروهای الکتریکی مخصوصاً خودروهای هیبریدی با قابلیت اتصال به شبکه مزایای زیادی از جمله: کاهش آلودگی‌های CO_2، NO_X و پیک‌زایی در زمان‌های کم‌باری با افزایش مصرف (شارژ باتری) و پیک‌زدایی در زمان‌های پیک بار به‌وسیله تزریق توان (تخلیه باتری) دارد. PHEVها به‌دلیل این که قابلیت فراهم کردن انرژی برای شبکه را دارند DER نیز محسوب می‌شوند. چندین تولیدکننده انرژی و DER را می‌توان برای تأمین تقاضای بار گرد هم آورد. در مرجع [۴]، جهت کمینه‌سازی هزینه برق، از حضور خودروهای الکتریکی (شارژ و دشارژ آن‌ها) در کنار منابع تولید پراکنده برای مدیریت انرژی خانه هوشمند بهره‌گیری شده است. استفاده از PHEVها به‌عنوان DER علیرغم فوایدشان مسئله برنامه‌ریزی منابع انرژی را پیچیده می‌کند و جمع‌کردن چندین واحد تولیدی مختلف این چالش را بیشتر خواهد نمود. بنابراین، برنامه‌ریزی انرژی در این زمینه یک موضوع اضطراری است و استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی (VPP[3]) می‌تواند در حل مسئله برنامه‌ریزی و مدیریت منابع انرژی مفید باشد.

نیروگاه مجازی که به‌تازگی معرفی شده است، مسئول تجمیع و برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده است. VPP گردآورنده منابع انرژی پراکنده و هماهنگ‌کننده سازمان‌های مختلف و دیگر بازیگران موجود در محیط شبکه می‌باشد. انرژی را از DERها دریافت کرده و برای تأمین بار در شبکه توزیع با مشتریان قرارداد می‌بندد. برای این هدف، مسائل اقتصادی با مقیاس کاملاً جدید ایجاد می‌شود [۱]. ایده اصلی

VPP، تجمیع انواع مختلف منابع انرژی پراکنده به‌منظور استفاده بهتر از این منابع و از طریق توسعه زیرساخت‌های ارتباطی پیشرفته می‌باشد.

مقالات مختلفی مسئله برنامه‌ریزی انرژی در شبکه‌هایی که PHEVها در آن‌ها نفوذ کرده‌اند را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۱-۵]، اگر چه در این تحقیقات روش مدیریت انرژی و یا مدل‌های تحلیل بازار ارائه شده است؛ اما آثار آلودگی و هزینه به وضوح در مطالعات پیش برده نشده‌اند. در مرجع [۱۲] ارزش PHEVها به‌عنوان منابع شبکه را تحلیل کرده و شارژ باتری PHEVها را مدل کرده‌اند. در واقع این یک مدل از مشارکت واحدها در سیستم قدرت طبق ERCOT[۴] (انجمن قابلیت اطمینان برق تگزاس) است. که به‌صورت MILP[۵] (برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح) فرمول‌بندی شده است. هدف مدل حداقل کردن هزینه کلی سیستم است؛ که شامل هزینه ژنراتورها و هزینه کارکرد PHEVها می‌باشد. این مطالعه، هزینه تأثیر آلودگی در حوزه شبکه را در نظر گرفته است اما DER و VPP در این مطالعه در نظر گرفته نشده‌اند. بعداً مطالعه دیگری در مرجع [۱۳] ارائه شده که از همان مدل استفاده کرده و برای گرفتن تصمیمات راندن و شارژ کردن PHEV توسط صاحبش، مدل دیگری را نیز دخیل کرده است و در آن با ترکیب کردن این دو مدل، انگیزه‌های راننده‌ها با تعرفه برق متفاوت را مورد آزمایش قرار می‌دهد. با این وجود قابلیت استفاده از باتری PHEV به‌عنوان ذخیره انرژی در نظر گرفته نشده است. مرجع [۱۴] به موضوع تأثیر تجمیع بهینه خودروهای هیبریدی قابل اتصال به شبکه بر کارایی اقتصادی ریزشبکه پرداخته‌اند. از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، جهت عدم قطعیت مسافت روزانه طی‌شده توسط PHEVها، مقادیر بار و قیمت بازار استفاده شده است؛ همچنین برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که به‌دنبال کمینه‌سازی هزینه کلی ریزشبکه می‌باشد.

مرجع [۱] به اهمیت تشکیل VPP با در نظر گرفتن نفوذ خودروهای الکتریکی هیبریدی در شبکه پرداخته و آثار هزینه و انتشار آلایندگی را بررسی و با ارائه روشی اقدام به برنامه‌ریزی منابع انرژی پراکنده و خودروهای الکتریکی با کمک مفهوم نیروگاه مجازی در جهت کمینه‌سازی هزینه انرژی نموده است اما هزینه ناشی از خسارات تولید آلودگی زیست محیطی توسط واحدهای نیروگاهی و خودروها در نظر گرفته نشده است.

هدف از این مقاله، ارائه روشی برای مدیریت منابع انرژی توسط VPPدر حضور خودروهای الکتریکی هیبریدی جهت کمینه‌سازی هزینه کلی VPP می‌باشد. در این مقاله، علاوه بر کاهش هزینه انرژی با قرار دادن نرخ جریمه برای تولید آلایندگی زیست محیطی انتشار گازهای گلخانه‌ای در تابع هزینه باعث کمینه‌سازی هزینه کلی و انتشار آلایندگی CO2 و NOx شده است.

در ادامه ساختار کلی مقاله عبارت است از: فرمول‌بندی مسئله مدیریت انرژی در نیروگاه‌های مجازی با حضور خودروهای هیبریدی و قیود مربوطه، نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری و تحلیل آن‌ها (سیستم مورد مطالعه، سناریوهای مختلف)، نتیجه‌گیری، مراجع و پیوست آورده شده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله مدیریت انرژی در نیروگاه‌های مجازی با حضور خودروهای هیبریدی

نیروگاه مجازی درنظرگرفته‌شده در این مقاله، از واحدهای میکروتوربین، خورشیدی، بادی، پیل سوختی، زیست‌توده (بیوماس)، نیروگاه آبی کوچک و زمین‌گرمایی تشکیل شده است و در صورت لزوم امکان خرید انرژی از شبکه بالادستی را نیز دارد. در ادامه تابع هدف و قیود مسئله تشریح شده‌اند.

