مدیریت بهینه سمت تقاضا در ریزشبکه مستقل از شبکه دارای منابع تجدیدپذیر با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی

نرگس پرهیزی [۱]، سید مازیار میرحسینی مقدم [۲]، موسی مرزبند [۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۴/۴

چکیده:

امروزه سیستم‌های ریزشبکه به عنوان ابزاری پایه برای تولید توان با کیفیت بهتر، راندمان بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر به کار گرفته می‌شوند. اقدام اساسی در این سیستم‌ها، جبران تأثیرهای ناشی از متغیر بودن تولید منابع غیرقابل‌کنترل است. در این مقاله، یک فرمول کلی برای تخمین عملکرد بهینه سیستم به منظور حداقل‌سازی هزینه‌های مربوط به منابع تولید، بارهای قابل‌قطع و همچنین کاهش قیمت برق مصرفی (MCP) ارائه شده است. در این راستا، برای ایجاد تعادل در عرضه و تقاضا، تأثیر میزان ذخیره انرژی در شبکه و پاسخ سمت تقاضا نیز لحاظ شده است. در مسئله بهینه‌سازی مطرح شده، برای حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم از الگوریتم جدیدی به نام رقابت استعماری چندبعدی استفاده شده است که در آن قیود فنی شامل تغذیه کامل بار و مشخصه‌های فنی مربوط به هر یک از منابع موجود در ریزشبکه‌ها لحاظ شده است. مقایسه بین الگوریتم پیشنهاد شده و الگوریتم سیستم مدیریت انرژی متداول اصلاح شده (MCEMS) در سیستم آزمون ریزشبکه مرکز تحقیقات انرژی کاتالونیا، نشان دهنده کارآیی الگوریتم پیشنهاد شده برای تأمین تقاضای بار، کاهش هزینه کلی تولید (در حدود ۳۱ درصد) و همچنین کاهش MCP نسبت به الگوریتم MCEMS می‌باشد.

کلمات کلیدی:

الگوریتم رقابت استعماری، توزیع اقتصادی توان، ریزشبکه ،مدیریت بهینه انرژی، مدیریت سمت تقاضا

۱) دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان narges_parhizi@yahoo.com
۲)) استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان (نویسنده مسئول) m.mirhosseini@liau.ac.ir
۳) دانشیار پژوهشی دانشگاه منچستر mousa.marzband@manchester.ac.uk

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

مقدمه

امروزه یکی از اهداف اصلی پیاده‌سازی یک شبکه هوشمند، ارائه سیستم مدیریت انرژی[۱] (EMS) برای ریزشبکه[۲] با لحاظ نمودن عملکرد بهینه هر یک از منابع تولید موجود در آن و با هدف مدیریت بهتر تقاضای بار تحت شرایط مختلف می‌باشد. [۸,۷]. از آنجا که مدل درنظر گرفته شده برای ریزشبکه‌ها ماهیتی غیرخطی و گسسته دارد، لذا ارائه الگوریتم‌های بهینه‌سازی به منظور یافتن بهترین راه‌حل ممکن برای توزیع اقتصادی توان، بخش عمده‌ای از مطالعات لحاظ شده در این سیستم‌ها می‌باشد. در ریزشبکه متصل به شبکه، نوسان‌های تقاضای بار منجر به مشکلات ناشی از تغییرات فرکانس و توان راکتیو می‌شود. به دلیل وجود منابع قابل‌کنترل[۳]، توان تولیدی متناسب با میزان تقاضای بار می‌تواند کاهش یا افزایش یابد. در ریزشبکه‌های مستقل از شبکه که دارای منابع تجدیدپذیر می‌باشند، با توجه به متغیرهای تأثیر گذار محیطی، در بیشتر بازه‌های زمانی توان خروجی آنها به طور نوسانی در حال تغییر خواهد بود [۱۵]. بنابراین، تغییرات توان تولیدی و تعادل در عرضه و تقاضا یک مسئله چالش برانگیز در سیستم‌های برپایه تولیدهای پراکنده[۴] محسوب می‌شود [۱۳,۹]. برای ایجاد تعادل مناسب در عرضه و تقاضا، می‌توان ذخیره‌سازی انرژی و فرایند پاسخ تقاضا[۵] (DR) را با منابع تولید پراکنده ترکیب کرد [۱، ۵، ۱۰ و ۱۱]. در حال حاضر، ذخیره انرژی تنها در مقیاس کوچک و در بازه زمانی کوتاه قابل پیاده‌سازی می‌باشد. هر چند که فناوری‌هایی از قبیل باطری‌های لید–اسید[۶] در این رابطه رشد چشمگیری داشته‌اند [۷]. همان طوری که ذکر شد، DR نیز می‌تواند نوسان‌های ناشی از تقاضای تصادفی را کم کند [۵,۱]. DR سازوکاری است که در آن مصرف‌کنندگان به صورت داوطلبانه برای کاهش اوج مصرف، با اصلاح الگوی مصرف برخی از تجهیزات خودشان شرکت می‌کنند. مصرف‌کنندگان شرکت کننده در DR ممکن است پولی را به عنوان پاداش دریافت کنند و یا تعرفه کمتری بپردازند [۱، ۵، ۷، ۱۰,۸]. مراجع [۱، ۵، ۱۱] نشان می‌دهند که DR تأثیر مثبتی بر روی راندمان بازار برق، قابلیت اطمینان و توانایی تأمین توان مورد نیاز با استفاده از رزروهای چرخان دارد. توان مرجع بهینه برای رزروهای چرخان، منابع ذخیره‌کننده انرژی[۷] (ES) و DR با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده و اطلاعات منابع غیرقابل‌کنترل و بارهای غیرقابل‌قطع[۸] (NRLD) که از شبکه واقعی اندازه‌گیری شده‌اند، تعیین می‌شوند و توسط واحد کنترل‌کننده مرکزی به این منابع ارسال می‌شود. زمان‌بندی بهینه در یک ساختار ترکیبی شامل منابع تولید و DR، با هدف حداقل‌سازی هزینه عملکرد

1) Energy Management System
2) microgrid
3) Dispatchable Source
4) Distributed Generation
5) Demand Response
6) Lead-acid
7) Energy Storage
8) Non-Responsive Load Demand

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

سیستم و نیز کاهش قیمت برق مصرفی[1] (MCP) در هر بازه زمانی با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری به نـام رقابـت استعماری چند بعدی[2] (MICA)، در این مقاله ارائه شده است.

الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم‌های مختلفی مبتنی بر شبیه‌سازی فرایندهای طبیعی برای حل مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد شده است [۱، ۲، ۵، ۷-۱۳، ۱۵]. الگوریتم رقابت استعماری که مبتنی بر جمعیت و برپایه تکامل سیاسی و اجتماعی جوامع بشری می‌باشد، در سال ۲۰۰۷ توسط آتش‌پز و لوکاس معرفی شده است [۳]. این الگوریتم دارای مزایای متعددی همچون سادگی، دقت و صرفه جویی در زمان است. از طرف دیگر، به واسطه سرعت همگرایی بالا و توانایی در یافتن پاسخ بهینه کلی در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری، می‌توان به نتایج اقتصادی و با قابلیت اعتماد بالا دست پیدا نمود [۴]. در این الگوریتم، ابتدا یک آرایه از متغیرهای مسئله که باید بهینه شوند، ایجاد می‌شود. به هر یک از درایه‌های این آرایه کشور گفته می‌شود. در یک مسئله با ابعاد N_{var}، یک کشور دارای ابعاد $1 \times N_{var}$ بوده که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\text{country} = [P^1, P^2, \cdots, P^{N_{var}}] \qquad (۱)$$

در این رابطه $P^i : i = 1,2,\cdots N_{var}$ متغیرهایی می‌باشند که بایستی بهینه شوند [۱۶,۱۴]. به تعداد N_{imp} از بهترین اعضای جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان استعمارگر انتخاب می‌شود. مابقی جمعیت نیز کشورهای مستعمره را تشکیل می‌دهند. به منظور تخصیص مستعمره‌های اولیه بین استعمارگرها، به هر استعمارگر متناسب با قدرت آن تعدادی مستعمره اختصاص داده می‌شود [۶]. پس از شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، استعمارگرها به منظور افزایش قدرتشان، مستعمره‌های خود را از طریق سیاست جذب توسعه می‌دهند. در سیاست جذب، مستعمره‌ها به سمت استعمارگر خود حرکت می‌کنند. الگوریتم با فرایند انقلاب ادامه خواهد یافت. انقلاب با استفاده از ضریبی به نام نرخ انقلاب، شانس رسیدن به پاسخ‌های بهتر را بیشتر نموده و باعث ایجاد پاسخ‌های متنوع می‌شود. نرخ انقلاب در الگوریتم نشاندهنده درصدی از مستعمره‌ها در هر امپراطوری است که موقعیت آنها به طور تصادفی تغییر می‌کند [۳, ۶]. در حین سیاست جذب و فرایند انقلاب، یک مستعمره ممکن است به موقعیتی بهتر از استعمارگر (به نقاطی با هزینه کمتر) دست یابد. در این حالت، استعمارگر و مستعمره، جای خود را با همدیگر عوض می‌کنند و الگوریتم با استعمارگر در موقعیت جدید به عملکرد خود ادامه می‌دهد [۱۶,۶]. سپس رقابت استعماری آغاز شده و تمام امپراطوری‌ها سعی می‌کنند مستعمره‌های امپراطوری‌های دیگر را در اختیار بگیرند. هر امپراطوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید، بتدریج در جریان رقابت استعماری حذف خواهد شد. بدین معنی که به مرور زمان، امپراطوری‌های ضعیف، مستعمره‌های خود را از دست داده و امپراطوری‌های قوی‌تر، این مستعمره‌ها

1) Market clearing price
2) Multi-Dimension Imperialist Competition Algorithm

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

را تصاحب کرده و بر قدرت خویش می‌افزایند [۶]. شروط متفاوتی را می‌توان برای سقوط یک امپراطوری و در نتیجه، حذف آن در نظر گرفت. می‌توان یک امپراطوری را زمانی حذف شده تلقی کرد که مستعمره‌های خود را از دست داده باشد. پس از مدتی، همه امپراطوری‌ها سقوط کرده و تنها یک امپراطوری باقی می‌ماند و بقیه کشورها تحت کنترل این امپراطوری واحد قرار می‌گیرند. آخرین امپراطوری نشاندهنده بهترین راه حل برای این مسله است.

