

## Bi-Level Energy Management Optimization in Multi-Area Smart Grids

Mohammad Ali Hormozi, *Ph.D. Student*, Bahman Bahmani Firouzi, *Assistant Professor*, Taher Niknam, *Professor*

Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

mohammadalihormozi56@gmail.com

bahman\_bah@miau.ac.ir

niknam@sutech.ac.ir

### Abstract:

Optimal energy management in multi area smart grids will increase social welfare, reduce economic costs and environmental pollution. Power management solutions for smart grids include issues such as economical distribution of load, suitable load management, optimized charging and discharging of energy storages, and the availability of renewable resources considering limitation of power exchange in different area, all of which are issues in an intelligent grid, that in this paper has been considered. This paper presents a bi-level mixed integer quadratic programming (MIQP) model for energy management in multi-area smart grids with the aim of reducing economic costs and environmental pollution and increasing social welfare by considering energy storage systems, load management and Renewable resources are presented. In this paper presents a bi-level approach that the upper level is formulated to minimization economic cost and pollution of resource and lower level is presented to maximization social welfare in the form of Karush–Kuhn–Tucker (KKT) conditions. The simulation is implemented in MATLAB with Gurobi solver that the results show that the proposed bi-level model is also an efficient way to optimize energy in multi-area smart grids compared to Pareto front and Weight methods.

**Keywords:** Smart grids, demand side management (DSM), energy management, bi-level optimization

**Received:** 4 January 2020

**Revised:** 11 April 2020

**Accepted:** 20 May 2020

**Corresponding Author:** Dr. Bahman Bahmani Firouzi

**Citation:** M.A. Hormozi, B. Bahmani-Firouzi, T. Niknam, "Bi-level energy management optimization in multi-area smart grids", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 42, pp. 29-40, Summer 2020 (in Persian).

## بهینه‌سازی دو سطحی مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای

محمدعلی هرمزی، دانشجوی دکتری، بهمن بهمنی فیروزی، استادیار، طاهر نیکنام، استاد

گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

mohammadalihormozi56@gmail.com

bahman\_bah@miau.ac.ir

niknam@sutech.ac.ir

**چکیده:** مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای سبب افزایش رفاه اجتماعی، کاهش هزینه‌های اقتصادی و آلاینده‌های زیست محیطی خواهد شد. از راه کارهای مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای می‌توان به مسائلی مانند توزیع اقتصادی بار و حرارت، مدیریت بارهای تغییرپذیر، شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌سازهای انرژی و وجود منابع تجدیدپذیر با حفظ محدودیت‌های تبادل توان الکتریکی بین نواحی اشاره نمود، که همگی از مسائل مهم در این زمینه به شمار می‌آیند. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی درجه دوم آمیخته با عدد صحیح به منظور مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای با هدف کاهش هزینه‌های اقتصادی و زیست محیطی و افزایش رفاه اجتماعی نیز با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، مدیریت سمت بار و منابع تجدیدپذیر ارائه شده است. در این مقاله یک رویکرد دوسطحی به-منظور حل مدل پیشنهادی ارائه شده که سطح بالایی به منظور کمینه‌سازی هزینه اقتصادی و آلاینده‌گی و سطح پایینی به-منظور بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی و به صورت شرایط خطی KKT فرموله شده است. شبیه‌سازی در محیط متلب و حل‌کننده Gurobi اجرا شده است که نتایج نشان می‌دهد مدل دو سطحی ارائه شده رویکردی کارآمد در بهینه‌سازی انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای نسبت به دیگر رویکردهایی مانند روش ضریب وزنی و یا روش بهینگی پارتو دارد.

**کلمات کلیدی:** شبکه‌های هوشمند، مدیریت سمت تقاضا، مدیریت انرژی، بهینه‌سازی دو سطحی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۲/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر بهمن بهمنی فیروزی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: مرودشت - دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت - گروه مهندسی برق

## ۱- مقدمه

با توسعه شبکه‌های هوشمند و نفوذ بالای منابع انرژی پراکنده به همراه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و نیز برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، نیاز به یک رویکرد موثر به منظور بهینه‌سازی مطلوب شبکه‌ها هوشمند است، از جهتی دیگر با توسعه و ارتقا نرم-افزارهای حل مسائل ریاضی همانند CPLEX، Gurobi و Mosek رسیدن به جواب‌های بهینه نیز تضمین شده است، در نتیجه یکی از چالش‌های اصلی محققان در زمینه مدیریت انرژی شبکه‌های هوشمند ارائه یک مدل بهینه‌سازی ریاضی کارآمد و مطلوب است. در مطالعات انجام شده اخیر که در زمینه مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند صورت گرفته است، نشان داده شده که رویکرد مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای با رعایت قیود تبادل توان بین نواحی می‌تواند اهداف مورد انتظار را بیش از مدیریت انرژی تک ناحیه‌ای تحقق بخشد، از مزایای اصلی مدیریت انرژی می‌توان به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه و افزایش رفاه اجتماعی نیز اشاره نمود. مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت انرژی از طیف بسیار گسترده‌ای برخوردار است که هر کدام از محققان اهداف، مدل و روش‌های مختلفی را برای حل مسئله مدیریت انرژی ارائه نموده‌اند.