۲-۱- فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی نیروگاه مجازی

فرض می‌شود که گروهی از مردم یک VPP را جهت حداقل کردن هزینه جمعی و به‌دست‌آوردن فواید اقتصادی شکل می‌دهند. در ابتدا، این گروه، برق را از شبکه ملی با تعرفه‌ای مشخص می‌گیرند. با شکل دادن VPP این گروه از مشترکین می‌توانند انرژی مورد نیاز خود را از مجموعه مختلف EP[۶]ها (تأمین‌کنندگان انرژی) جهت کاهش هزینه‌ها دریافت کنند. در این زمینه تعدادی نیروگاه مقیاس کوچک (EP) وجود دارند که شامل واحدهای میکروتوربین، خورشیدی، بادی، پیل سوختی، بیوماس، نیروگاه آبی کوچک، زمین‌گرمایی و شبکه ملی می‌باشد. هزینه تأمین انرژی از EPها در طول زمان تغییر می‌کند. هر EP یک بازده و حداقل و حداکثر تأمین توان دارد. VPP مسئول به‌دست‌آوردن سطح انرژی مورد نیاز از EPها و تحویل آن به مجموعه‌ای از مشترکین با بارهای TE[۷] (کشسان با زمان) و TIE[۸] (غیرکشسان با زمان) است. در صورت نیاز VPP می‌تواند با تخلیه کردن PHEVها از آن‌ها انرژی دریافت کند.

باتری PHEV یک بازده شارژ دارد که درصدی از انرژی است که واقعاً می‌تواند ذخیره کند. به‌طور مشابه بازده تخلیه نیز درصدی از انرژی ذخیره‌شده در باتری PHEV می‌باشد که می‌تواند به VPP تحویل دهد. هر PHEV یک سطح اولیه شارژ دارد که در طول روز می‌تواند شارژ/دشارژ شود و انرژی مصرف کند. PHEVها به یک سطح حداقل انرژی نیاز دارند و سطح شارژ باتری پایین‌تر از آن نمی‌تواند برود. یک PHEV در مد CD[۹] (تخلیه شارژ) به مدتی که مقدار شارژ باتری بالاتر از حداقل سطح شارژ باشد حرکت می‌کند. هنگامی که شارژ باتری به سطح حداقل برسد به مد CS[۱۰] (ثابت نگه داشتن شارژ) می‌رود و برای حرکت از بنزین استفاده می‌کند.

برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ یک تصمیم مشترک بین VPP و صاحب PHEV است. صاحب PHEV تصمیم می‌گیرد چه موقع متصل شود، اتصال چه مدتی باشد و چه مسافتی را می‌خواهد با آن طی کند. در حقیقت VPP مسئول تصمیمات برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ است و انرژی را برای PHEV با در نظر گرفتن هزینه برق و بنزین تأمین

می‌کند. VPP با پخش بار بین EPها به همان صورتی که ضروری است به این برنامه‌ریزی خواهد رسید.

در این مقاله، هدف مدیریت انرژی VPP، حداقل کردن هزینه کلی انرژی برای تأمین بار و ایجاد برنامه‌های شارژ و دشارژ PHEVها می‌باشد. در هزینه کلی، میزان آلودگی تولیدشده توسط خودروها و واحدها نیز در نظر گرفته شده است. در حقیقت در این مدل، به‌ازای تولید هر کیلوگرم گاز گلخانه‌ای یک مقدار جریمه در نظر گرفته شده است که بایستی VPP به نهاد مربوط به محیط زیست پرداخت نماید. این امر موجب خواهد شد که برنامه‌ریزی با هدف کمینه کردن هزینه و آلودگی تولید انجام شود.

تابع هدف مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$C_1=\sum_{t\in T}\left[\sum_{u\in U}c_{u,t}^{EP}\times e_{u,t}^{EP}+\sum_{u\in U}c_u^{SU}\times s_{u,t}\right]+\sum_{t\in T}\left[\sum_{v\in V}\left(c_t^{gas}\times cs_v\times d_{v,t}^{CS}+[f(\delta_{v,t})-f(\delta v,t-1)]^{+}\right)\right] \quad (1)$$

به طوری که

$$\underline{p}_v\le e_{v,t-1}^{PHEV}\le \bar{p}_v;\forall_{v\in}V,\forall t\in T \quad (2)$$

$$e_{v,t}^{PHEV}=e_{v,t-1}^{PHEV}+\eta_v^{+}\times e_{v+t}^{+}-\frac{1}{\eta_v^{-}}\times e_{v+t}^{-}-E_{v,t}^{reg};\forall v\in V,\forall t\in V \quad (3)$$

$$e_{v,0}^{PHEV}=PO_v;\forall v\in V \quad (4)$$

$$e_{v,t}^{+}\le\rho_v^{+}\times I_{v,t}\times x_{v,t};\forall v\in V,\forall t\in T \quad (5)$$

$$e_{v,t}^{-}\le\rho_v^{-}\times I_{v,t}\times\left(1-x_{v,t}\right);\forall v\in V,\forall t\in T \quad (6)$$

$$d_{v,t}^{CD}\le \mathrm{d}_{v,t}^{total};\forall v\in V,\forall t\in T \quad (7)$$

$$d_{v,t}^{CD}\le\frac{\left(e_{v,t-1}^{PHEV}-\underline{p}_v\right)}{E_v};\forall v\in V,\forall t\in T \quad (8)$$

$$d_{v,t}^{CS}\le \mathrm{d}_{v,t}^{total}-d_{v,t}^{CD};\forall v\in V,\forall t\in T \quad (9)$$

$$E_{v,t}^{req}=d_{v,t}^{CD}\times E_v;\forall v\in V,\forall t\in T \quad (10)$$

$$\delta_{v,t}=1-\frac{e_{v,t}^{PHEV}}{\bar{p}_v};\forall v\in V,\forall t\in T \quad (11)$$

$$\sum_{u\in U}\eta_u^{EP}\times e_{u,t}^{EP}+\sum_{v\in V}e_{v,t}^{-}=\sum_{v\in V}e_{v,t}^{+}+l_t^{TIE};\forall t\in T \quad (12)$$

$$o_{u,t}\times G_{u,t}\le e_{u,t}^{EP}\le o_{u,t}\times\bar{G}_{u,t};\forall u\in U,\forall t\in T \quad (13)$$

$$o_{u,t}-o_{u,t-1}=s_{u,t}+z_{u,t};\forall u\in U,\forall t\in T \quad (14)$$

$$\sum_{y=t-\tau_u^{+}}^{}s_{u,y}\le o_{u,t};\forall u\in U,\forall t\in T \quad (15)$$

$$\sum_{y=t-\tau_u^{-}}^{}z_{u,y}\le 1-o_{u,t};\forall u\in U,\forall t\in T \quad (16)$$

$$\mathrm{x}_{v;t},\mathrm{o}_{u;t},\mathrm{s}_{u;t},\mathrm{z}_{u;t}\in\{0,1\};\ \forall u\in U,\forall v\in V,\forall t\in T \quad (17)$$

$$\mathrm{e}_{u,t}^{\mathrm{EP}},\mathrm{e}_{v,t}^{\mathrm{PHEV}},\mathrm{e}_{v,t}^{+},\mathrm{e}_{v,t}^{-},\mathrm{E}_{v,t}^{\mathrm{req}},d_{v,t}^{CD},d_{v,t}^{CS},\delta_{v,t}\ge 0;\ \forall u\in U,\forall v\in V,\forall t\in T \quad (18)$$