فرموله کردن ریاضی مسئله

پیاده‌سازی ریاضی سیستم ریزشبکه

در ادامه، به منظور پیاده‌سازی ریاضی سیستم ریزشبکه تحت مطالعه، تابع هزینه برپایه حداقل‌سازی هزینه تولید توان و نیز قیودی که باید در حین فرایند بهینه‌سازی برآورده شوند، ارائه شده است.

تابع هزینه[1] (OF)

$$OF = Min\left[\sum_{i=1}^{24}\left(\sum_{i=1}^{n} P_t^{g_i}\times\pi^{g_i} - \sum_{j=1}^{m} P_t^{c_j}\times\pi^{c_j} + P_t^{UP}\times\pi^{UP}\right)\quad\times\Delta t\right] \tag{۲}$$

که در آن $P_t^{g_i}$، $P_t^{c_j}$ و P_t^{UP} به ترتیب توان اکتیو تولیدی توسط منبع i، توان اکتیو مصرفی توسط مصرف کننده j، توان تأمین نشده توسط ریزشبکه در بازه زمانی t، π^{g_i} و π^{c_j} به ترتیب قیمت پیشنهادی توسط منبع i و مصرف کننده j و π^{UP} هزینه جریمه برای انرژی تغذیه نشده است.

قیود

منابع تجدیدپذیر

$$\underline{P}^{g_i} \le P_t^{g_i} \le \overline{P}^{g_i} \tag{۳}$$

که در آن $\underline{P}^{g_i}$ و $\overline{P}^{g_i}$ به ترتیب حداقل و حداکثر توان تولیدی توسط واحد تولیدی i است.

منابع تجدیدناپذیر

$$[DT_{t-1}^{i} - T^{ON,i}]\cdot[X_{t-1}^{i} - X_t^{i}] \ge 0, \forall i, t \tag{۴}$$

1) Objective Function

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

که در آن

DT_t^i: بازه زمانی روشن شدن واحد i در زمان t (ثانیه)

$T^{ON,i}$: حداقل زمان روشن شدن واحد i (ثانیه)

X_t^i: وضعیت واحد i در زمان t (متغیر باینری که مقدار ۱ معرف روشن بودن و صفر نشاندهنده خاموش شدن است)

X_{t-1}^i: وضعیت واحد i در زمان t-1

$$[-DT_{t-1}^i - T^{OFF,i}]\cdot[X_t^i - X_{t-1}^i] \geq 0, \forall i, t \quad (۵)$$

که در آن

$T^{OFF,i}$: حداقل زمان خاموش شدن واحد i (ثانیه)

روابط (۴) و (۵) نشان می‌دهند که ادوات رزرو چرخان نیاز به سپری شدن زمان به منظور راه‌اندازی و از سرویس خارج شدن دارند.

$$P_t^{g_i} - P_{t-1}^{g_i} \leq \overline{R}^i \quad (۶)$$

که در آن

$\overline{R}^i$: نرخ شیب بالارونده توان واحد i در زمان روشن شدن (کیلو وات)

$$P_{t-1}^{g_i} - P_t^{g_i} \leq \underline{R}^i \quad (۷)$$

که در آن

$\underline{R}^i$ نرخ شیب پایین رونده توان واحد i در زمان خاموش شدن (کیلو وات)

روابط (۶) و (۷) نشان می‌دهند که در زمان تقاضا برای تولید توان بیشتر و یا کمتر، ادوات رزرو چرخان نیاز به افزایش و یا کاهش تدریجی تولید تا رسیدن به توان مورد نظر دارند.

منابع ذخیره‌کننده انرژی

$$P_t^{ES_d} \leq \overline{P}^{ES_d} \quad (۸)$$

$$P_t^{ES_c} \leq \overline{P}^{ES_c} \quad (۹)$$

$$\underline{E}^{ES} \leq E_t^{ES} \leq \overline{E}^{ES} \quad (۱۰)$$

در (۸) و (۹)، $\overline{P}^{ES_d}$ و $\overline{P}^{ES_c}$ به ترتیب حداکثر توان در طول شارژ و دشارژ و $P_t^{ES_c}$ و $P_t^{ES_d}$ به ترتیب توان‌های تولیدی و مصرفی توسط ES در بازه زمانی t است. در (۱۰) $\overline{E}^{ES}$ و $\underline{E}^{ES}$ به ترتیب حداکثر و حداقل انرژی ذخیره شده در ES و E_t^{ES} انرژی ذخیره شده درES در بازه زمانی t است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

تعادل توان

$$\sum_{i=1}^{n} P_t^{g_i} + P_t^{ES_d} = \sum_{j=1}^{m} P_t^{c_j} + P_t^{ES_c} \quad (۱۱)$$

این فرمول بدین معنی است که مقدار توان تولید توسط تولیدکنندگان در هر بازه زمانی بایستی برابر مقدار تقاضای کلی مصرف‌کنندگان باشد.

بارهای غیرقابل‌قطع

$$P_t^{NRLD} \le \overline{P}^{NRLD} \quad (۱۲)$$

$\overline{P}^{NRLD}$ حداکثر مقدار توان مصرف شده توسط NRLD و P_t^{NRLD} توان مصرف شده توسط این بار در بازه زمانی t است.

بارهای قابل‌قطع

$$P_t^{RLD} \le \overline{P}^{RLD} \quad (۱۳)$$

$$\sum_t P_t^{RLD} = \sum_t P_t^{UP} \quad (۱۴)$$

$$P_t^{EGP} = P_t^{ES_C} + \left(1 - X_t^{RLD}\right) \times P_t^{RLD}, X_t^{RLD} \in \{0,1\} \quad (۱۵)$$

$$\sum_t P_t^{EGP} = \sum_t P_t^{ES_c} + \sum_t P_t^{RLD} \quad (۱۶)$$

در (۱۳) $\overline{P}^{RLD}$ حداکثر مقدار توان مصرف شده توسط RLD و P_t^{RLD} توان مصرف شده توسط این بار در بازه زمانی t است. این رابطه بیان می‌کند که توان بار RLD در هر بازه زمانی بایستی کمتر یا مساوی حداکثر بار در نظر گرفته شده برای RLD باشد. P_t^{EGP} در (۱۵)، اضافه تولید در بازه زمانی t است و X_t^{RLD} متغیر حالت مربوط به RLD می‌باشد. این رابطه نشان می‌دهد توان مازاد تولید شده توسط ریزشبکه می‌تواند برای تغذیه سیستم‌های ES و RLD مورد استفاده قرار گیرد. الگوریتم پیشنهادی بایستی بسته به تابع هزینه تعریف شده و قیود ارائه شده تصمیم بگیرد که چه میزان از توان مازاد تولید شده بایستی صرف تغذیه ES و RLD شود. مجموع توان مازاد تولید شده در طول عملکرد روزانه سیستم ریزشبکه نیز بایستی با مجموع توان تغذیه شده توسط ES و RLD برابر باشد. این موضوع می‌تواند به صورت ریاضی توسط رابطه (۱۶) بیان شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده برای EMS

در این مقاله، به منظور پیاده‌سازی EMS بر پایه بازار انرژی محلی[1] (LEM)، از دو روش مختلف فرا ابتکاری و بدون استفاده از بهینه‌سازی به نام‌های MCEMS_LEM و EMS-MICA_LEM استفاده شده است. کارایی هریک از این الگوریتم‌ها در سیستم تحت مطالعه بررسی شده است. در ادامه، هر یک از این الگوریتم‌ها به تفصیل توضیح داده شده است.

الگوریتم MCEMS_LEM

این الگوریتم برای پیاده‌سازی EMS در ریزشبکه مستقل از شبکه پیشنهاد شده و قابلیت‌هایی از قبیل انعطاف‌پذیری، سرعت بالا در تصمیم‌گیری و سازگاری آن در اضافه نمودن تجهیزات جدید به سیستم ریزشبکه در [۸,۷] نشان داده شده است. ولی در این الگوریتم، مقدار بهینه‌ای برای توان‌های مرجع انتخاب نشده است. همان طوری که از شکل (۱) مشاهده می‌شود، این الگوریتم دربرگیرنده واحدهای EMS، DR و LEM است که به تفصیل در [۸,۷] توضیح داده شده است.

شکل ۱) نمودار جریانی الگوریتم MCEMS_LEM

الگوریتم EMS-MICA_LEM

همان طوری که در شکل (۲) نشان داده شده است، این الگوریتم از دو واحد به نام‌های EMS-MICA و LEM تشکیل شده است. نحوه پیاده‌سازی هر یک از این واحدها در ادامه توضیح داده شده است.