در مقاله [۱] نویسندگان مدل غیرخطی مسئله مدیریت انرژی را به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌های زیست محیطی منابع در شبکه‌های هوشمند با استفاده از الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱</sup> (PSO) ارائه نمودند. در مرجع [۲] نویسندگان مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای را با هدف کاهش هزینه سوخت و آلودگی توسط الگوریتم تکاملی تصادفی<sup>۲</sup> پیشنهاد کردند. در مرجع [۳] یک مدل خطی به منظور کاهش قیمت حاشیه‌ای شین‌ها<sup>۳</sup> (LMP) و کاهش هزینه منابع با استفاده از روش تجزیه برای مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای پیشنهاد کردند. مرجع [۴] یک روش متمرکز اکتشافی را برای مدیریت انرژی با هدف کاهش هزینه سوخت و آلودگی با در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا پیشنهاد نمودند. نویسندگان در مرجع [۵] مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای را با یک الگوریتم تکاملی به منظور کاهش هزینه سوخت، بهره‌برداری و هزینه بی‌باری منابع ارائه نمودند. در مرجع [۶] نویسندگان الگوریتم PSO را برای حل مدل غیرخطی مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای با هدف کاهش هزینه سوخت و آلاینده‌های زیست محیطی پیشنهاد نمودند. در مرجع [۷] نویسندگان الگوریتم تکامل تقاضای<sup>۴</sup> (DE) را برای حل مسئله مدیریت انرژی ارائه نموده‌اند. در مرجع [۸] مدل غیرخطی شرایط بهینگی<sup>۵</sup> (KKT) به همراه الگوریتم تکاملی به منظور کاهش هزینه منابع در مسئله مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای ارائه شده است. در مرجع [۹] بهره‌برداری بهینه از چندین واحد تجدیدپذیر و واحد فسیلی<sup>۶</sup> (CHP) شامل دو توربین بادی، دو واحد فتوولتائیک، دو واحد سلول سوختی و یک واحد میکروتوربینی در یک ریزشبکه کوچک به همراه مدیریت سمت تقاضا ارائه شده است. پخش بار بهینه به کمک الگوریتم تکاملی تصادفی به منظور کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری در نظر گرفته شده است، همچنین عدم قطعیت برای واحدهای تجدیدپذیر و بار در نظر گرفته شده است. در مقاله [۱۰] مدیریت انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید در یک بازه ۲۴ ساعته به منظور کاهش هزینه سوخت و بار توسط الگوریتم تکاملی بازار بورس ارائه شده است. در مرجع [۱۱] پخش بار اقتصادی به منظور کمینه‌سازی یک تابع دو هدفه شامل هزینه سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط الگوریتم تکامل تقاضای ارائه شده است، مدل‌سازی به صورت استاتیکی و برای یک ساعت انجام شده است. در مقاله [۱۲] مدل‌سازی مسئله مدیریت بهینه انرژی را با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری واحدها با در نظر گرفتن توان شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی کوچک و با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ تقاضا ارائه داده‌اند. در مرجع [۱۳] یک مدل دو سطحی برای زمان‌بندی بهینه منابع انرژی برای روز پیشرو را در شبکه‌های هوشمند با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری با در نظر گرفتن تقاضای بار از اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه<sup>۷</sup> (V2G) با منابع تولید پراکنده ارائه کردند. در مرجع [۱۴] یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی به روش حل تجزیه بندرز به منظور کمینه‌کردن هزینه کل بهره‌برداری در سیستم‌های توزیع مقیاس بزرگ چند ناحیه-ای با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۵] حل مسئله مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای را با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی بر اساس تکامل تقاضای و روش تجزیه ارائه نموده‌اند. در مرجع [۱۶] مسئله مدیریت انرژی را با هدف کاهش هزینه با در نظر گرفتن قید رزرو منابع با دو سناریو حل مسئله دینامیکی و استاتیکی با استفاده از روش

تجزیه لاگرانژ پیشنهاد کردند. در مرجع [۱۷] یک الگوریتم تکاملی جدید را برای حل مسئله مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای با هدف کاهش یک تابع دو هدفه ارائه شده است.

با مطالعه و بررسی مراجع متفاوت، الگوریتم‌های تکاملی به‌منظور حل مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای بیشتر مورد توجه نویسندگان قرار گرفته بود، که این الگوریتم‌ها به دلیل ماهیت تصادفی که دارند نمی‌توانند جواب‌های بهینه سراسری را تضمین نمایند که از نواقص مهم در این زمینه می‌توان اشاره نمود، از طرفی دیگر در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا در مسائل مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای مورد توجه کمتری قرار گرفته است. یکی دیگر از نواقص مراجع در حل مسائل چند-هدفه در نظر گرفتن روش‌های ضریب وزنی و یا بهینگی پارتو است، که عملکردی غیر مطلوب با صرف مدت زمانی طولانی را به دنبال دارد. در این مقاله نویسندگان تلاش نموده‌اند تا با در نظر گرفتن چالش‌ها و نواقص مطالعات پیشین یک مدل کامل را ارائه نمایند. در این مقاله مسئله مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی مرتبه دوم آمیخته با عدد صحیح که می‌تواند تضمین نتایج بهینه سراسری باشند را تضمین نماید، که حل مدل پیشنهادی توسط برنامه‌متلب و حل‌کننده Gurobi انجام شده است. همچنین سعی شده تا یک مدل کامل از شبکه‌های هوشمند شامل در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا و ذخیره‌سازهای انرژی در نظر گرفته شود. روش حل پیشنهاد شده برای حل مسئله چند هدفه پیشنهادی یک روش دوسطحی با در نظر گرفتن مدل خطی شرایط KKT است، که نتایج نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی نسبت به روش ضریب وزنی و بهینگی پارتو است.

نوآوری اصلی این مقاله را می‌توان در موارد زیر دانست: (۱) ارائه یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی بر اساس برنامه‌ریزی درجه دوم آمیخته با عدد صحیح با استفاده از مدل خطی شرایط KKT در مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای، (۲) در نظر گرفتن کمینه‌سازی هزینه‌های منابع و آلاینده‌گی و همچنین بهینه‌سازی رفاه اجتماعی در فرمولاسیون مسئله، (۳) مدل‌سازی دینامیکی مسئله به صورت ۲۴ ساعته برای روز پیشرو، و (۴) در نظر گرفتن مسئله مدیریت سمت تقاضا، منابع تجدیدپذیر و همچنین شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در شبکه هوشمند چند ناحیه‌ای. دیگر بخش‌های مقاله به این شرح است: در بخش دوم مدل‌سازی و روابط ریاضی مطرح می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها در بخش سوم و نتیجه‌گیری در بخش آخر ارائه می‌شود.

## ۲- مدل‌سازی پیشنهادی

در این مقاله بهینه‌سازی انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای به‌صورت یک مدل بهینه‌سازی باینری درجه دوم دو سطحی نیز پیشنهاد شده است. در ابتدا مدل پیشنهادی مربوط به مسئله ارائه می‌شود و سپس رویکرد دو سطحی پیشنهادی ارائه خواهد شد.

در این مقاله، همانطور که ذکر گردید، هدف کاهش هزینه‌های اقتصادی و آلاینده‌گی و افزایش رفاه اجتماعی است، به همین جهت مسئله کمینه‌سازی هزینه و آلاینده‌گی منابع به‌صورت مسئله سطح بالایی و بهینه‌سازی رفاه اجتماعی نیز به‌صورت مسئله سطح پایینی فرمول‌بندی شده است. مدل مدیریت انرژی پیشنهادی در یک شبکه هوشمند به‌منظور کمینه‌سازی هزینه و آلاینده‌گی منابع به‌صورت معادلات (۱) الی (۱۵) ارائه شده است، که به صورت مسئله سطح بالایی تعریف شده است.