تابع هدف، هزینه کلی سیستم را کمینه می‌کند. هزینه کل شامل هزینه تولید انرژی، هزینه شروع به کار EPها، هزینه بنزین و هزینه استهلاک باتری خودروها که تابعی از عمق تخلیه (DOD) است. در رابطه (۱)، عبارت $\sum_{u\in U}c_u^{SU}\times s_{u,t}$ مربوط به هزینه راه‌اندازی واحدها می‌باشد. البته میزان آلودگی زیست محیطی انتشار گازهای آلاینده CO2 و NOx به‌صورت هزینه جریمه در نظر گرفته شده که می‌توان رابطه آن را به‌صورت زیر نوشت:

$$C_2=\sum_{t\in T}\left[\alpha_c\left(\sum_{u\in U}CO2_u^{EP}\times e_{u,t}^{EP}+\sum_{v\in V}CO2_v^{PHEV}\times d_{v,t}^{CS}\right)\right]+\sum_{t\in T}\left[\alpha_n\left(\sum_{u\in U}NOx_u^{EP}\times e_{u,t}^{EP}+\sum_{v\in V}NOx_v^{PHEV}\times d_{v,t}^{CS}\right)\right] \quad (19)$$

در این رابطه،

α_c : ضریب جریمه به‌ازای تولید هر گرم CO_2 (دلار برگرم)

α_n: ضریب جریمه به‌ازای تولید هر گرم NOx (دلار برگرم)

$CO2_u^{EP}$: مقدار تولید CO_2 توسط uامین EP (گرم بر کیلووات ساعت)

$CO2_v^{PHEV}$: مقدار تولید CO_2 توسط vامین PHEV (گرم بر مایل)

NOx_u^{EP}: مقدار تولید NOx توسط uامین EP (گرم بر کیلووات ساعت)

NOx_v^{PHEV}: مقدار تولید NOx توسط vامین PHEV (گرم بر مایل)

تابع هدف که در این مقاله در نظر گرفته شده از اضافه کردن رابطه (۱۹) به رابطه (۱) حاصل می‌شود.

$$C_t=C_1+C_2 \quad (20)$$

۲-۲- قیود مسئله

قیدهای (۲) تا (۱۱) به PHEVها مربوط هستند که در آن، (۲) محدودیت‌های کمینه و بیشینه شارژ را برای هر PHEV اعمال می‌کند. (۳) رابطه بین انرژی موجود در باتری در زمان‌های متوالی را نشان می‌دهد. اگر باتری شارژ (تخلیه) شود، سطح انرژی ذخیره‌شده در باتری در پریود بعد افزایش (کاهش) داده می‌شود. (۴) سطح اولیه

باتری هر PHEV را تنظیم می‌کند. (۵) و (۶) اطمینان می‌دهند که شارژ و تخلیه در هر پریود به‌صورت هم‌زمان اتفاق نیفتند و این که فقط زمانی می‌توانند رخ دهند که PHEV به شبکه متصل باشد. (۷) و (۸) مسافت پیموده‌شده در مد CD (تخلیه) را به حداقل «مسافت واقعی سفر» و «مسافت امکان‌پذیر با انرژی باقیمانده در دسترس در باتری PHEV» وادار می‌کنند. (۹) مسافت مد CS را تنظیم می‌کند. (۱۰) انرژی مورد نیاز برای طی مسافت سفر تعیین‌شده را محاسبه می‌کند. (۱۱) DOD هر پریود را محاسبه می‌کند. قیدهای (۱۲) تا (۱۶) مربوط به EPها هستند. (۱۲) معادله تعادل انرژی است. جمع کل انرژی به‌دست‌آمده از EPها و انرژی تخلیه‌شده از باتری‌ها برابر با انرژی تأمین‌شده برای PHEVها و بارهای TIE (غیرکشسان با زمان) است. (۱۳) اطمینان می‌دهد که ظرفیت‌های حداقل و حداکثر هر EP دیده شده‌اند؛ و اگر انرژی توسط uامین EP در پریود t تولید می‌شود، متغیر باینری $O_{u,t}$ را مجبور به گرفتن مقدار یک می‌کند. (۱۴) متغیرهای باینری خاموش کردن و شروع به کار کردن را تنظیم می‌کند. قیدهای (۱۵) و (۱۶) حداقل زمان‌های خاموش و روشن بودن EPها را اعمال می‌کنند. در نهایت (۱۷) متغیرهای باینری را تعریف می‌کند و (۱۸) متغیرها را نامنفی می‌کند.

برای حل مسئله مورد نظر از برنامه‌ریزی آمیخته با عدد صحیح (MIP) و حل‌کننده Cplex در محیط نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. روندنمای حل مسئله در شکل ۱ آورده شده است.

۳- نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری و تحلیل آن‌ها

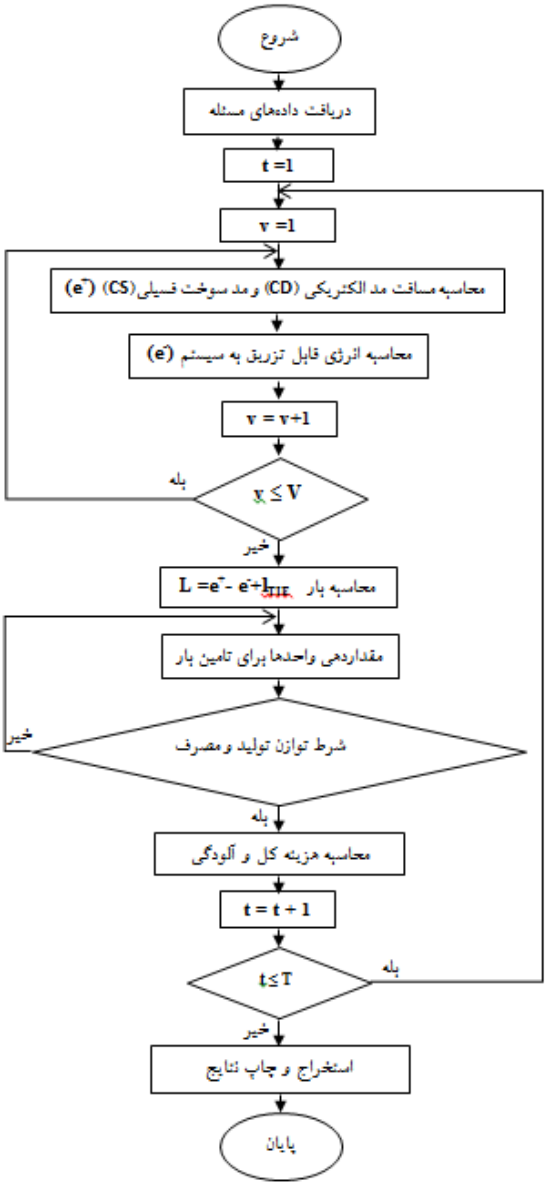
در این بخش به بررسی تأثیر تشکیل VPPها بر هزینه و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته شده است و هدف، کمینه کردن هزینه کل و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد که در یک تابع هدف گنجانده شده‌اند.