شکل ۲) الگوریتم پیشنهاد شده برای پیاده‌سازی EMS-MICA_LEM

واحد EMS-MICA

نمودار جریانی واحد EMS-MICA در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مسئله، هدف یافتن مقادیر بهینه برای توان خروجی توربین‌های بادی[2](WT)، خورشیدی[3] (PV)، میکروتوربین[4] (MT)، توان تولیدی و مصرفی منابع ES در حالت شارژ و دشارژ و توان RLD (سیستم حرارتی[5] (EWH)، به عنوان بار قابل‌کنترل و DR به عنوان بار قابل شیفت)

1) Local Energy Market
1) Wind Turbine
2) PhotoVoltaic
3) MicroTurbine
4) Electrical Water Heat

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

است به طوری که ضمن برآورده نمودن کلیه قیود فنی ارائه شده، در نهایت با استفاده از تابع هزینه (۲) منجر به یافتن کمترین مقدار هزینه تولید توان شود.

بنابراین، مطابق توضیح‌های ارائه شده، هر کشور که در واقع راه‌حل‌های ممکن در فضای جستجو هستند، به صورت بردار $country=[P_t^1,P_t^2,\cdots,P_t^7]$ تعریف شده است که درایه‌های آن عبارتند از: $P_t^1=P_t^{WT}$، $P_t^2=P_t^{PV}$، $P_t^3=P_t^{MT}$، $P_t^4=P_t^{ES_c}$، $P_t^5=P_t^{ESd}$، $P_t^6=P_t^{EWH}$ و $P_t^7=P_t^{DR}$. در این مسئله، بازه زمانی مورد مطالعه ۲۴ ساعت بوده و اطلاعات مربوط به حداکثر توان خروجی منابع تجدیدپذیر و اوج بار مصرفی در بازه‌های زمانی نیم ساعته اندازه‌گیری شده است. مقادیر بهینه برای متغیرها توسط MICA، باید در ۴۸ بازه زمانی تعیین شود. بنابراین، در نهایت باید بردارهای $country_t^1$ تا $country_t^{48}$ با ابعاد ۷×۱ به دست آورده شوند. متغیرهای مسئله را می توان به دو دسته مستقل و وابسته تقسیم نمود. متغیرهای مستقل، متغیرهایی هستند که مربوط به منابع غیر قابل کنترل (PV و WT در این مطالعه) بوده به نحوی که تغییر مقادیر دیگر متغیرها تأثیری بر روی آنها ندارند و فقط به مقدار توان قابل دسترس در هر بازه زمانی وابسته می‌باشند. در حالی که متغیرهای وابسته متغیرهای هستند که مقدارشان به متغیرهای مستقل حساس بوده و متناسب با آنها تغییر می‌نمایند. توان خروجی منابع قابل‌کنترل (در این مطالعه میکروتوربین)، توان تولیدی و مصرفی منابع ES و RLD از جمله متغیرهای وابسته محسوب می‌شوند. بنابراین، ابتدا بایستی متغیرهای مستقل (P_t^{WT} و P_t^{PV}) به صورت تصادفی با در نظر گرفتن حداکثر توان تولیدی توسط این منابع ایجاد شوند. سپس با توجه به متغیرهای مستقل و نیز قیود مطرح شده برای مسئله، مقادیری به صورت تصادفی برای متغیرهای وابسته ایجاد خواهد شد. در نهایت، الگوریتم پیشنهادی مطابق با شبه کد ارائه شده زیر بایستی اجرا شود.

۱. مقداردهی اولیه پارامترهای مسئله و ICA
۲. تنظیم t=1 برای اولین بازه زمانی
۳. تنظیم i=1
۴. ایجاد یک مقدار تصادفی برای متغیرهای مستقل مسئله با توجه به مقدار حداقل و حداکثر آنها
۵. ایجاد یک مقدار تصادفی برای متغیرهای وابسته با توجه به اطلاعات متغیرهای مستقل و قیود مسئله
۶. ایجاد یک کشور با قرار دادن مقادیر ایجاد شده برای متغیرهای مسئله در یک بردار با ابعاد $1*N_{VAR}$
۷. محاسبه هزینه کشور ایجاد شده با استفاده از رابطه (۲)
۸. i=i+1
۹. تا زمانی که نامساوی $i<N_{Pop}$ برقرار باشد، مراحل ۳ تا ۶ انجام شود.
۱۰. دسته بندی صعودی کشورها بر اساس هزینه آنها

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

۱۱. انتخاب N_{imp} تا از بهترین اعضای جمعیت که کمترین میزان هزینه را دارند به عنوان استعمارگر و اختصاص بقیه جمعیت ایجاد شده به عنوان مستعمره

۱۲. تقسیم مستعمره‌ها بین استعمارگرها

۱۳. تنظیم Decade=1 برای اولین تکرار الگوریتم

۱۴. تنظیم i=1 و j=1

۱۵. انتخاب امپراطوری i ام

۱۶. انتخاب مستعمره j ام ازامپراطوری i ام

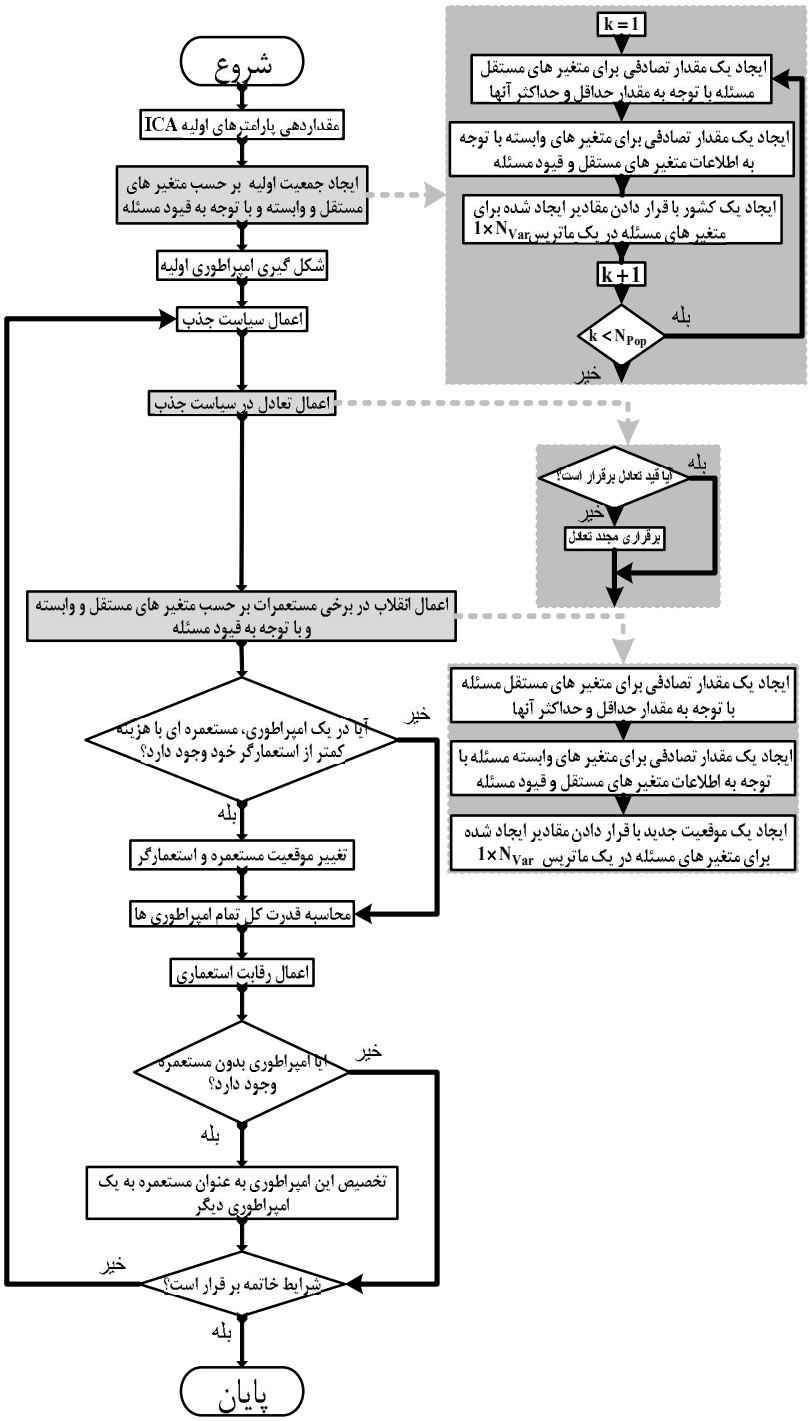
۱۷. حرکت مستعمره j ام به سمت استعمارگر خود و رسیدن به موقعیت جدید

۱۸. برقراری مجدد تعادل، اگر پس از اعمال سیاست جذب، قید تعادل برقرار نبود.

۱۹. محاسبه هزینه موقعیت جدید مستعمره j با استفاده از رابطه (۲)

۲۰. j=j+1

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]



شکل ۳) نمایش گرافیکی فرآیند طی شده در الگوریتم MICA

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

۲۱. تا زمانی که تمام مستعمره‌های امپراطوری i انتخاب شوند، مراحل ۱۶ تا ۲۰ انجام شود.

۲۲. i=i+1

۲۳. تا زمانی که تمام امپراطوری‌ها انتخاب شوند، چرخه ۱۵ تا ۲۲ انجام شود.

۲۴. تنظیم i=1 و j=1

۲۵. انتخاب امپراطوری i ام

۲۶. انتخاب مستعمره j ام ازامپراطوری i ام

۲۷. ایجاد یک عدد به صورت تصادفی

- اگر عدد ایجاد شده از نرخ انقلاب کمتر بود، مراحل ۴ تا ۷ انجام شود.

۲۸. j=j+1

۲۹. تا زمانی که تمام مستعمره‌های امپراطوری i انتخاب شوند. مراحل ۲۶ تا ۲۹ انجام شود.

۳۰. i=i+1

۳۱. تا زمانی که تمام امپراطوری‌ها انتخاب شوند، مراحل ۲۵ تا ۳۱ انجام شود.