minimize:

$$\sum_{i \in n, t \in T} [a_i \Delta_{i,t} + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 + \Delta_{i,t} C_i^{up} + \nabla_{i,t} C_i^{dw}] + \sum_{i \in n, t \in T} [\alpha_i \Delta_{i,t} + \beta_i P_{i,t} + \delta_i P_{i,t}^2] \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_i^{\min} \Delta_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \Delta_{i,t} \quad \forall i \in N, t \in T \quad (2)$$

$$\Pi_{i,t+1} = \Pi_{i,t} + \eta_i \Omega_{i,t}^c - \Omega_{i,t}^d / \eta_i \quad \forall i \in n, t \in T \quad (3)$$

$$\Omega_{i,t}^{c,\min} z_{i,t} \leq \Omega_{i,t}^c \leq \Omega_{i,t}^{c,\max} z_{i,t} \quad \forall i \in n, t \in T \quad (4)$$

$$\Omega_{i,t}^{d,\min} (1 - z_{i,t}) \leq \Omega_{i,t}^d \leq \Omega_{i,t}^{d,\max} (1 - z_{i,t}) \quad \forall i \in n, t \in T \quad (5)$$

$$0 \leq \Pi_{i,t} \leq \Pi_i^{\max} \quad \forall i \in n, t \in T \quad (6)$$

$$-r_i^{dw} \leq P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq r_i^{up} \quad \forall i \in n, t \in T \quad (7)$$

$$\Delta_{i,t} + \nabla_{i,t} = 1 \quad \forall i \in n, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} z_{i,t} \leq \phi_i \quad \forall i \in n \quad (9)$$

$$\lambda_t = \partial D_t \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$D_t - \lambda_t \leq D_t \leq D_t + \lambda_t \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{t \in T} D_t = \sum_{t \in T} D_t^{DSM} \quad (12)$$

$$\sum_{i \in n} P_{i,t} + g_{i,t}^{PV} + \Omega_{i,t}^d = (1 + 0.05) D_t^{DSM} + \Omega_{i,t}^c + \Psi_t \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\Omega_{i,t}^c \leq g_{i,t}^{PV} \quad \forall i \in n, t \in T \quad (14)$$

$$T_{\min}^{i,j} \leq T_t^{i,j} \leq T_{\max}^{i,j} \quad \forall t \in T, i, j \in K \quad (15)$$

رابطه (۱) نشان‌دهنده تابع هدف مسئله سطح بالا است و نشان‌دهنده کاهش هزینه مربوط به واحدهای موجود در شبکه هوشمند به همراه کاهش هزینه‌های آلاینده زیست محیطی است، که هزینه بهره‌برداری، سوخت و بی‌باری به همراه هزینه راه-اندازی و خاموش‌سازی واحد به صورت گروه اول و هزینه انتشار آلودگی گاز NOx منابع نیز در گروه دوم مدل‌سازی شده است. محدودیت تولید توان واحد نام در ساعت نام به صورت رابطه (۲) فرمول‌بندی شده است، محدودیت مربوط به وضعیت شارژ و دشارژ منابع ذخیره‌ساز انرژی در رابطه (۳) نشان داده شده است. قیود (۴) و (۵) به ترتیب نشان‌دهنده مقدار مجاز شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز نام در ساعت نام نیز می‌باشد. رابطه (۶) نشان‌دهنده محدودیت مربوط به رعایت ظرفیت انرژی ذخیره‌ساز نام در ساعت نام است. رابطه (۷) نیز نشان‌دهنده شیب مجاز تغییرات توان منبع نام در ساعت نام است. رابطه (۸) نشان‌دهنده قید مربوط به وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد نام در زمان نام است. رابطه (۹) نیز برابر تعداد دفعات شارژ شدن مجاز ذخیره‌ساز نام است. رابطه (۱۰) میزان بارهای انعطاف‌پذیر را در ساعت نام نشان می‌دهد. رابطه (۱۱) نشان‌دهنده میزان مجاز تغییرات بار شبکه در ساعت نام است. رابطه (۱۲) تضمین می‌کند که مجموع بارهای جدید به‌دست آمده از برنامه مدیریت سمت تقاضا برابر مجموع بارهای اولیه باشد. رابطه (۱۳) نیز قید برقراری تعادل توان را در شبکه تضمین می‌کند، که می‌بایست توان تولیدی منابع و توان دشارژ منابع ذخیره‌ساز برابر با بار شبکه به همراه تلفات، توان شارژ خودروهای برقی و توان شارژ ذخیره‌سازها باشد. در این مقاله شارژ ذخیره‌ساز با منابع<sup>۸</sup> (PV) در نظر گرفته شده است، لذا قید (۱۴) تضمین می‌کند که شارژ ذخیره‌ساز نام در ساعت نام تنها با واحد فتوولتائیک نام صورت بگیرد. طبق شکل (۱) رابطه (۱۵) تضمین می‌کند تبادل توان بین شبکه‌های هوشمند بین محدوده توان قابل انتقال در نظر گرفته شده باشد. دومین هدف در نظر گرفته شده، بهینه‌سازی رفاه اجتماعی است، که به صورت روابط (۱۶) الی (۲۲) نیز به صورت مسئله سطح پایینی نیز ارائه شده است:

maximize:

$$\sum_{t \in T} [ \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \pi_{t,j,k}^D q_{t,j,k}^{bid} + \sum_{d \in D} \sum_{r \in R} \pi_{t,d,r}^{DSM} q_{t,d,r}^{bid^{DSM}} - \sum_{i \in I} \sum_{b \in B} \pi_{t,i,b}^G q_{t,i,b}^{offer} ] \quad (16)$$

$$q_{t,j,k}^{bid} \leq purchase_{t,j,k}; \forall t \in T, j \in J, k \in K \quad (17)$$

$$q_{t,i,b}^{offer} \leq sale_{t,i,b}; \forall t \in T, i \in I, b \in B \quad (18)$$

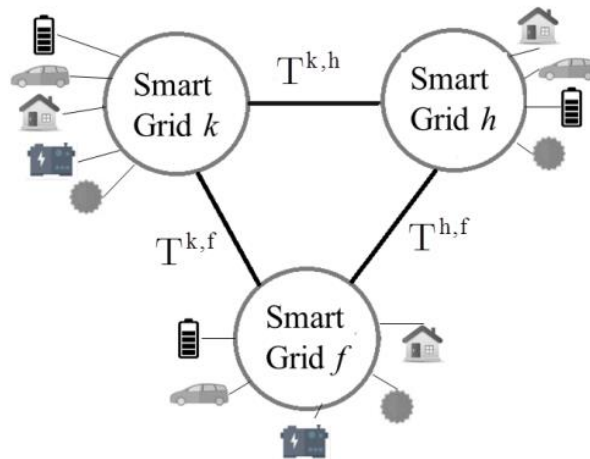
$$q_{t,d,r}^{bid^{DSM}} \leq purchase_{t,d,r}^{DSM}; \forall t \in T, d \in D, r \in R \quad (19)$$

$$\sum_{t \in T} q_{t,d,r}^{bid^{DSM}} \leq purchase_{d,r}^{DSM^T}; \forall d \in D, r \in R \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (q_{t,j,k}^{bid}) + \sum_{d \in D} \sum_{r \in R} (q_{t,d,r}^{bid^{DSM}}) = \sum_{i \in I} \sum_{b \in B} (q_{t,i,b}^{offer}) \quad \forall t \in T; \quad (21)$$

$$q_{t,j,k}^{bid}, q_{t,i,b}^{offer}, q_{t,d,r}^{bid^{DSM}} \geq 0; \forall t \in T \quad (22)$$