۳-۱- معرفی سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، یک VPP در نظر گرفته شده است که شامل ۲۱۳ خودرو الکتریکی هیبریدی (PHEV) می‌باشد. این خودروها شامل ۴ نوع مختلف می‌باشد که مشخصات فنی آن‌ها از دپارتمان حمل و نقل آمریکا گرفته شده و در جدول ۱ آورده شده است [۱].

در جدول ۱، انرژی مورد نیاز خودرو به‌ازای هر مایل (E_v)، ظرفیت باتری خودرو ($\overline{P_v}$) هزینه باتری و مسافتی که خودرو در مد کاری CS به ازای هر گالن سوخت می‌تواند طی کند، آورده شده است. کمینه سطح شارژ باتری ($\underline{P_v}$) و سطح انرژی اولیه باتری (P_{0v}) به‌ترتیب برابر با ۱۰٪ و ۳۰٪ ظرفیت باتری خودروها در نظر گرفته شده است. بازده شارژ و دشارژ باتری‌ها (η_v^- و η_v^+) برابر با ۹۰٪ در نظر گرفته شده است. نرخ شارژ/ دشارژ تمامی خودروها (ρ_v^+ و ρ_v^-) ۲/۴ کیلووات فرض شده است. خودروهای هیبریدی در دو مد کاری الکتریکی (CD) و سوخت فسیلی (CS) می‌توانند حرکت کنند. از آنجایی که تعداد خودروها ۲۱۳ دستگاه و از انواع مختلف می‌باشند آوردن داده‌های مربوط به در دسترس بودن و همچنین مسافتی که هر کدام از آن‌ها در هر ساعت و در یک بازه ۲۴ ساعته طی می‌کند در این مقاله امکان‌پذیر نمی‌باشد.

فرض شده است که ۳۴ نیروگاه مقیاس کوچک (EP) در VPP مورد مطالعه قرار دارند. اطلاعات مربوط به این واحدها از کمیته راهنمای انرژی DER کالیفرنیا گرفته شده و در جدول ۲ آورده شده است. کمینه توان تولیدی این واحدها برابر با ۵ کیلووات، کمینه زمان خاموش / روشن بودن واحدها برابر با یک ساعت فرض شده است.



شکل ۱: روندنمای حل مسئله برنامه‌ریزی انرژی نیروگاه مجازی

مدل ارائه‌شده در این مقاله به صورتی است که VPP می‌تواند بخشی از انرژی خود را از شبکه دریافت کند. مقدار این توان دریافتی بستگی به قیمت خرید برق از شبکه در مقایسه با قیمت سایر

واحدهای تولیدی داخل VPP دارد. قیمت خرید برق از شبکه ۱۳/۲۳ سنت در هر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.

خودروها و واحدهای تولید توانی که با سوخت فسیلی کار می‌کنند، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید می‌کنند که هر دوی این گازها برای سلامتی انسان مضر هستند. میزان انتشار این دو نوع گاز توسط خودروها و واحدهای تولید توان در جدول ۳ آورده شده است. برای واحدهای خورشیدی، بادی، آبی کوچک و زمین‌گرمایی فرض شده است که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار کمی دارند. در جدول ۴ نوع و تعداد واحدهای نیروگاهی آمده است.

در VPP در نظر گرفته شده، ۵۷۴ خانه مسکونی در نظر گرفته شده است که میزان بار مصرفی آن‌ها با زمان تغییر می‌کند. در شکل ۲، مجموع بار این خانه‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز نشان داده شده است [۱]. قیمت خرید بنزین در طول دوره مورد مطالعه (۲۴ ساعت) برابر با ۳/۰۴۹ دلار بر گالن در نظر گرفته شده است. میزان مسافت طی شده توسط PHEVها در هر ساعات از شبانه‌روز با استفاده از اطلاعات واقعی لحاظ شده است [۱۵].

در این مطالعه، طول هر دوره زمانی یک ساعت در نظر گرفته شده است و محاسبات برای ۲۴ ساعت انجام گرفته است. متغیر $I_{v,t}$ که نشان‌دهنده در دسترس بودن/نبودن خودرو است برای یک ساعت در نظر گرفته شده است. اگر خودرو در دسترس باشد و قابلیت تبادل توان داشته باشد، مقدار این کمیت ۱و در غیر این صورت صفر خواهد بود.

هزینه کل VPP به‌عنوان تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی خودروها و واحدهای تولیدی در نظر گرفته شده است. برای این منظور یک تابع هزینه برای گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است. بدین معنا که VPP بایستی با توجه به نرخ جریمه تصویب‌شده توسط رگولاتور شبکه، بابت تولید گازهای گلخانه‌ای جریمه‌ای را پرداخت نماید. مقدار این جریمه به‌ازای تولید هر کیلوگرم CO_2 و NOx به‌ترتیب برابر با ۰/۱ دلار و ۱۰ دلار می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات انواع مختلف PHEVها [۱]

مدل خودرو	تعداد	انرژی مصرفی [kWh/mile]	ظرفیت باتری [kWh]	هزینه باتری [$]	میانگین مصرف سوخت در مد کاری CS (مایل بر گالن)
فشرده	۱۰۵	۰/۲۶	۸/۶	۳۱۷۸	۳۰/۲
متوسط	۲۹	۰/۳۰	۹/۹	۳۳۷۷	۲۶/۴
بزرگ	۴۷	۰/۳۸	۱۲/۵	۳۷۷۶	۲۰/۶
SUV کوچک	۳۲	۰/۴۶	۱۵/۲	۴۱۸۹	۱۸

جدول ۲: اطلاعات واحدهای تولیدی VPP

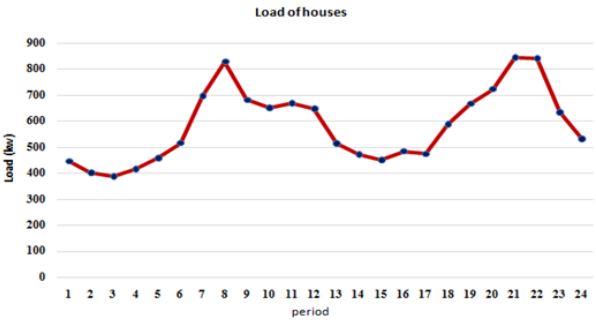
نوع واحد	تعداد واحدها	بیشینه تولید [kWh]	قیمت [¢/kWh]	بازده (٪)
میکروتوربین	۲	۵۰	۲۴/۴۳	۹۵/۸
خورشیدی	۷	۲۵	۲۶/۲۲	۷۶
بادی	۸	۵۰	۷/۲۴	۹۹/۹
بیوماس	۵	۲۸	۱۰/۸۳	۹۳
پیل سوختی	۳	۵۰	۲۶/۶۵	۸۵
آبی کوچک	۵	۱۵	۸/۶۵	۸۷/۰
زمین‌گرمایی	۴	۱۵	۸/۳۱	۹۰/۰