۳۲. تنظیم i=1

۳۳. انتخاب امپراطوری i ام

۳۴. اگر مستعمره‌ای در امپراطوری i ام وجود دارد که از استعمارگر خود هزینه کمتری داشته باشد، موقعیت مستعمره و استعمارگر تغییر کند.

۳۵. i=i+1

۳۶. تا زمانی که تمام امپراطوری‌ها انتخاب شوند، مراحل ۳۴ تا ۳۶ انجام شود.

۳۷. محاسبه قدرت تمام امپراطوری‌ها

۳۸. انتخاب ضعیف‌ترین امپراطوری

۳۹. اگر ضعیف‌ترین امپراطوری، مستعمره‌ای داشته باشد:

- انتخاب ضعیف‌ترین مستعمره این امپراطوری
- انتخاب یک امپراطوری توسط چرخه رولت
- تخصیص ضعیف‌ترین مستعمره به امپراطوری منتخب

۴۰. اگر ضعیف‌ترین امپراطوری، مستعمره‌ای نداشته باشد:

- انتخاب یک امپراطوری توسط چرخ رولت
- تخصیص امپراطوری ضعیف به امپراطوری منتخب

۴۱. Decade=Decade+1

۴۲. تا زمانی که نامساوی Decade < max decade برقرار است، مراحل ۱۴ تا ۴۲ انجام شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

۴۳. استعمارگر با کمترین میزان هزینه به عنوان بهترین پاسخ به حافظه سپرده شود.

۴۴. t=t+1

۴۵. تا زمانی که t برابر حداکثر مقدارش شود، مراحل ۳ تا ۴۵ انجام شود (در این مسئله حداکثر مقدار برابر ۴۸ است)

واحد LEM

در بازار برق، قیمت پیشنهادی و مقدار انرژی تولید شده/ مصرف شده توسط منابع تولید و مصرف‌کنندگان به اپراتور بازار اعلام می‌شود. انواع مختلف مناقصه از قبیل حراج تک سویه و حراج دو سویه در بازار برق پیشنهاد شده است [۷]. در حراج دو سویه، قیمت پیشنهادی و مقدار انرژی تولید شده و مصرف شده توسط منابع تولید و مصرف به اپراتور بازار ارسال می‌شود. مقدار انرژی تولید شده توسط تولیدکنندگان به شکل تابع پله‌ای به صورت صعودی بر اساس قیمت پیشنهادی آنها مرتب می‌شوند. همچنین مقدار انرژی مصرف شده توسط مصرف‌کنندگان به شکل تابع پله‌ای نزولی براساس قیمت پیشنهادی آنها مرتب می‌شوند. محل تقاطع این دو منحنی مقدار قیمت تسویه بازار (MCP) را مشخص خواهد کرد. در حراج تک سویه، قیمت پیشنهادی و مقدار انرژی تولید شده توسط تولیدکنندگان و تنها مقدار انرژی مصرف شده توسط مصرف‌کنندگان به اپراتور بازار ارسال می‌شود. محل تقاطع دو منحنی مشابه رویه توضیح داده شده برای حراج تک سویه مقدار MCP را ارائه می‌دهد. در واحد LEM پیشنهاد شده در این مقاله با استفاده از ساختار حراج یک سویه[1]، یک بازار انرژی محلی برای ریزشبکه تحت مطالعه معرفی شده است. این واحد به طور جامع در [۷] ارائه شده است.

ساختار شبکه تحت مطالعه

در شکل (۴) ساختار تک خطی ریزشبکه مرکز تحقیقات انرژی کاتالونیا نشان داده شده است. جزییات مربوط به مشخصه‌های این سیستم و نحوه پیکربندی منابع موجود در جدول (۱) ارائه شده است [۷].

اطلاعات مربوط به منابع تجدیدپذیر (PV و WT در این مطالعه) و توان مصرفی توسط NRLD نیز از [۷] اخذ شده است و در شکل‌های (۵-الف) تا (۵- ج) نشان داده شده است. همچنین در این شکل‌ها، مقدار توان بهینه تعیین شده توسط الگوریتم در هر بازه زمانی نشان داده شده است. قیمت پیشنهادی مربوط به تولیدکنندگان تجدیدپذیر، تجدید ناپذیر، RLD و جریمه ناشی از توان تأمین نشده در جدول (۲) ذکر شده‌اند [۷].

1) Single Sided Auction

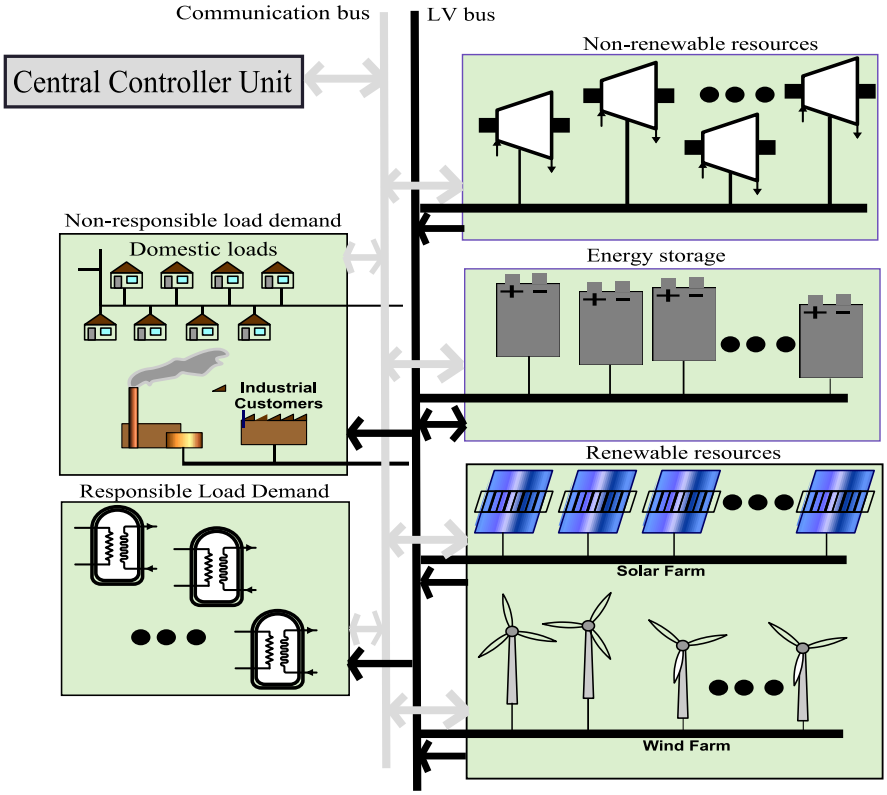
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده EMS-MICA_LEM به منظور نشان دادن قابلیت پاسخگویی سریع به وقوع هر رویدادی، سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده است. نهایتا این سناریوها بر روی ریزشبکه مرکز تحقیقات انرژی کاتالونیا به صورت عملی نیز آزمایش شده است. این سناریوها عبارتند از:

۱- سناریو ۱: فقط اطلاعات مربوط به بازه‌های زمانی یک ساعته به عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته شده است و عملکرد عادی سیستم بررسی شده است.

۲- سناریو ۲: افزایش قابل ملاحظه‌ای در بار اصلی رخ داده است (در دوره‌های زمانی ۱۷:۰۰-۱۷:۳۰ و ۱۸:۰۰-۱۸:۳۰).

۳- سناریو ۳: منابع تجدیدپذیر در بازه‌هایی دچار خطا شده و خاموشی اضطراری در این سیستم‌ها رخ داده است (در بازه‌های ۱۹:۳۰-۲۱:۰۰ برای سیستم WT و ۱۹:۳۰-۲۱:۰۰ برای سیستم PV).



شکل ٤) شمای کلی سیستم ریزشبکه تحت مطالعه

جدول ۱) مشخصه سیستم ریزشبکه تحت مطالعه

مولفه	سیستم ES با مشخصه Lithum-Ion و مدل SYNERION 24M					
پارامتر	ولتاژ (V)	ظرفیت نامی	ولتاژ شارژ کامل	ولتاژ دشارژ قطع	حداکثر جریان	حداکثر جریان

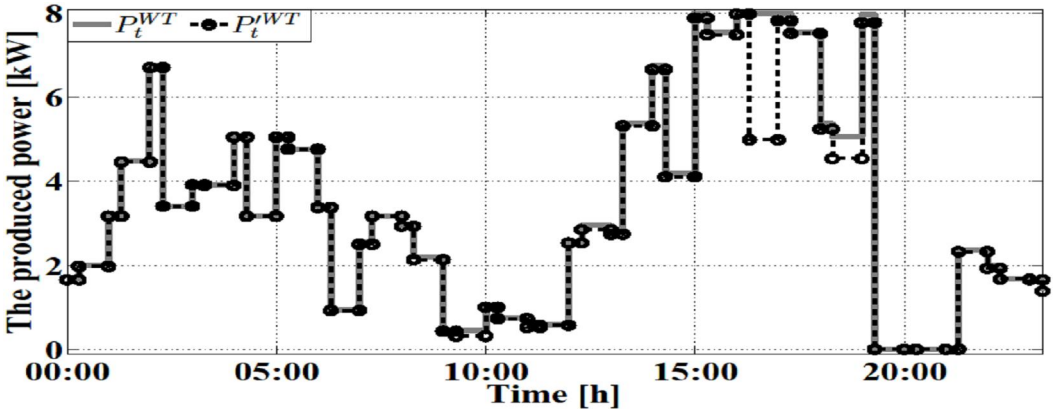
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