رابطه (۱۶) نشان‌دهنده افزایش رفاه اجتماعی با در نظر گرفته پیشنهاد تقاضا برای روز پیشرو یا ۲۴ ساعت است، رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب نشان‌دهنده بیشترین حد قابل قبول عرضه و پیشنهاد است. رابطه (۱۹) نشان‌دهنده بار انعطاف‌پذیر قابل قبول در برنامه مدیریت سمت تقاضا<sup>۹</sup> (DSM) است.



شکل (۱): یک نمونه شبکه هوشمند چند ناحیه‌ای  
Figure 1. Multi-area smart grid

رابطه (۲۰) محدودیت کل عرضه قابل قبول در برنامه مدیریت سمت تقاضا در دوره زمانی پیشرو را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱) قید برابری شامل عرضه قابل قبول در برنامه مدیریت سمت تقاضا شامل هزینه سیستم با بار انعطاف‌پذیر است. رابطه (۲۲) نیز مثبت بودن متغیرها را تضمین می‌کند. حال با معرفی مسئله سطح بالایی روابط (۱) الی (۱۵) و سطح پایینی روابط (۱۶) الی (۲۲) می‌توان روش حل مسئله را شرح نمود. بدین منظور ابتدا باید مدل مسئله پایین (۱۶) الی (۲۲) را به صورت یک مسئله KKT برگرداند که در بخش بعد شرح داده شده است.

## ۲-۱- شرایط بهینگی KKT

همانطور که بیان گردید، در این مقاله مدل بهینه‌سازی دو سطحی برای حل مدیریت انرژی چند هدفه در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای پیشنهاد شده است. به منظور حل مسئله بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهادی، مسئله سطح پایین که مدل بیشینه‌سازی است را به مسئله KKT تبدیل می‌نماییم و سپس آن را به قیود مسئله بالایی اضافه می‌کنیم. به صورت روابط (۲۴) الی (۳۰) مسئله سطح پایین را به صورت شرایط بهینگی KKT مدل‌سازی می‌کنیم.

فرض کنید که رابطه (۲۳) یک فرم استاندارد مسئله بیشینه‌سازی تابع هدف  $f(x)$  با شروط برابری  $h_j(x)$  و نابرابری  $g_i(x)$  است، که طبق روابط (۲۴) الی (۳۰) به صورت تابع لاگرانژین و شرایط خطی KKT می‌توان مدل برگردانده شود [۱۸، ۱۹].

$$\text{maximize } f(x)$$

$$\text{s.t } g_i(x) \leq 0 \quad (\mu_i) \quad \forall i \in I \quad (23)$$

$$h_j(x) = 0 \quad (\lambda_j) \quad \forall j \in J$$

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) - \sum_{j=1}^k \lambda_j (h_j(x)) - \sum_{i=1}^m \mu_i (g_i(x)) \quad (24)$$

$$\nabla f(x) - \sum_{j=1}^k \lambda_j \nabla h_j(x) - \sum_{i=1}^m \mu_i \nabla g_i(x) = 0 \quad (25)$$

$$h_j(x) = 0 \quad (26)$$

$$g_i(x) \geq 0 \quad (27)$$

$$\mu_i(x) \geq 0 \quad (28)$$

$$\mu_i \leq m(1 - \partial_i) \quad \forall \partial_i \in \{0, 1\}, m = \text{large number} \quad (29)$$

$$g_i \leq m\partial_i \quad \forall \partial_i \in \{0, 1\}, m = \text{large number} \quad (30)$$

رابطه (۲۴) تابع لاگرانژین مسئله بهینه‌سازی که در این مسئله قرار است بیشینه شود، لذا ضرایب لاگرانژ به صورت منفی در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۲۵) نشان‌دهنده مشتق تابع لاگرانژین نسبت به متغیرهای مسئله است. رابطه (۲۶) برابر قید برابری

مسئله و باید برابر صفر در نظر گرفته شود، رابطه (۲۷) برابر قید نابرابر مسئله و باید بزرگتر از صفر باشد، رابطه (۲۸) برابر ضریب لاگرانژ نابرابری است که در این مسئله به صورت بزرگتر از صفر در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۲۹) و (۳۰) به ترتیب مدل خطی قید کمکی مکمل<sup>۱۰</sup> است، در این رابطه ( $\theta$ ) نشان‌دهنده متغیر باینری و ( $m$ ) نشان‌دهنده یک عدد بزرگ مثبت است. با تغییر مسئله پایین به صورت مدل KKT می‌توان مدل دو سطحی ارائه شده را حل نمود، که در بخش بعد ارائه شده است.

## ۲-۲- روش حل مسئله

همانطور که ارائه شد با استفاده از روابط (۲۴) الی (۳۰) می‌توان مسئله پایینی را به یک مدل بهینه‌سازی با شرایط KKT و تابع لاگرانژ تبدیل نمود. توجه شود که قید کمکی مکمل نیز به صورت روابط (۲۹) و (۳۰) مدل شده است، تا مدل KKT نیز به یک مدل خطی - باینری تبدیل شود.

minimize: (1)

s.t. (2) - (15)

(24) - (30)

(۳۱)

بدین ترتیب مدل مسئله بهینه‌سازی به صورت یک مدل تک سطحی با شرایط بهینگی KKT نیز طبق مسئله اصلی (۳۱) تبدیل می‌شود، که رابطه (۱) الی (۱۵) نشان‌دهنده تابع هدف و قیود مسئله بالایی و روابط (۲۴) الی (۳۰) فرم KKT مسئله پایین (۱۶) الی (۲۲) است که پس از تبدیل به فرم KKT به صورت قید به مسئله اصلی نیز اضافه شده است. در بخش بعدی نیز نتایج شبیه‌سازی ارائه و کارایی مدل پیشنهادی نشان داده می‌شود.