جدول ۳: میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

تکنولوژی	CO_2	NO_x	واحد
میکروتوربین	۵۳۹/۸	۰/۲۲۲۳	گرم بر کیلووات ساعت
بیوماس	۰	۰/۰۳۴	
پیل سوختی	۳۸۵/۶	۰/۰۰۶۸	
شبکه (متوسط)	۵۴۴/۳	۲/۲۶۷	
خودرو فشرده	۲۹۱	۰/۰۷	گرم بر مایل
خودرو متوسط	۳۳۵	۰/۰۷	
خودرو بزرگ	۳۹۵	۰/۰۷	
SUV کوچک	۴۸۰	۰/۰۷	

جدول ۴: نوع و تعداد واحدهای نیروگاهی

نوع نیروگاه	واحد
میکروتوربین	U1 - U2
خورشیدی	U3 - U9
بادی	U10 - U17
بیوماس	U18 - U22
سلول سوختی	U23 - U25
آبی کوچک	U26 - U30
زمین‌گرمایی	U31- U34
شبکه	U35



شکل ۲: بار خانه‌های موجود در VPP در ساعات مختلف شبانه‌روز

۳-۲- نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری

در این قسمت نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در قالب ۵ سناریوی مختلف در جدول ۵ آورده شده است. فرض بر آن است که خودروها تماماً در اختیار کنترل‌کننده VPP قرار دارند؛ و بابت شارژ/ دشارژ شدن هزینه رد و بدل نمی‌شود. هزینه کل VPP برای سناریوهای مختلف محاسبه شده است.

جدول ۵: نتایج سناریوهای مختلف

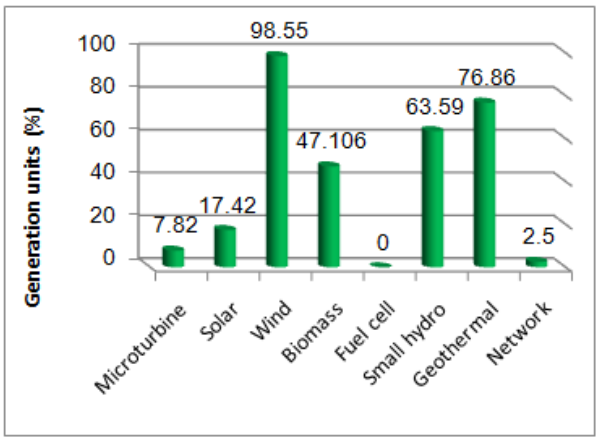
مورد	مقدار				
	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم	سناریو پنجم
هزینه کل (دلار)	۳۹۳۹	۲۵۳۱	۳۷۰۳	۲۱۸۸	۱۹۵۲
هزینه کل بدون هزینه باتری (دلار)	-	-	۳۴۲۲	۲۰۵۰	۱۶۸۴
CO_2 (کیلوگرم)	۹۸۲۴/۴	۲۴۹۵/۸	۸۸۰۹/۳	۷۶۰/۴	۴۷۹/۹
NO_X (کیلوگرم)	۳۲/۲۱۱	۱/۳۶۱	۳۴/۸۶۲	۰/۶۳۳	۰/۲۶۹

۳-۲-۱- سناریو اول

در این سناریو فرض بر آن است که کل انرژی مورد نیاز مشترکین توسط شبکه برق اصلی تأمین می‌شود و خودروها فقط در مد کاری CS (سوخت فسیلی) کار می‌کنند. این سناریو مشابه شبکه فعلی برق می‌باشد که هیچ خودرو الکتریکی در آن وجود ندارد و واحدهای تولیدی موجود در VPP در نظر گرفته نشده‌اند، بنابراین مقدار توان دریافتی از شبکه در هر ساعت برابر با بار مصرفی مشترکین در هر ساعت می‌باشد که در شکل ۲ ارائه شده است. در این سناریو هزینه کل شامل هزینه برق مصرفی مشترکین، هزینه سوخت خودروها و هزینه جریمه بابت تولید گازهای گلخانه‌ای توسط خودروها و شبکه می‌باشد.

۳-۲-۲- سناریو دوم

در این سناریو واحدهای تولیدی VPP نیز در تأمین توان مشترکین حضور داشته و خودروها الکتریکی لحاظ نشده‌اند. خودروها فقط در مد کاری CS (سوخت فسیلی) کار می‌کنند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این سناریو هزینه کل کاهش قابل توجهی در حدود ۳۶٪ داشته است. این به‌علت قیمت پایین‌تر واحدهای تولید توان داخل VPP و همچنین نرخ پایین‌تر تولید گازهای گلخانه‌ای این واحدها می‌باشد. به خصوص این‌که برخی از واحدها از جمله واحدهای بادی و خورشیدی میزان تولید آلودگی ناچیزی دارند. همین موضوع سبب شده است که میزان تولید آلودگی CO_2 و NOx به‌ترتیب ۷۴٪ و ۹۶٪ کاهش یافته و به تبع آن هزینه کل نیز کم‌تر شود.



شکل ۳: ظرفیت تولید واحدها در سناریو دوم

ظرفیت تولید واحدهای مختلف در طول بازه مورد مطالعه در شکل ۳ آمده است. این سناریو اهمیت ساختار VPP در برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳- سناریو سوم

در این سناریو انرژی الکتریکی مورد نیاز مشترکین از شبکه برق اصلی تأمین شده و واحدهای تولیدی VPP لحاظ نشده است. در این سناریو خودروها هیبریدی در نظر گرفته شده‌اند یعنی در دو مد کاری الکتریکی و سوخت فسیلی با توجه به بهینه‌سازی هزینه کل عمل می‌کنند اما قابلیت V2G آن‌ها لحاظ نشده است. بدین معنا که خودروها نمی‌توانند توانی به شبکه تزریق کنند و تنها مصرف‌کننده توان می‌باشند.

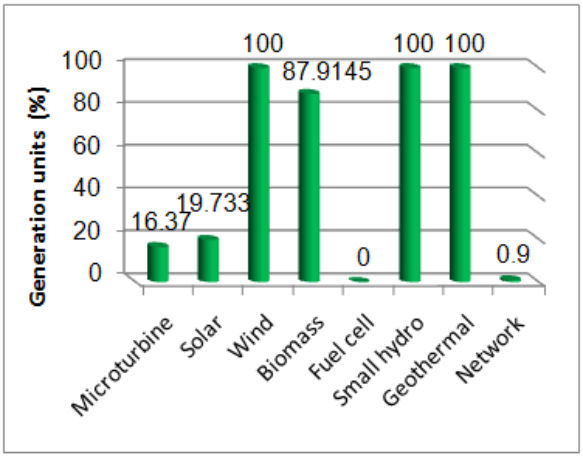
در این سناریو کاهش هزینه مربوط به کاهش مصرف سوخت در خودروها و نیز کاهش هزینه جریمه در اثر کاهش تولید CO2 توسط خودروها می‌باشد اگرچه مقداری هزینه بابت استهلاک باتری و افزایش تولید NOx اضافه شده ولی برآیند هزینه‌ها در کل کاهش یافته است. CO_2 تولیدشده در این سناریو ۱۰۱۵/۱۴۱ کیلوگرم کم‌تر از سناریو اول می‌باشد. این موضوع به سوخت مصرفی در خودروها برمی‌گردد جایگزین‌شدن انرژی الکتریکی با سوخت فسیلی در خودروها سبب کاهش میزان CO_2 شده است.