		(Ah) در ۲۵ درجه سانتیگراد	(V)	(V)	شارژ (A)	دشارژ (A)
نماد	V_t^{ES}	N^{ES}	V_{Float}	V_{Cutoff}	$\overline{I}^{ES,c}$	$\overline{I}^{ES,d}$
مقدار	۲۴	۸۴	۲۶	۲۱	۳٤	۱٦۰
پارامتر	حداکثر توان ES در طول فرایند شارژ (A)	حداکثر توان ES در طول فرایند دشارژ (kW)	حداکثر توان کانورتر (kW)	مقدار اولیه شارژ در ES (%)	حداکثر وضعیت شارژ ES (%)	حداقل وضعیت شارژ ES (%)
نماد	$\overline{P}^{ES,c}$	$\overline{P}^{ES,d}$	$\overline{P}^{ES}$	SOC_I^{ES}	$\overline{SOC}$	$\underline{SOC}$
مقدار	۰٫۸۱۶	۳٫۸۴	۴	۵۰	۸۰	۲۰
پارامتر	مقدار اولیه انرژی ذخیره شده در ES (kWh)	حداکثر انرژی ذخیره شده در ES (kWh)	حداقل انرژی ذخیره شده در ES (kWh)	ظرفیت کلی ES (kW)	ضریب راندمان شارژ (%)	
نماد	E_I^{ES}	$\overline{E}^{ES}$	$\underline{E}^{ES}$	E_{Tot}^{ES}	η_c	
مقدار	۱	۱٫۶۰۰	۰٫۴۰۳	۲	۹٦	
مولفه	**سیستم PV**		**سیستم WT**		**بار EWH**	
پارامتر	حداکثر توان لحظه‌ای (kW)	حداقل توان لحظه‌ای (kW)	حداکثر توان لحظه‌ای (kW)	حداقل توان لحظه‌ای (kW)	حداکثر توان مصرفی (kW)	
نماد	$\overline{P}^{PV}$	$\underline{P}^{PV}$	$\overline{P}^{WT}$	$\underline{P}^{WT}$	$\overline{P}^{EWH}$	
مقدار	۶	۰	۸	۰٫۴۵	۵	
مولفه	**سیستم MT**					
پارامتر	حداکثر توان لحظه ای (kW)	حداقل توان لحظه ای (kW)	زمان راه اندازی (min)	زمان خاموشی (min)	نرخ شیب بالارونده (kW)	نرخ شیب پایین رونده (kW)
نماد	$\overline{P}^{MT}$	$\underline{P}^{MT}$	T_{ON}^{MT}	T_{OFF}^{MT}	R_l	R_u
مقدار	۱۲	۰٫۲	۱۰	۱۰	۶	٦

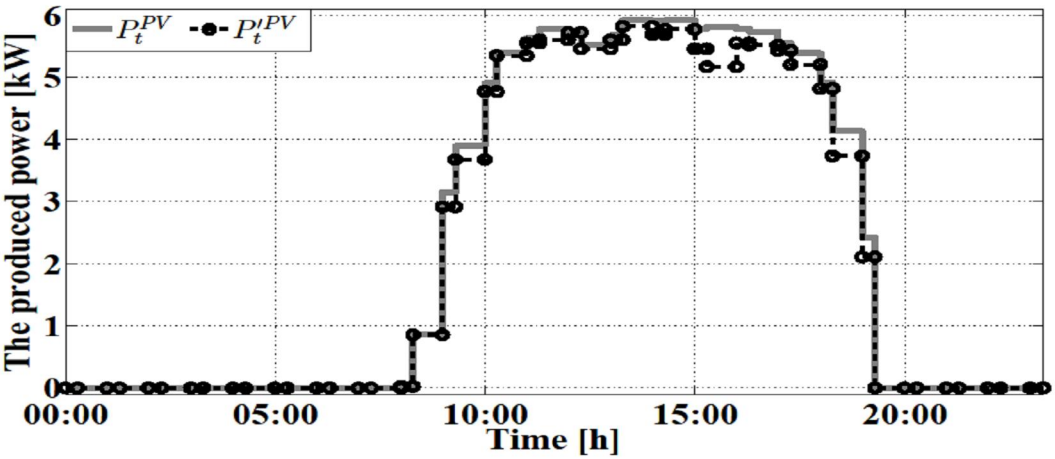
جدول ۲) قیمت پیشنهادی واحدهای تولید و مصرف‌کننده [€/kWh]

π^{DR}	π^{EGP}	π^{UP}	$\pi^{ES,c}$	$\pi^{ES,d}$	π^{MT}	π^{PV}	π^{WT}
۰٫۱۱۵	۰٫۱۰۵	۱٫۵	۰٫۱۲۵	۰٫۱٤۵	۰٫۱۵	۰٫۱	۰٫۰۸۳

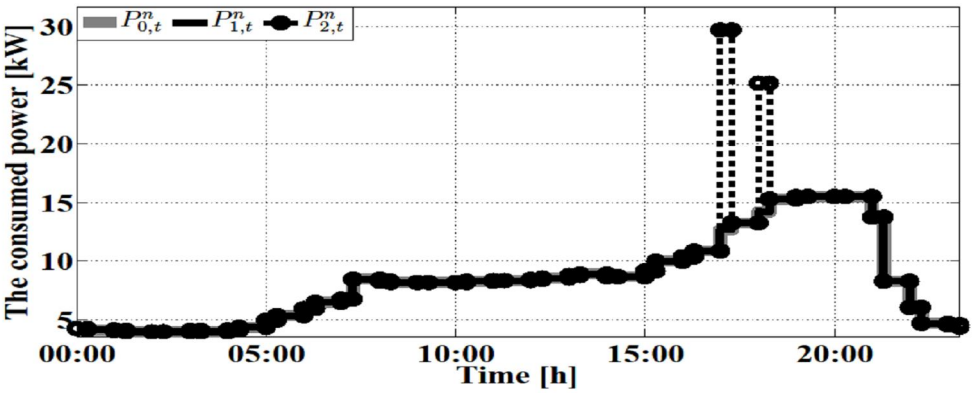
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]



شکل ۵-الف) توان تولید شده توسط منبع WT



شکل ۵-ب) توان تولید شده توسط منبع PV



شکل ۵-ج) منحنی تقاضای بار

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از ارزیابی عملی و شبیه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهاد شده در مقایسه با الگوریتم MCEMS_LEM بر روی ریزشبکه مرکز تحقیقات انرژی کاتالونیا ارائه شده است. در ادامه، به تحلیل هر یک از این خروجی‌ها پرداخته می‌شود.[۱]

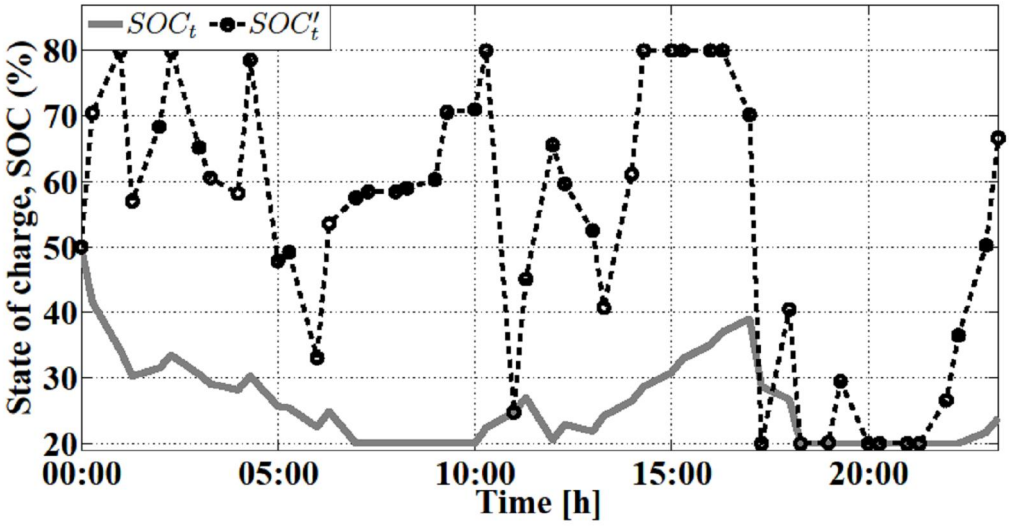
در شکل‌های (۶) و (۷) وضعیت شارژ باتری[۲] (SOC) و توان ES در هر دو الگوریتم MCEMS_LEM و EMS - MICA_LEM به ترتیب نشان داده شده است. در طول بازه زمانی ۰۰:۰۰ – ۰۶:۰۰ مقدار SOC در الگوریتم EMS-MICA_LEM تغییر چندانی نکرده است در صورتی که در الگوریتم MCEMS_LEM، SOC تقریبا همواره در حال کاهش است و در انتهای این بازه به حدود نصف مقدار اولیه خود رسیده است. در ۰۶:۰۰ – ۱۲:۰۰، تنها در ۱۷ درصد مواقع مقدار SOC در الگوریتم EMS-MICA_LEM کمتر از مقدار اولیه خود می‌باشد در صورتی که در الگوریتم MCEMS_LEM تنها در ۴۲ درصد مواقع بیشتر از حداقل مقدار خود است. در نتیجه، در این بازه زمانی قابلیت اطمینان سیستم در پشتیبانی از کل تقاضای بار در الگوریتم MCEMS_LEM به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است. در ۱۲:۰۰ – ۱۸:۰۰، مقدار SOC در الگوریتم EMS-MICA_LEM در ۴۲ درصد مواقع به حداکثر مقدار خود رسیده است که نشان از عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهاد شده در مدیریت انرژی ذخیره شده در ES دارد. نکته قابل ذکر این است که با توجه به وقوع سناریوی ۲، منابع تولید موجود قادر به تأمین کامل تقاضا نبوده و به ناچار باتری دشارژ شده و مقدار SOC در انتهای این بازه زمانی در هر دو الگوریتم به حداقل مقدار خود رسیده است. با وجود این که مقدار ES در الگوریتم بهینه‌سازی همواره با توان $\overline{P}^{EC_c}$ در حالت شارژ عمل می‌کند، در انتهای این بازه زمانی حداکثر مقدار SOC، به بیشتر از ۳۹٪ نرسیده است. در ۱۸:۰۰ – ۲۴:۰۰ که سناریو ۳ به وقوع می پیوندد، با وجود اینکه میکروتوربین با حداکثر توان خود وارد شده، SOC در هر دو الگوریتم به حداقل مقدار خود رسیده است. الگوریتم EMS - MICA_LEM بخش عمده‌ای از توان مازاد تولید شده[۳] (EGP) را صرف تغذیه ES نموده است به طوری که مقدار SOC در انتهای این بازه زمانی به حدود ۷۰ درصد رسیده است. این در حالی است که با وجود عملکرد ES در حالت شارژ در الگوریتم MCEMS_LEM، مقدار SOC در انتهای این بازه زمانی، حداکثر به حدود ۲۴ درصد رسیده است. این موضوع نشان دهنده پشتیبانی بهتر تقاضای بار توسط ES در الگوریتم بهینه‌سازی برای روز بعد خواهد بود.