## ۳- نتایج شبیه‌سازی

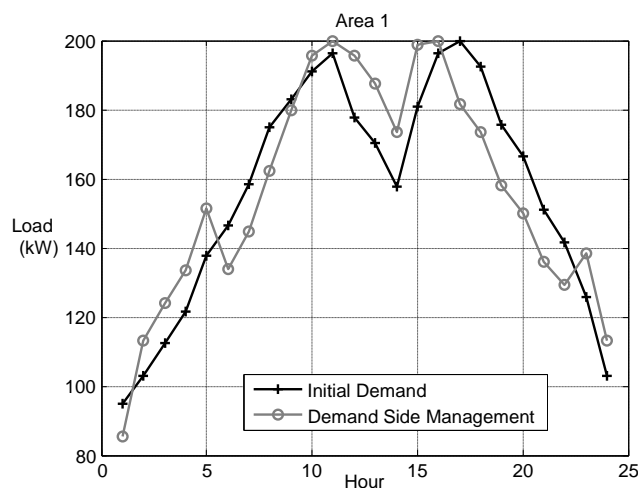
در این مقاله سه شبکه هوشمند با در نظر گرفتن بارهای قابل انعطاف، واحدهای تجدیدپذیر و فسیلی و همچنین منابع ذخیره-ساز انرژی نیز در نظر گرفته شده است. جدول (۱) نشان‌دهنده پارامترهای در نظر گرفته شده در سه شبکه هوشمند مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۲۰، ۲۱].

در این مقاله مسئله دو سطحی خطی باینری ارائه شده توسط نرم افزار متلب و حل‌کننده Gurobi نیز اجرا شده است. جدول (۲) نیز نشان‌دهنده نتایج مدیریت انرژی چندناحیه‌ای با در نظر گرفتن قید تعادل توان بین نواحی ۲۰۰ کیلووات است. در این جدول مدیریت انرژی در هر شبکه هوشمند و در هر ساعت نشان داده شده است. برای نمونه در ساعت ۱۲ در شبکه هوشمند اول تنها واحد ۲ روشن خواهد بود و مقدار ۵۰ کیلووات توان تولید خواهد کرد. در همین ساعت شبکه هوشمند دوم هر سه واحد روشن خواهد بود و به ترتیب ۸۰، ۳۰ و ۶/۳۲ کیلووات تولید خواهند نمود، به همین ترتیب در شبکه هوشمند سوم نیز تنها یک واحد روشن خواهد بود و میزان آن نیز ۱۳۰ کیلووات خواهد بود. وضعیت ذخیره‌سازها به ترتیب در هر سه شبکه متفاوت خواهد بود که در این ساعت تنها باتری شبکه دوم ظرفیت حدود ۲۰ کیلووات را دارد. به همین ترتیب تابع هدف مسئله در هر ساعت در جدول (۲) ستون آخر نشان داده شده است، که در نهایت تابع هدف نهایی (۲۴ ساعت) برابر با ۱۳۴۶۳۳ و مدت زمان حل مسئله برابر ۲۱ ثانیه شده است. شکل (۲) الی (۴) به ترتیب نشان‌دهنده برنامه مدیریت سمت تقاضا در هر سه شبکه هوشمند مدل شده را نشان می‌دهد. بخوبی مشخص است که در هر ساعت طبق این شکل‌ها تقاضای بار نیز در جهت بهبود تابع هدف مسئله تغییر پیدا کرده است.

جدول (۱): پارامترهای شبکه‌های هوشمند

Table 1. Parameters of the smart grids

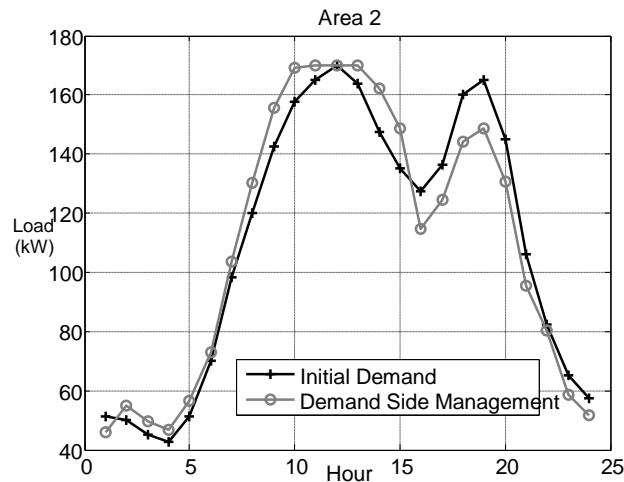
| شبکه هوشمند اول         |                 |                |               |
|-------------------------|-----------------|----------------|---------------|
|                         | واحد ۱          | واحد ۲         | واحد ۳        |
| کمترین توان (kW)        | ۰               | ۰              | ۰             |
| بیشترین توان (kW)       | ۱۰۰             | ۵۰             | ۱۵۰           |
| حداکثر شیب (kW)         | ۵۰              | ۷۰             | ۱۰۰           |
| حداقل شیب (kW)          | ۴۰              | ۳۰             | ۷۰            |
| a, b, c                 | ۱۵۰, ۱۷, ۰/۰۰۱  | ۱۰۰, ۱۰, ۰/۵   | ۲۵۰, ۲۱, ۰/۰۲ |
| $\alpha, \beta, \gamma$ | ۷, ۵, ۰/۰۰۳     | ۳۵, ۳, ۰/۰۰۱   | ۸۵, ۷, ۰/۰۰۶  |
| شبکه هوشمند دوم         |                 |                |               |
|                         | واحد ۴          | واحد ۵         | واحد ۶        |
| کمترین توان (kW)        | ۰               | ۰              | ۰             |
| بیشترین توان (kW)       | ۸۰              | ۳۰             | ۱۲۰           |
| حداکثر شیب (kW)         | ۳۰              | ۵۰             | ۶۰            |
| حداقل شیب (kW)          | ۱۰              | ۲۵             | ۳۵            |
| a, b, c                 | ۱۰۰, ۱۲, ۰/۰۰۰۵ | ۵۰, ۵, ۰/۰۰۰۹  | ۲۰۰, ۱۶, ۰/۱  |
| $\alpha, \beta, \gamma$ | ۲, ۱, ۰/۰۰۰۰۸   | ۳۰, ۰/۱, ۰/۰۰۵ | ۸۰, ۲, ۰/۰۰۶  |
| شبکه هوشمند سوم         |                 |                |               |
|                         | واحد ۷          | واحد ۸         | واحد ۹        |
| کمترین توان (kW)        | ۰               | ۰              | ۰             |
| بیشترین توان (kW)       | ۱۸۰             | ۱۳۰            | ۲۲۰           |
| حداکثر شیب (kW)         | ۳۰              | ۵۰             | ۶۰            |
| حداقل شیب (kW)          | ۱۰              | ۲۵             | ۳۵            |
| a, b, c                 | ۱۰۰, ۱۲, ۰/۰۰۵  | ۵۰, ۵, ۰/۰۰۰۹  | ۲۰۰, ۱۶, ۰/۱۵ |
| $\alpha, \beta, \gamma$ | ۲, ۱, ۰/۰۰۰۰۸   | ۳۰, ۰/۱, ۰/۰۰۵ | ۸۰, ۲, ۰/۰۰۶  |