در ارتباط با گازهای NO_x، میزان آن در مقایسه با سناریو اول افزایش پیدا کرده است. این موضوع به نسبت تولید این گازها بین سوخت فسیلی و انرژی الکتریکی برمی‌گردد، جایی که در خودروها این میزان ۰/۰۷ گرم بر مایل بوده و در شبکه برق برابر با ۲/۲۶۷ گرم بر کیلووات ساعت بوده است. بنابراین جابجایی انرژی از سوخت فسیلی به انرژی الکتریکی سبب افزایش تولید برق خواهد شد که افزایش میزان تولید NOx را در پی خواهد داشت.

۳-۲-۴- سناریو چهارم

در این سناریو، واحدهای تولید انرژی داخل VPP در برنامه‌ریزی و تأمین بار نیز شرکت دارند و خودروهای الکتریکی هیبریدی نیز در محاسبات در نظر گرفته شده و تنها قابلیت شارژ دارند. در این سناریو نیز حضور خودروهای الکتریکی سبب مصرف بنزین کم‌تر شده همچنین کاهش آلایندگی کاهش در هزینه کل را به‌دنبال داشته است. نکته قابل توجه کاهش میزان آلودگی در مقایسه با سناریو دوم و به خصوص سناریوهای اول و سوم است. جایی که در این سناریو میزان NOx تولیدشده برابر با ۰/۶۳۳ کیلوگرم می‌باشد. دلیل این کاهش به واحدهای تولید توان خود VPP برمی‌گردد. جایی که واحدهایی نظیر خورشیدی، بادی و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر آلودگی بسیار کمی دارند.

ظرفیت تولید واحدهای مختلف در این سناریو در شکل ۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود واحدهای پیل سوختی به‌دلیل قیمت بالای برق تولیدی و همچنین آلودگی بالا در هیچ یک از ساعات مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. در مقابل واحدهای بادی، آبی و زمین‌گرمایی به‌دلیل قیمت کم‌تر و آلودگی ناچیز در تمامی ساعات شبانه‌روز با بیشینه توان در مدار قرار گرفته‌اند.



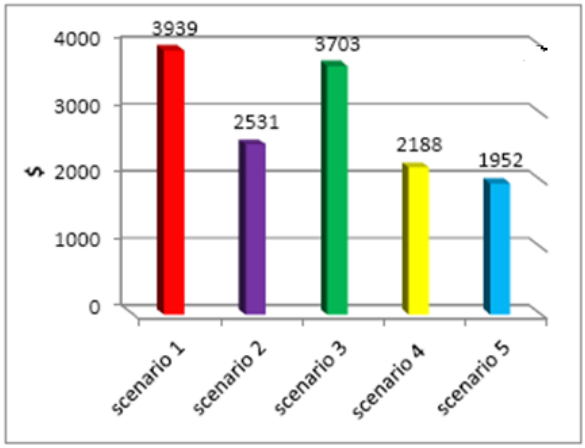
شکل ۴: ظرفیت تولید واحدها در سناریو چهارم

۳-۲-۵- سناریو پنجم

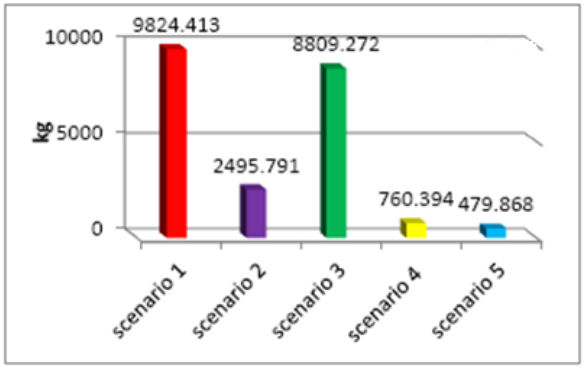
در این سناریو یک مدل کامل VPP با در نظر گرفتن خودروهای PHEV بررسی شده است و این خودروها قابلیت دشارژ شدن و تزریق توان به شبکه (V2G) را نیز دارا می‌باشند.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که قابلیت V2G خودروها تا چه اندازه می‌تواند در بهبود هزینه و آلودگی مؤثر باشد. همان‌طور که در جدول ۵ آورده شده است، هزینه کل تأمین انرژی در سناریو پنجم برابر با ۱۹۵۲ دلار است که ۲۳۶ دلار کمتر از سناریو چهارم (خودروها بدون قابلیت V2G) می‌باشد. میزان تولید CO_2 و NOx نیز به‌ترتیب ۲۸۰/۵ کیلوگرم و ۳۶۴ گرم کاهش پیدا کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این قابلیت نقش قابل توجهی در کاهش میزان آلودگی محیط زیست ایفا کرده است. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در این سناریو با سناریو اول (وضعیت فعلی شبکه) در شکل ۵ مشاهده می‌شود که هزینه کل به میزان ۱۹۸۷ دلار (حدود ۵۰٪) کاهش پیدا کرده است. این کاهش هزینه ناشی از دو عامل استفاده از واحدهای تجدیدپذیر ارزان‌قیمت و پرداخت هزینه جریمه کم‌تر بابت تولید گازهای گلخانه‌ای بوده است (شکل‌های۶ و ۷). در شکل ۸ ظرفیت مشارکت واحدها نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود قابلیت شارژ و دشارژ خودروها سبب شده است که با شارژ شدن خودروها در ساعات کم باری و دشارژ آن‌ها در ساعات پرباری، نیروگاه‌های گران‌قیمت کم‌تر وارد مدار شوند و هزینه کل در مجموع کاهش یابد. در جدول پ پیوست، میزان توان تولیدی واحدهای تولید انرژی پراکنده داخل VPP و همچنین توان دریافتی از شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز آورده شده است.