---

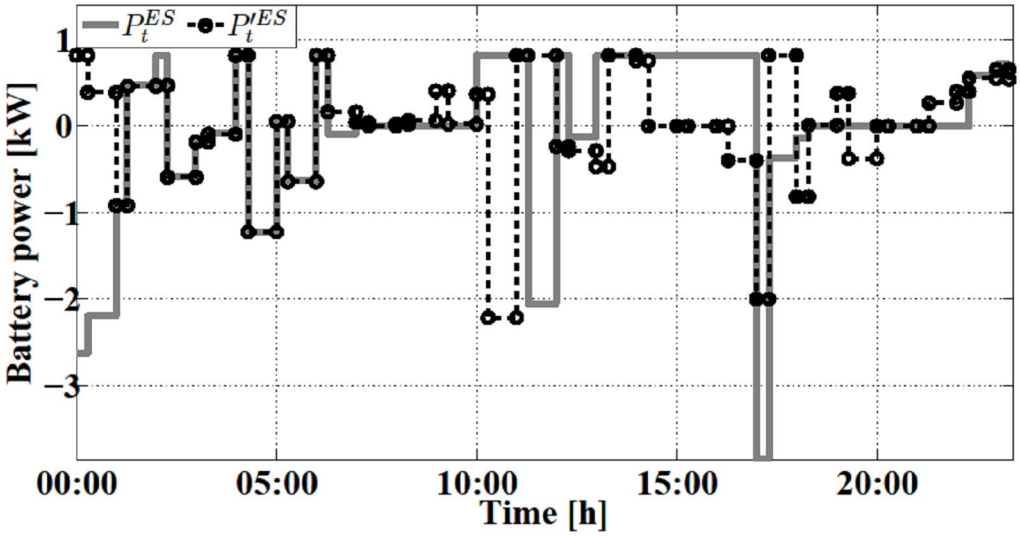
۱) برای تمامی شکل‌های ارائه شده در این مقاله، نمودارهای خط چین مربوط به الگوریتم EMS-MICA_LEM و نمودارهای با خط ممتد مربوط به الگوریتم MCEMS _LEM می‌باشد.

2) State Of Charge
3) Excess Generated Power

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]



شکل ٦) SOC در طول یک روز عملکرد سیستم

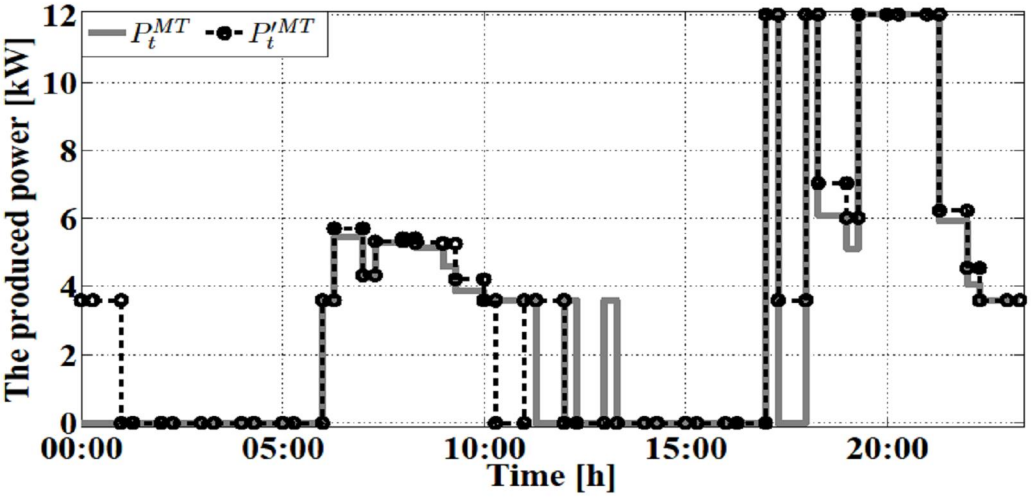


شکل ۷) پروفایل توان ES در طول عملکرد روزانه سیستم

در شکل (۸) نمودار توان MT نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود، در ۰۰:۰۰ – ۰۶:۰۰، MT در الگوریتم MCEMS_LEM تنها ۸/۳۳ درصد مواقع در سرویس بوده است. این در حالی است که با وجود بالابودن قیمت پیشنهادی MT نسبت به منابع تولید دیگر، در الگوریتم بهینه‌سازی ۲۵ درصد مواقع در سرویس بوده است و علاوه بر تأمین بخشی از تقاضای بار مورد نیاز، EGP را صرف تغذیه ES و DR می‌کند و سبب کاهش قیمت برق مصرفی می‌شود. در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

۰۶:۰۰ – ۱۲:۰۰، در الگوریتم بهینه‌سازی، MT در ۱۷ درصد مواقع خارج از سرویس بوده در حالی که در الگوریتم MCEMS_LEM مقدارش در حدود ۸/۳ درصد است.



شکل ۸) پروفایل توان MT در طول عملکرد روزانه ریزشبکه

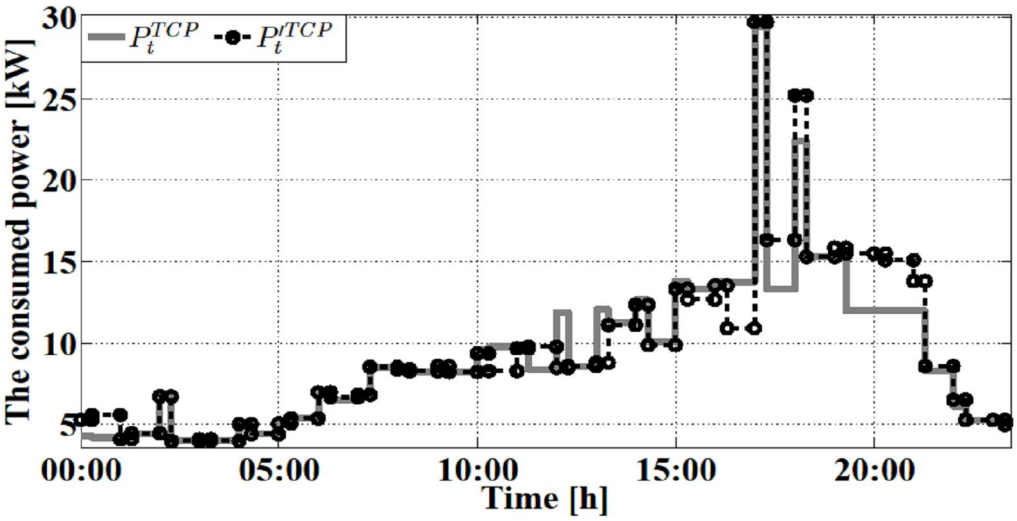
هرچند MT در این بازه زمانی عمدتا در سرویس است، ولی بیشتر توان تولیدی توسط آن، صرف تغذیه توان مورد نیاز NRLD شده و بخش کوچکی از آن صرف تغذیه ES و DR شده است. در ۱۲:۰۰ – ۱۸:۰۰ سناریو ۲ به وقوع پیوسته است. در زمان وقوع این سناریو، مقدار متوسط MCP در الگوریتم EMS-MICA_LEM ($\lambda_t'^{MCP}$) در حدود ۲۹ درصد کمتر از مقدار متوسط MCP در الگوریتم MCEMS_LEM (λ_t^{MCP}) است. لذا تولید توان توسط MT با حداکثر ظرفیت نه تنها باعث افزایش هزینه کلی تولید نشده است، بلکه باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در قیمت برق مصرفی در این بازه‌های زمانی شده است. در ۱۸:۰۰ – ۲۴:۰۰، وضعیت MT در هر دو الگوریتم دارای الگوی مشابه‌ای است. با توجه به وقوع سناریوی ۳ در این بازه زمانی و در نتیجه از سرویس خارج شدن منابع غیرقابل‌کنترل، به ناچار MT بایستی با $\overline{P}^{MT}$ وارد سرویس شود. همان طوری که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مقدار متوسط $\lambda_t'^{MCP}$ در حدود ۲۵ درصد کمتر از مقدار متوسط λ_t^{MCP} در این بازه زمانی است. این بدین معنی است که با وجود حضور MT، مصرف‌کنندگان با قیمت توان پایین‌تری تغذیه شده‌اند.