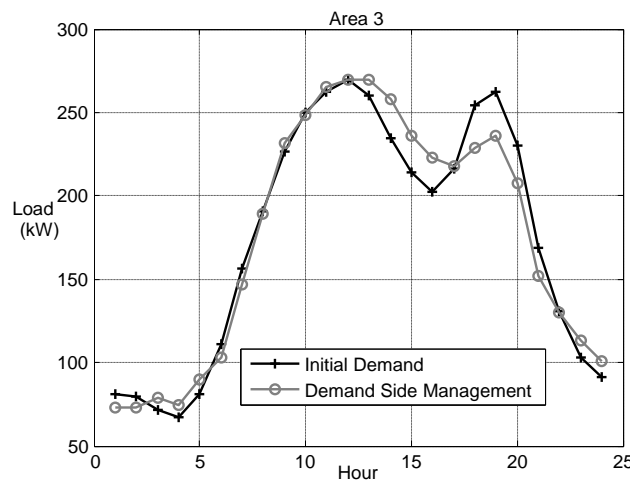
شکل (۲): مقایسه بار عادی با بار در برنامه DSM در شبکه هوشمند ۱

Figure 2. comparison of demand at smart grid 1



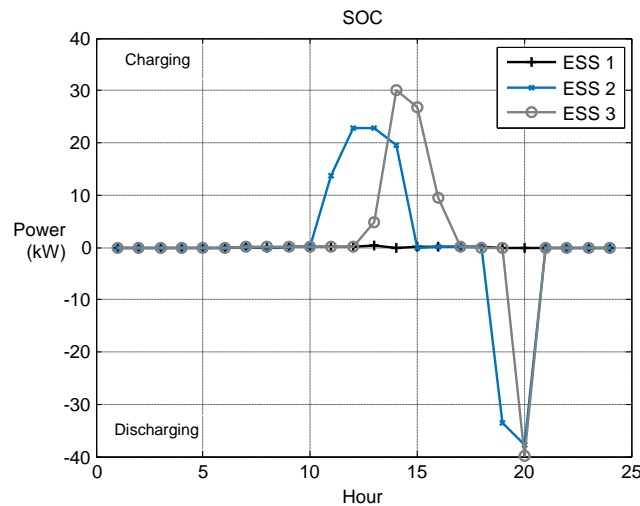


شکل (۳): مقایسه بار عادی با بار در برنامه DSM در شبکه هوشمند ۲  
Figure 3. Comparison of demand at smart grid 2



شکل (۴): مقایسه بار عادی با بار در برنامه DSM در شبکه هوشمند ۳  
Figure 4. Comparison of demand at smart grid 3

برای نمونه در شکل (۲) الی (۴) مشاهده می‌شود که پیک بار در ساعت ۲۰ پس از بهینه‌سازی به ساعت دیگر منتقل شده که این سبب کاهش هزینه‌ها شده است. همچنین در زمان‌های دیگر هم طبق شکل بارها به منظور بهبود تابع هدف تغییر نموده‌اند. شکل (۵) نشان دهنده وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه‌های هوشمند در بازه ۲۴ ساعته را نشان می‌دهد. در نهایت به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، نتایج را با روش ضریب وزنی و بهینگی پارتو مقایسه نموده‌ایم. جدول (۳) مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی که مدل‌سازی مسئله چند هدفه به صورت تجزیه مسئله پایین به شرایط KKT است را با روش‌های موجود همانند روش بهینگی پارتو و روش ضریب وزنی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تابع هدف در روش پیشنهادی برابر ۱۳۴۶۳۳ دلار است، که نسبت به روش‌های دیگر کمترین مقدار را نیز دارد، که این نشان می‌دهد روش بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهاد شده بهترین گزینه برای حل مسائل دو سطحی خواهد بود. از طرفی دیگر مدت زمان حل مسئله در روش پیشنهادی برابر ۲۱ ثانیه و در روش بهینگی پارتو و ضرایب وزنی به ترتیب ۵۶۱ و ۲۵۰ ثانیه شد که نشان از عملکرد دقیق و سریع روش پیشنهادی است.



شکل (۵): وضعیت انرژی در باتری‌های شبکه‌های هوشمند

Figure. 5. State of energy of the batteries in smart grids

جدول (۲): نتایج مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند در نظر گرفته شده