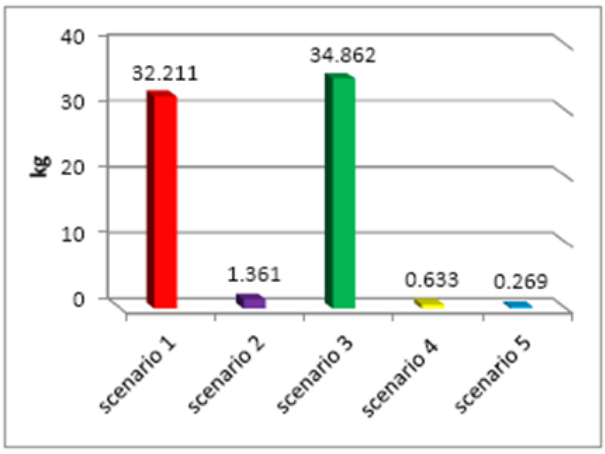
شکل ۵: هزینه سناریو پنجم در مقایسه با سناریوهای دیگر



شکل ۶: آلودگی CO_2 سناریو پنجم در مقایسه با سناریوهای دیگر

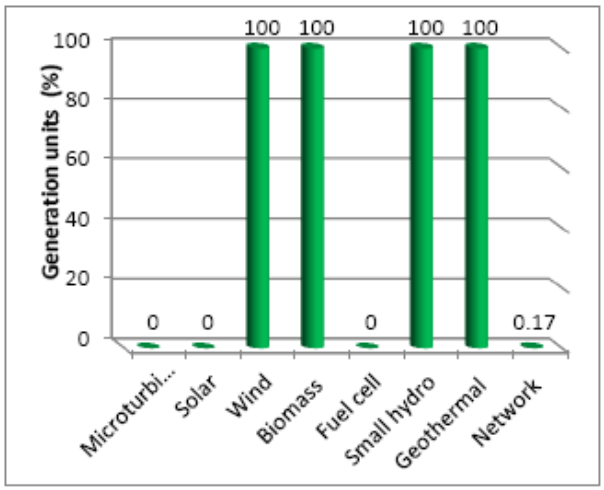
در سناریو پنجم، واحدهای ۱ تا ۹ در هیچ ساعتی از شبانه‌روز وارد مدار نشده‌اند. این واحدها از نوع میکروتوربین و خورشیدی هستند که قیمت خرید برق از آن‌ها بسیار گران است. علاوه بر این، میکروتوربین میزان آلودگی بالایی دارد. همچنین واحدهای سلول‌های سوختی نیز در هیچ ساعت از شبانه‌روز وارد مدار نشده‌اند و همواره خاموش بوده‌اند.

دلیل این امر نیز قیمت انرژی بالا و آلودگی زیاد این نوع واحدها هستند. در مقابل واحدهای بادی، زمین‌گرمایی، آبی و بیوماس در تمامی ساعت‌ها در مدار بوده و با بیشینه توان ممکن انرژی الکتریکی تولید می‌کنند. در این سناریو تنها در ساعت ۲۲ توان از شبکه گرفته شده است. دلیل این‌که اوج بار در ساعت ۲۱ بوده ولی در ساعت ۲۲ توان از شبکه دریافت شده این است که در ساعت ۲۱ بیشتر خودروها دشارژ شده تا پیک شبکه را کاهش دهند. این دشارژ سبب شده است که توان زیادی برای دشارژ شدن در ساعت ۲۲ نداشته باشند. همین امر سبب شده است که توان تولیدی در ساعت ۲۲ کاهش یابد و VPP مجبور به جذب توان از شبکه شود. شکل ۹ میزان توان دریافت شده توسط خودروها در ساعات مختلف شبانه‌روز نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیش‌ترین شارژ خودروها در ساعات اولیه روز اتفاق افتاده است. بیش‌ترین شارژ خودروها در ساعت ۳ بامداد (در این ساعت کم‌ترین بار خانگی مصرف می‌شود) بوده است که در کل به میزان ۲۶۱ کیلووات شارژ رخ داده است. در صورتی که مقدار کل توان شارژ شده توسط خودروها، توان دشارژ شده توسط خودروها و بار مصرفی VPP را در هر ساعت در نظر بگیریم و بار خالص را حساب کنیم، مشاهده می‌شود که مقدار بار خالص در تمام ساعت یکسان و برابر با ۶۴۹/۰۵ کیلووات است. این مسطح شدن بار برای این موضوع می‌باشد تا از روشن/خاموش شدن واحدها که هزینه زیادی را به دنبال دارد جلوگیری شود. در حقیقت الگوریتم در این سناریو شارژ و دشارژ خودروها را به‌نحوی انجام داده است که بار خالص شبکه صاف شود تا هزینه کل کاهش پیدا کند. نکته قابل توجه این است که تنها در ساعت ۲۲ بار خالص ۲۷/۲۲ کیلووات بیش‌تر از سایر ساعات بارها می‌باشد که دقیقاً برابر با توانی است که از شبکه برق اصلی دریافت کرده است.

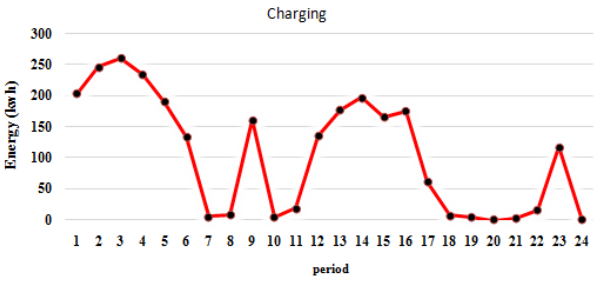


شکل ۷: آلودگی NOx سناریو پنجم در مقایسه با سناریوهای دیگر

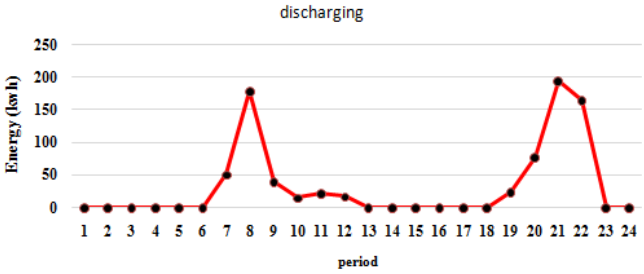
در شکل ۱۰، میزان انرژی تحویل‌داده‌شده توسط خودروها به شبکه آورده شده است (میزان توان دشارژ شده خودروها در هر ساعت از شبانه‌روز)، نمودار مورد نظر نشان می‌دهد که خودروها تنها در ساعت ۷ تا ۱۲ و ۱۹ تا ۲۲ دشارژ می‌شوند. بار مصرفی VPP در این ساعات زیاد بوده است بنابراین خودروها دشارژ شده‌اند تا بار شبکه کاهش یابد. همچنین در برخی از ساعات این بازه‌ها، مقدار مسافت طی شده توسط خودروها زیاد بوده است. از این رو خودرو برای تأمین بخشی از انرژی مورد نیاز خود برای حرکت، مجبور بوده است که از انرژی ذخیره‌شده در باتری خود استفاده نماید. به‌عنوان مثال در ساعت ۸ صبح، هم بار شبکه زیاد بوده و هم مسافت طی شده توسط خودروها (۵۷۷ مایل) بیشینه بوده است. از این رو در این ساعت بیشینه دشارژ خودروها در پیک اول (۱۷۸ کیلووات ساعت) نیز اتفاق افتاده است. همچنین در ساعت ۲۱ که پیک بار بوده بیشینه دشارژ خودروها (۱۹۴ کیلووات ساعت) رخ داده است. مقایسه مسافت‌های طی شده توسط خودروها در مد الکتریکی و سوخت فسیلی نشان می‌دهد که بیش‌تر مسافت طی شده در مد کاری الکتریکی بوده است. در این سناریو مسافت طی شده در مد کاری الکتریکی و سوختی به‌ترتیب برابر با ۴۹۹۶ و ۱۳۳۱ مایل بوده است که نشان از ۳/۷۵ برابری مد کاری الکتریکی نسبت به مد کاری سوختی می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه‌شده تا بدین جا می‌توان گفت که تشکیل VPP سبب کاهش قابل توجه گازهای گلخانه‌ای و هزینه تمام‌شده جهت تأمین توان مصرف‌کننده‌ها می‌شود. حضور خودروهای الکتریکی با قابلیت دشارژ توان (V2G) این کاهش هزینه و آلودگی را بهبود می‌بخشد.