کل توان مصرفی[1] (TCP) توسط مصرف‌کنندگان در شکل (۹) نشان داده شده است. در بازه‌های زمانی که مقادیر توان

1) Total consumed power

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

مصرفی در الگوریتم MCEMS_LEM (P_t^{TCP}) و در الگوریتم EMS-MICA_LEM ($P_t'^{TCP}$) با یکدیگر برابر هستند، مقدار متوسط $\lambda_t'^{MCP}$ در حدود ۳۵ درصد کمتر از مقدار متوسط λ_t^{MCP} است.



شکل ۹) کل توان مصرف شده توسط مصرف‌کنندگان در طول عملکرد روزانه سیستم

در نتیجه، مصرف‌کنندگان در الگوریتم EMS - MICA_LEM با قیمت برق پایین‌تری تغذیه می‌شوند. در بازه‌هایی که مقدار $P_t'^{TCP}$ بزرگتر از P_t^{TCP} است، مقدار متوسط $\lambda_t'^{MCP}$ در حدود ۳۶ درصد کوچکتر از مقدار متوسط λ_t^{MCP} است. بنابراین، تحت چنین شرایطی نیز تغذیه مصرف‌کنندگان، با قیمت برق پایین‌تری انجام می‌شود. به دلیل پایین بودن $\lambda_t'^{MCP}$، الگوریتم EMS-MICA_LEM بیشتر EGP را صرف تغذیه DR نموده است. همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود، گاهی مقدار $P_t'^{TCP}$ کوچکتر از P_t^{TCP} شده است که دلیل آن تغذیه DR در این بازه زمانی بوده است. از آنجایی که در بازه زمانی ۰۶:۰۰ – ۱۲:۰۰، λ_t^{MCP} در حدود ۴۶ درصد بزرگتر از مقدار متوسط آن است، لذا انتخاب این بازه زمانی برای تغذیه DR توسط الگوریتم MCEMS_LEM نامناسب است. مواقعی نیز مقدار MCP بزرگتر از مقدار متوسط آن در کل بازه زمانی است. تحت این شرایط بهتر است الگوریتم پیشنهادی با استفاده از DR به دنبال کاهش مصرف‌کنندگان خود باشد.

بارگراف توان ES در طول حالت‌های شارژ و دشارژ، EWH، DR، UP و EGP در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به اینکه در الگوریتم بهینه‌سازی، ES با توان کمتری دشارژ شده است، لذا تغییر نمودار SOC در این الگوریتم به مراتب مناسب‌تر از نتایج بدست آمده در الگوریتم MCEMS_LEM است. همچنین در الگوریتم MCEMS_LEM در بازه های زمانی ۰۶:۰۰ – ۱۲:۰۰و ۱۲:۰۰ – ۱۸:۰۰ (به غیر از ساعت ۱۱:۳۰) از ES برای تأمین تقاضای بار استفاده نشده

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

و ES در حالت شارژ عمل نموده است. با توجه به بالا بودن مقدار متوسط λ_t^{MCP} در این دو بازه زمانی، شارژ ES در این شرایط باعث افزایش قیمت تمام شده برای تولید توان خواهد شد. در ۰۶:۰۰ – ۱۲:۰۰ که مقدار متوسط $\lambda_t'^{MCP}$ مناسب است، الگوریتم EMS-MICA_LEM بیشتر از بازه‌های زمانی دیگر به شارژ ES می پردازد. لذا تغذیه ES که یکی از مصرف‌کنندگان بوده، با هزینه کمتری انجام شده است.

در ۰۰:۰۰ – ۰۶:۰۰، در الگوریتم MCEMS_LEM تنها ۱۴ درصد از EGP برای تغذیه DR استفاده شده و بقیه آن صرف تغذیه ES شده است. در حالی که مشارکت DR در الگوریتم EMS-MICA_LEM به ۲۹ درصد رسیده است. با وجود بالاتر بودن قیمت پیشنهادی شارژ ES نسبت به تغذیه DR، با توجه به مقدار پایین MCP در این بازه زمانی، الگوریتم بهینه‌سازی انتخاب مناسبی برای تأمین تغذیه بارهای خود نموده است. در الگوریتم بهینه‌سازی ۳۳/۳۳ درصد بار DR در ۰۰:۰۰ – ۰۶:۰۰ که مقدار متوسط MCP حداقل است، تغذیه شده است. بدین معنی است که مقدار باری که در ساعت‌های وقوع سناریوهای اعمال شده (مقدار متوسط $\lambda_t'^{MCP}$ بالاتر) قطع شده‌اند، در ساعت‌های دیگری که مقدار MCP در حدود ۵۸ درصد کمتر است، تغذیه شده است. در بازه زمانی ۰۶:۰۰ – ۱۲:۰۰، سهم مشارکت DR و ES در الگوریتم MCEMS_LEM برابر یکدیگر است ولی الگوریتم بهینه‌سازی، بیشتر EGP صرف شارژ ES شده است.

در ۱۲:۰۰ – ۱۸:۰۰ (زمان وقوع سناریوی ۲)، مقدار P_t^{UP} در هر دو الگوریتم افزایش محسوسی نموده است ولی در ساعت (۱۷:۰۰) مقدار P_t^{UP} در الگوریتم بهینه‌سازی نسبت به الگوریتم MCEMS_LEM بیشتر است. دلیل این امر آن است که ES با توان $\overline{P}^{EC_d}$ دشارژ شده و مقدار SOC به حداقل مقدار خود رسیده است. همچنین MT نیز با توان $\overline{P}^{MT}$ وارد مدار شده است. با این وجود، الگوریتم نتوانسته کل تقاضای NRLD را برآورده نماید. این در حالی است که در این ساعت (۱۷:۰۰) مقدار $\lambda_t'^{MCP}$ در حدود ۲۶ درصد کمتر از مقدار λ_t^{MCP} است. در نتیجه، علاوه بر تأمین مصرف‌کنندگان با MCP به مراتب کمتر، مقدار هزینه جریمه[1] ناشی از توان تأمین نشده، نیز توسط الگوریتم EMS-MICA_LEM کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است.

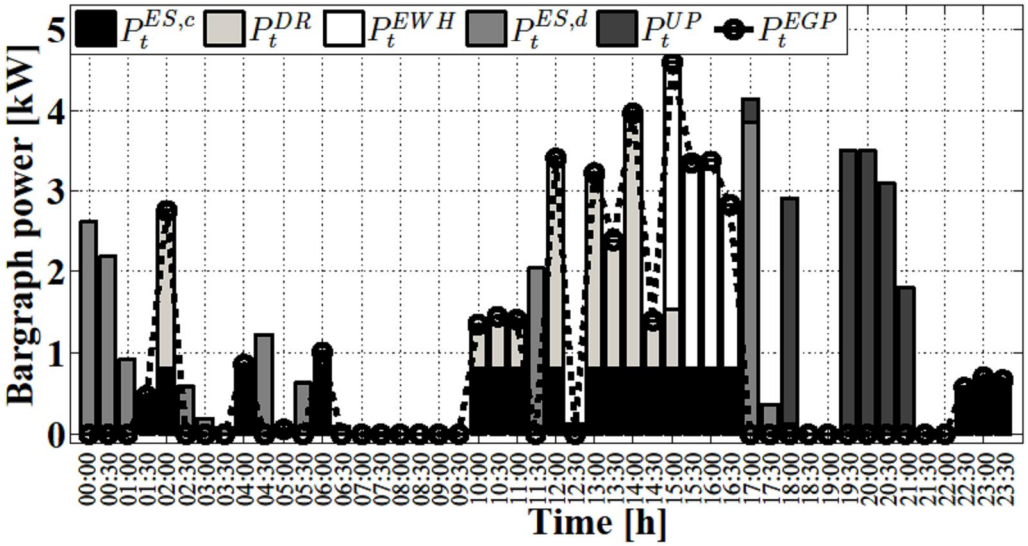
منحنی MCP برای هر دو الگوریتم در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مقدار متوسط MCP نیز برای بازه‌های زمانی مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. متوسط مقدار MCP در طول عملکرد روزانه سیستم در الگوریتم بهینه‌سازی نسبت به الگوریتم MCEMS_LEM در حدود ۳۷ درصد کمتر است. حداقل مقدار λ_t^{MCP} برابر (€/kWh) ۰,۲ است که در حدود ۳۵ درصد بزرگتر از حداقل مقدار MCP در الگوریتم بهینه‌سازی است. حداقل مقدار MCP در الگوریتم بهینه‌سازی در بازه زمانی ۰۰:۰۰ – ۰۶:۰۰ است. بنابراین، در این بازه زمانی بهترین انتخاب تغذیه بارهای DR است. همان طوری که در