Table 1. Energy management results in smart grids

| تابع هدف (\$) | باتری ۳ (kW) | باتری ۲ (kW) | باتری ۱ (kW) | واحد ۹ (kW) | واحد ۸ (kW) | واحد ۷ (kW) | واحد ۶ (kW) | واحد ۵ (kW) | واحد ۴ (kW) | واحد ۳ (kW) | واحد ۲ (kW) | واحد ۱ (kW) | ساعت |
|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| ۴۵۱۲/۷        | .            | .            | .            | ۳۹/۴۶       | ۵۰          | ۳۰          | ۲۲/۶۲       | ۳۰          | ۳۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱    |
| ۴۱۷۶/۸        | .            | .            | .            | ۴/۴۶        | ۱۰۰         | ۲۰          | ۱۰/۳۹       | ۳۰          | ۶۰          | .           | ۵۰          | .           | ۲    |
| ۳۸۷۱          | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۰          | .           | ۳۰          | ۷۶/۸۷       | .           | ۲۸/۳۲       | .           | ۳    |
| ۳۸۳۸/۵        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۰/۸۷        | .           | ۳۰          | ۷۰/۹۷       | .           | ۴۰/۸۵       | .           | ۴    |
| ۴۴۱۲/۱        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۲۰/۱۸       | ۴/۷۱        | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۵    |
| ۴۵۹۴/۷        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۲۴/۰۷       | ۱۲/۰۴       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۶    |
| ۴۵۹۴/۷        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۲۴/۰۷       | ۱۲/۰۴       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۷    |
| ۴۵۹۴/۷        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۲۴/۰۷       | ۱۲/۰۴       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۸    |
| ۴۵۹۴/۷        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۲۴/۰۷       | ۱۲/۰۳       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۹    |
| ۴۵۷۷/۲        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۲۲/۷۳       | ۱۲/۰۳       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۰   |
| ۴۳۴۴/۲        | .            | ۱۳/۷۹        | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۲/۷۴       | ۶/۳۲        | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۱   |
| ۴۲۱۴/۱        | .            | ۲۲/۸۲        | .            | .           | ۱۳۰         | ۲/۷۴        | ۶/۳۲        | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۲   |
| ۴۳۴۶/۱        | ۴/۷۶         | ۲۲/۷۷        | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۲/۸۹       | ۶/۳۲        | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۳   |
| ۴۷۳۷/۱        | ۳۰/۱۰        | ۱۹/۴۷        | .            | .           | ۱۳۰         | ۴۲/۸۹       | ۶/۳۲        | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۴   |
| ۵۲۲۵/۹        | ۲۶/۷۵۴       | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۷۲/۸۹       | ۱۱/۷        | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۵   |
| ۵۷۴۰/۳        | ۹/۴۹         | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۰۲/۸۹      | ۱۸/۴۲       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۶   |
| ۶۷۹۹/۲        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۳۲/۸۹      | ۵۵/۱۲       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۷   |
| ۹۰۸۶/۵        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۶۲/۸۹      | ۱۱۵/۱۲      | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۸   |
| ۱۰۱۰۴         | .            | -۳۳/۴۸       | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۶۱/۹       | ۱۲۰         | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۱۹   |
| ۹۵۰۲/۶        | ۳۷/۶۹        | -۴۰          | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۵۱/۹       | ۱۲۰         | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۲۰   |
| ۸۴۴۳/۲        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۴۱/۹       | ۱۰۴/۰۹      | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۲۱   |
| ۷۰۴۰/۲        | .            | .            | .            | .           | ۱۳۰         | ۱۳۱/۹       | ۶۹/۰۸       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۵۰          | .           | ۲۲   |
| ۶۱۲۰/۷        | .            | .            | .            | .           | ۱۱۶/۸       | ۱۲۱/۹       | ۴۷/۰۸       | ۳۰          | ۸۰          | .           | ۲۵/۴۳       | .           | ۲۳   |
| ۵۱۶۲/۲        | .            | .            | .            | .           | ۹۱/۸۰       | ۱۱۱/۹       | ۲۶/۷۱       | ۳۰          | ۸۰          | .           | .           | .           | ۲۴   |
| ۱۳۴۶۳۳        | -            | -            | -            | ۲۸۸/۷۵      | ۲۹۵۸/۶      | ۱۵۶۴/۳      | ۸۱۰/۵۷      | ۷۲۰         | ۱۸۳۷/۹      | .           | ۱۰۹۴/۶      | .           | جمع  |

جدول (۳): مقایسه روش پیشنهادی

Table 3. Comparison of results

| ضریب وزنی | بهینگی پارتو | روش پیشنهادی             |
|-----------|--------------|--------------------------|
| ۱۴۱۲۳۲    | ۱۳۹۴۵۱       | تابع هدف (\$) ۱۳۴۶۳۳     |
| ۲۵۰       | ۵۶۱          | مدت زمان اجرا (ثانیه) ۲۱ |

### ۳- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل دوسطحی برنامه ریزی درجه دوم آمیخته با عدد صحیح برای مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای با هدف افزایش رفاه اجتماعی و کاهش هزینه‌های اقتصادی و آلاینده‌گی پیشنهاد شد. در این مقاله نیز مسئله مدیریت سمت تقاضا، مسئله شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌سازهای انرژی و منابع تجدیدپذیر به همراه ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی مدل سازی شد. در این مقاله مسئله بالایی یک مدل مرتبه دوم عدد صحیح مربوط به کمینه‌سازی هزینه و آلاینده‌گی منابع و مسئله سطح پایین به صورت یک مدل خطی برای بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی فرمولبندی شد، که مسئله پایین با استفاده از شرایط بهینگی KKT در قیود مسئله بالا اضافه شد. مدل ارائه شده با در نظر گرفتن قید تبادل توان بین شبکه‌های هوشمند به راحتی برای مدیریت انرژی چند ناحیه‌ای تعمیم داده شد. مدل سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب و حل کننده Gurobi انجام شد که نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل دو سطحی ارائه شده، روشی کارآمد در بهینه‌سازی انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای نسبت به روش‌های وزنی و بهینگی پارتو در مدت زمان حل و جواب‌های بهینه سراسری نیز خواهد بود. حل سریع مسئله این امید را می‌بخشد که می‌توان روش پیشنهادی را برای شبکه‌های مقیاس بزرگ حل نمود.

### References

#### مراجع

- [1] B. Lokeshgupta, S. Sivasubramani, "Multi-objective dynamic economic and emission dispatch with demand side management", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 97, pp. 334-343, April 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2017.11.020).
- [2] J. Lin, Z.J. Wang, "Multi-area economic dispatch using an improved stochastic fractal search algorithm", *Energy*, vol. 166, pp. 47-58, Jan. 2019 (doi: 10.1016/j.energy.2018.10.065).
- [3] L. Wu, "A transformation-based multi-area dynamic economic dispatch approach for preserving information privacy of individual areas", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 722-731, Jan. 2019 (doi: 10.1109/TSG.2017.2751479).
- [4] E. Loukarakis, C. J. Dent and J. W. Bialek, "Decentralized multi-period economic dispatch for real-time flexible demand management", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 672-684, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2402518).
- [5] Basu M., "Quasi-oppositional group search optimization for multi-area dynamic economic dispatch", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 78, pp. 356-367, June. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.120).
- [6] GhasemiM, Aghaei J, Akbari E, Ghavidel S, Li L, "A differential evolution particle swarm optimizer for various types of multi-area economic dispatch problems", *Energy*, vol. 107, pp. 182-195, July. 2016 (doi: 10.1016/j.energy.2016.04.002).
- [7] Zou DX, Li S, Wang GG, Li ZY, Ouyang HB, "An improved differential evolution algorithm for the economic load dispatch problems with or without valve-point effects", *Appl Energy*, vol. 181, pp. 375-390, Nov. 2016 (doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.067).
- [8] Manoharan PS, Kannan PS, Baskar S, Willjuice Iruthayarajan M, "Evolutionary algorithm solution and KKT based optimality verification to multi-area economic dispatch", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 31, pp. 365-373, Sep. 2009 (doi: 10.1016/j.ijepes.2009.03.010).
- [9] H. Abdi, E. Dehnavi, F. Mohammadi, "Dynamic economic dispatch problem integrated with demand response (DEDDR) considering non-linear responsive load models", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2586-2595, Nov. 2016 (doi: 10.1109/TSG.2015.2508779).
- [10] Rajan A, Malakar T, "Optimum economic and emission dispatch using exchange market algorithm", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 82, pp. 545-560, Nov. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2016.04.022).