شکل ۸: ظرفیت تولید واحدها در سناریو پنجم



شکل ۹: نمودار شارژ خودروها در سناریو پنجم



شکل ۱۰: نمودار دشارژ خودروها در سناریو پنجم

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی به‌منظور کمینه کردن هزینه کل یک نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن PHEVها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- هزینه تأمین برق، سوخت خودروها و جریمه تولید آلاینده‌ها برای مجموعه‌ای از مشترکین که به‌عنوان یک نیروگاه مجازی در این مقاله در نظر گرفته شده‌اند، در حالت عادی که انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از شبکه اصلی تأمین می‌کنند مقدار زیادی است.
- تشکیل VPP و تأمین برق مورد نیاز مشترکین از واحدهای تولید پراکنده مربوط به VPP سبب شده که هزینه کل به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. در این حالت میزان تولید CO_2 و NOx به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. بنابراین تشکیل VPP و استفاده از واحدهای تولید پراکنده سبب کاهش هزینه و آلاینده‌های محیط زیست خواهد شد.
- استفاده از خودروهای هیبریدی در سیستم قدرت بدون ساختار VPP باعث کاهش هزینه کل و آلایندگی CO_2 می‌شود. هر چند به‌دلیل استفاده این خودروها از برق، افزایش تولید انرژی الکتریکی توسط شبکه اصلی - که آلایندگی بالایی دارد- را به‌دنبال خواهد داشت که این امر موجب افزایش در تولید آلایندگی NOx می‌شود.
- استفاده از منابع پراکنده و تجدیدپذیر انرژی در حضور خودروهای PHEV با فناوری V2G در سیستم قدرت با مدیریت VPP باعث کاهش چشم‌گیر هزینه و انتشار آلایندگی گازهای گلخانه‌ای (CO_2 و NOx) خواهد شد.
- مشارکت PHEVها در تأمین توان به‌دلیل شارژ در ساعات کم باری و دشارژ (تزریق توان به سیستم) در ساعات پیک بار سبب خواهد شد که اولاً پیک بار در ساعات اوج بار کاهش یابد و لازم نباشد که واحدهای گران‌قیمت وارد مدار شوند، ثانیاً پروفیل بار شبکه مسطح شود تا هزینه روشن/خاموش شدن کم‌تری جهت حفظ تعادل توان پرداخت شود.

مراجع

[1] O. K. Arslan and O. E. Karasan, "Cost and emission impacts of virtual power plant formation in plug-in hybrid electric vehicle penetrated networks," *Energy*, vol. 60, no. 1, pp. 116-124, 2013.

[2] A. Y. Saber and G. K. Venayagamoorthy, "Efficient utilization of renewable energy sources by gridable vehicles in cyber-physical energy systems," *IEEE Systems Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 285-294, 2010.

[۳] نرگس پرهیزی، موسی مرزبند، سیدمازیار میرحسینی مقدم، بهنام محمدی ایواتلو و فاطمه آذری‌نژادیان، «پیاده‌سازی عملی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه متصل به شبکه سراسری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۲۵-۴۰، ۱۳۹۵.

[۴] عباس محمدویسی و علیرضا حاتمی، «ارائه چارچوبی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند: برنامه‌ریزی بهینه تجهیزات خانگی و برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۱، صفحه ۵۳-۶۶، ۱۳۹۴.

[5] M. Panto, "Stochastic optimal charging of electric-drive vehicles with renewable energy," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6567-6576, 2011.

[6] C. Fernandes, P. Frías and J. M. Latorre, "Impact of vehicle-to-grid on power system operation costs: the spanish case study," *Appl. Energy*, vol. 96, no. 1, pp. 194-202, 2012.

[7] A. Y. Saber and G. K. Venayagamoorthy, "Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with renewables and plug-in vehicles," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 103-109, 2012.

[8] T. K. Kristoffersen, K. Capion and P. Meibom, "Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 5, pp. 1940-1948, 2011.

[9] Q. Zhang, B. C. Mclellan, T. Tezuka and K. N. Ishihara, "A methodology for economic and environmental analysis of electric vehicles with different operational conditions," *Energy*, vol. 61, no. 1, pp. 118-127, 2013.

[10] M. A. Kromer, A. Bandivadekar and C. Evans, "Long-term greenhouse gas emission and petroleum reduction goals: evolutionary pathways for the light-duty vehicle sector," *Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 387-97, 2010.

[11] H. Hao, H. Wang and M. Ouyang, "Fuel conservation and GHG (greenhouse gas) emissions mitigation scenarios for chinas passenger vehicle fleet," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6520-6528, 2011.

[12] R. Sioshansi and P. Denholm, "The value of plug-in hybrid electric vehicles as grid resources," *Energy*, vol. 31, no. 3, pp. 1-24, 2010.

[13] R. Sioshansi, "Modeling the impacts of electricity tariffs on plug-in hybrid electric vehicle charging, costs, and emissions," *Operation Research Forum*, vol. 43, no. 4, pp. 1199-1204, 2012.

[14] C. Chen and S. Duan, "Optimal integration of plug-in hybrid electric vehicles in microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1917-1926, 2014.

[15] *National Household Travel Survey*, U.S. Department of Transportation, 2011.

پیوست

جدول (پ): میزان توان تولیدی واحدهای مختلف VPP و توان دریافتی از شبکه در سناریو پنجم (kW) طی ۲۴ ساعت

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
u10	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u11	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u12	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u13	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u14	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u15	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u16	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u17	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u18	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u19	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u20	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u21	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u22	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u26	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u27	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u28	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u29	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u30	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u31	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u32	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u33	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u34	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u35	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
u10	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u11	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u12	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u13	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u14	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u15	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u16	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u17	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
u18	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u19	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u20	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u21	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u22	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
u26	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u27	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u28	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u29	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u30	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u31	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u32	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u33	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u34	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
u35	---	---	---	---	---	---	---	---	---	۲۷/۲۲	---	---

زیرنویس‌ها

[1] Plug-in Hybrid Electric Vehicles
[2] Distributed Energy Resources
[3] Virtual Power Plant
[4] Electricity Reliability Council of Texas
[5] Mixed Integer Linear Program
[6] Energy Provider
[7] Time Elastic
[8] Time Inelastic
[9] Charge-Depleting
[10] Charge-Sustaining