- [11] F. Zaman, S.M. Elsayed, T. Ray, R.A. Sarker, "Configuring two-algorithm-based evolutionary approach for solving dynamic economic dispatch problems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 53, pp.105–25, Aug. 2016 (doi: 10.1016/j.engappai.2016.04.001).
- [12] M. Alham, M. Elshahed, D.K. Ibrahim, EEDA El Zahab, "A dynamic economic emission dispatch considering wind power uncertainty incorporating energy storage system and demand side management", *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 800–811, Oct. 2016 (doi: 10.1016/j.renene.2016.05.012).
- [13] M. Arnold, S. Knöpfli, G. Andersson, "Improvement of OPF decomposition methods applied to multi-area power systems", Accessed, May 2017. [Online]. Available: [http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/Arnold\\_](http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/Arnold_)
- [14] Z. Li, W. Wu, B. Zhang, B. Wang, "Decentralized multi-area dynamic economic dispatch using modified generalized Benders decomposition", *IEEE Trans. on Power Syst*, vol. 31, no. 1, pp. 526–538, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2399474).
- [15] Y. Guo, L. Tong, W. Wu, B. Zhang and H. Sun, "Coordinated multi-area economic dispatch via critical region projection", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 3736–3746, Sept. 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2655442).
- [16] W. Zheng, W. Wu, "Distributed multi-area load flow for multi-microgrid systems", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13, no. 3, pp. 327–336, Dec. 2019 (doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6220).
- [17] R. Azizpanah-Abarghoee, P. Dehghanian and V. Terzija, "Practical multi-area bi-objective environmental economic dispatch equipped with a hybrid gradient search method and improved Jaya algorithm", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 14, pp. 3580–3596, Nov. 2016 (doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0333).
- [18] S. Boyd, L. Vandenberghe, *Convex optimization*, New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2004.
- [19] M. Yazdani-Damavandi, N. Neyestani, M. Shafie-khah, J. Contreras, J. P. S. Catalão, "Strategic behavior of multi-energy players in electricity markets as aggregators of demand side resources using a bi-level approach", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 397–411, Jan. 2018 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2688344).
- [20] H. Narimani, S.E. Razavi, A. Azizivahed, E. Naderi, M. Fathi, M.H. Ataei, M.R. Narimani, "A multi-objective framework for multi-area economic emission dispatch", *Energy*, vol. 154, Pages 126–142, July. 2018 (doi: 10.1016/j.energy.2018.04.080).
- [21] J. Lin, Z.J. Wang, "Multi-area economic dispatch using an improved stochastic fractal search algorithm", *Energy*, vol. 166, Pages 47–58, 2019 (doi: 10.1016/j.energy.2018.10.065).

زیر نویس‌ها:

1. Particle swarm optimization
2. Stochastic fractal search algorithm
3. Locational marginal price
4. Differential evolution algorithm
5. Karush–Kuhn–Tucker (KKT) conditions
6. Combined heat and power
7. Vehicle to grid
8. Photovoltaic
9. Demand side management
10. Complementary slackness

## واژه نامه

## پارامترها:

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| $a_i, b_i, c_i$                      | ضرایب هزینه سوخت واحد آم                 |
| $\alpha_i, \beta_i, \delta_i$        | ضرایب هزینه انتشار گاز واحد آم           |
| $C_i^{up}, C_i^{dw}$                 | هزینه راه اندازی و خاموش سازی واحد آم    |
| $P_i^{min}, P_i^{max}$               | کمترین و بیشترین توان قابل تولید واحد آم |
| $\eta_i$                             | راندمان ذخیره‌ساز آم                     |
| $\Omega_i^{c,min}, \Omega_i^{c,max}$ | کمترین و بیشترین توان شارژ ذخیره ساز آم  |
| $\Omega_i^{d,min}, \Omega_i^{d,max}$ | کمترین و بیشترین توان دشارژ ذخیره ساز آم |

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| $\Pi_i^{max}$                  | حداکثر ظرفیت ذخیره سازی انرژی در ذخیره ساز آم       |
| $r_i^{dw}, r_i^{up}$           | شیب مجاز تغییرات توان رو به پایین و بالا در واحد آم |
| $\phi_i$                       | دفعات مجاز شارژ شدن ذخیره ساز آم                    |
| $\lambda_t$                    | میزان بار انعطاف پذیر در ساعت آم                    |
| $D_t$                          | برابر توان بار شبکه در ساعت آم می باشد              |
| $T_{min}^{i,j}, T_{max}^{i,j}$ | کمترین و بیشترین توان قابل تبادل بین ناحیه i و j    |
| $m$                            | عدد بزرگ مثبت                                       |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $purchase_{i,j,k}$       | بیشترین پیشنهاد بار j در دوره t          |
| $purchase_{t,d,r}^{DSM}$ | بیشترین پیشنهاد در برنامه DSM در دوره t  |
| $sale_{t,i,b}$           | بیشترین عرضه واحد آم در دوره آم          |
| $\pi_{t,j,k}^D$          | قیمت تقاضای بار j ام در زمان t ام        |
| $\pi_{t,d,r}^{DSM}$      | قیمت تقاضا در DSM در زمان t ام           |
| $\pi_{t,i,b}^G$          | قیمت واحد ژنراتور i ام در دوره زمان t ام |
| $K$                      | تعداد شبکه‌های هوشمند                    |

## متغیرها:

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| $P_{i,t}$                        | توان واحد آم در زمان t ام                                  |
| $\Omega_{i,t}^c, \Omega_{i,t}^d$ | توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز آم در ساعت آم                  |
| $\Pi_{i,t}$                      | وضعیت انرژی ذخیره ساز آم در ساعت آم                        |
| $\partial$                       | درصد بارهای انعطاف پذیری                                   |
| $D_t^{DSM}$                      | بار جدید تغییر یافته در زمان آم از برنامه مدیریت سمت تقاضا |
| $g_{i,t}^{PV}$                   | توان واحد PV ام در زمان آم                                 |
| $\Psi_t$                         | توان شارژ ایستگاه شارژ خودرو در زمان آم                    |
| $T_t^{k,h}$                      | توان مبادله شده بین سیستم k و h در زمان آم                 |
| $q_{t,j,k}^{bid}$                | عرضه پذیرفته شده در تقاضای j ام در دوره آم                 |
| $q_{t,d,r}^{bid^{DSM}}$          | عرضه پذیرفته شده در برنامه DSM در دوره آم                  |
| $q_{t,i,b}^{offer}$              | تقاضای پذیرفته شده واحد i ام در دوره t ام                  |

## متغیرهای باینری:

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $\Delta_{i,t}, \nabla_{i,t}$ | متغیر باینری مربوط به روشن سازی و خاموش‌سازی واحد آم در زمان آم |
| $Z_{i,t}$                    | متغیر باینری مربوط به ذخیره‌ساز آم در ساعت آم                   |
| $\partial_i$                 | متغیر باینری ضریب نابرابری لاگرانژ                              |