1) Penalti cost

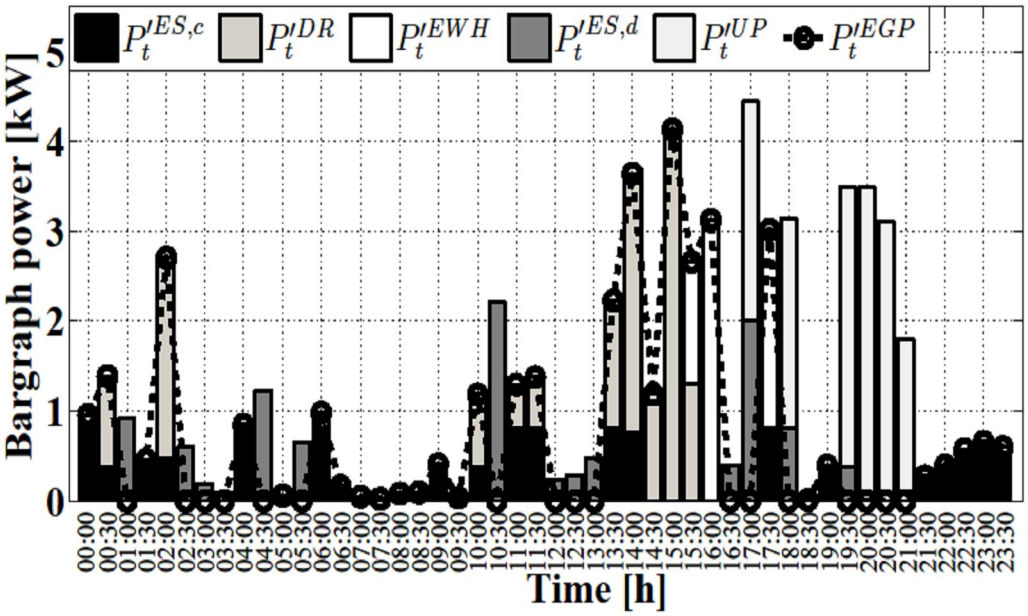
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، در این بازه زمانی الگوریتم بهینه‌سازی نسبت به الگوریتم MCEMS_LEM عمدتا به تغذیه DR و شارژ ES پرداخته است. درنتیجه، این مصرف کنندگان با قیمت کمتری تغذیه شده‌اند. در این بازه زمانی ES عمدتا با توان $\overline{P}^{ES_c}$ شارژ شده است بجز زمانی که SOC به حداکثر مقدار خود رسیده است که به ناچار بقیه EGP صرف تغذیه DR شده است. در بازه زمانی ۰۶:۰۰ – ۱۲:۰۰ از آنجایی که MT در هر دو الگوریتم وارد سرویس شده است و با توجه به اینکه قیمت پیشنهادی آن بالاتر از منابع تولید دیگر است، لذا MCP افزایش پیدا کرده است. بنابراین، منطقی است که با توجه به افزایش قیمت برق، مقدار RLD و ES کمتری توسط الگوریتم بهینه‌سازی تغذیه شود. با تحلیل‌های انجام شده، مشخص شده است که در حدود ۸۵ درصد مقدار توان کمتری برای تغذیه RLD و ES استفاده شده است که نشاندهنده عملکرد بسیار مناسب الگوریتم پیشنهادشده در مدیریت سمت مصرف کنندگان است. همان طوری که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در طول دوره وقوع سناریوهای ۲ و ۳، اختلاف فاحشی در مقدار MCP در هر دو الگوریتم وجود دارد. با این وجود، مقدار TCP در هر دو الگوریتم با یکدیگر برابر هستند که نشان دهنده تغذیه یکسان بار در هر دو الگوریتم ولی با قیمت پایین‌تر در الگوریتم بهینه‌سازی است. در بازه زمانی ۱۸:۰۰ – ۲۴:۰۰، مقدار متوسط MCP در هر دو الگوریتم حداکثر بوده، حداکثر مقدار λ_t^{MCP} برابر (€/kWh) ۱٫۳۳ می باشد که در حدود ۲۶ درصد بزرگتر از حداکثر مقدار MCP در الگوریتم بهینه‌سازی است. این موضوع در ساعت ۱۸:۰۰ رخ داده است که زمان وقوع سناریوی ۲ است. تحت چنین شرایطی، الگوریتم بهینه‌سازی بارهای با قیمت پیشنهادی کمتر را تغذیه می‌کند. با تحلیل‌های صورت گرفته، مقدار هزینه کلی تولید الکتریسیته در الگوریتم بهینه‌سازی به اندازه ۳۱ درصد نسبت به الگوریتم MCEMS_LEM کاهش پیدا کرده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]



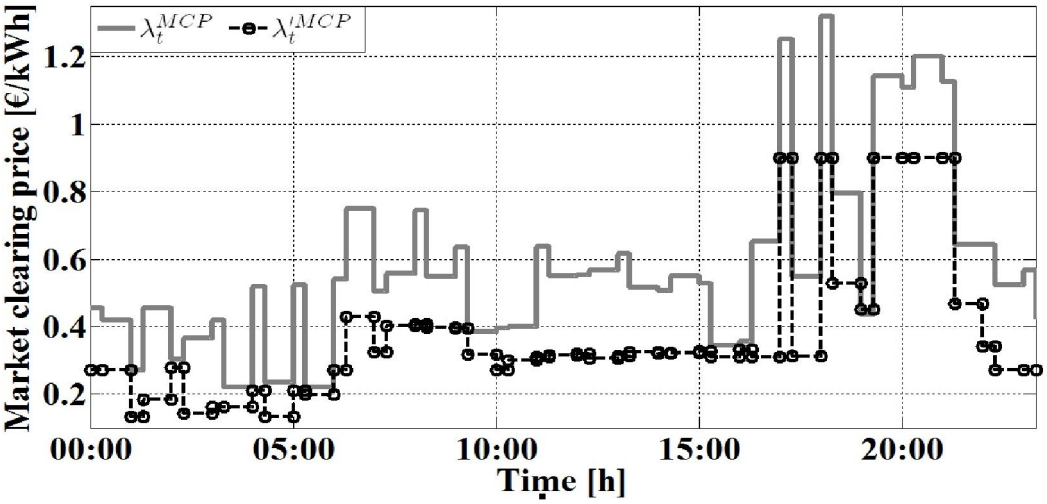
الف) الگوریتم MCEMS_LEM



ب) الگوریتم EMS-MABC_LEM

شکل ۱۰) بارگراف مربوط به توانهای بارهای قابل‌قطع، دشارژ باطری و UP در طول ۲۴ ساعت از عملکرد سیستم

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]



شکل ۱۱) MCP در طول عملکرد روزانه سیستم

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

جدول ۳) مقدار متوسط MCP در هر دوره ٦ ساعته عملکرد سیستم

MCP	۰۰:۰۰ –۰۶:۰۰	۰۶:۰۰ –۱۲:۰۰	۱۲:۰۰ –۱۸:۰۰	۱۸:۰۰ –۲۴:۰۰
λ_t^{MCP}	۰,۴۱	۰,۵۶	۰,۴۹	۰,۶۲
$\lambda_t'^{MCP}$	۰,۲۰	۰,۳۲	۰,۳۲	۰,۴۷

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید به نام الگوریتم رقابت استعماری چند بعدی جهت حداقل‌سازی هزینه تولید توان در یک ریزشبکه پیشنهاد و پیاده‌سازی شده است. الگوریتم MICA بر پایه سازوکار جستجوی محلی با ایجاد جمعیت اولیه‌ای، با توجه به قیود مطرح شده در این مسئله پایه‌گذاری شده است. الگوریتم پیشنهاد شده همچنین بر روی ریزشبکه مرکز تحقیقات انرژی کاتالونیا به صورت عملی آزمایش شده و نتایج بدست آمده از آن با نتایج حاصل از الگوریتم MCEMS_LEM مقایسه شده است. برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهاد شده، چندین سناریو اعمال و نتایج شبیه‌سازی و عملی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

نتایج عددی نشاندهنده این است که الگوریتم پیشنهاد شده نه تنها دارای کارایی بهتری نسبت به الگوریتم بدون بهینه‌سازی است، بلکه همچنین پایداری دینامیک و همگرایی شگرفی بین کشورهای مستعمره را نشان می‌دهد. الگوریتم پیشنهاد شده مجموعه‌ای از راه حل‌های بهینه را به دست می‌آورد، به نحوی که شرایط مندرج در قیود فنی را به طور کامل برآورده می‌نماید. این راه‌حل‌ها به اپراتورها مطابق با ملاحظه‌های اقتصادی و قیود فنی مطرح شده، گزینه‌های مختلفی را برای انتخاب یک طرح توزیع توان مناسب پیشنهاد می‌دهد. بعلاوه، نتایج نشاندهنده این است که الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهاد شده می‌تواند راه‌حل‌هایی خوش بینانه، مطمئن و با قطعیت بالا در یک زمان شبیه‌سازی قابل قبول برای مسائل مربوط به EMS، فراهم نماید. همچنین کاهش هزینه ۳۱ درصدی تولید توان در الگوریتم بهینه‌سازی نسبت به الگوریتم MCEMS_LEM قابلیت استفاده موثر روش پیشنهاد شده در سیستم‌های مبتنی بر ریزشبکه‌های مستقل از شبکه را بیان می‌نماید.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

منابع

[1] Alonso M., Amaris H. and Alvarez-Ortega C., 2012. "Integration of renewable energy sources in smart grids by means of evolutionary optimization algorithms", Expert Systems with Applications, VOL. 39, PP. 5513–5522.

[2] Anvari Moghaddam A., Seifi A. and Niknam T., 2012. "Multi-operation management of a typical micro-grids using Particle Swarm Optimization: A comparative study", Renewable and Sustainable Energy Reviews ,VOL. 16, PP. 1268– 1281.

[3] Atashpaz-Gargari E. and Lucas C., 2007. "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation, VOL. 7, PP. 4661–4666.

[4] Coelho L.D.S., Afonso L.D. and Alotto P., 2012. "A modified imperialist competitive algorithm for optimization in electromagnetics", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 48, PP. 579-582.

[5] Khodr H.M., Halabi N.El. and García-Gracia M., 2012. "Intelligent renewable microgrid scheduling controlled by a virtual power producer: A laboratory experience", Renewable Energy, VOL. 48, PP. 269-275.

[6] Kwag H. and Kim J., 2012. "Optimal combined scheduling of generation and demand response with demand resource constraints", Applied Energy, VOL. 96, PP. 161–170.

[7] Marzband M., Sumper A., Ruiz-Álvarez A., Domínguez-García J. L. and Tomoiag˘a B., 2013. "Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone microgrids in day-ahead markets", Applied Energy, VOL. 106 ,PP. 365 – 376.

[8] Marzband M., Sumper A., Domínguez-García J. L. and Gumara-Ferret R, 2013. "Experimental Validation of a Real Time Energy Management System for Microgrids in Islanded Mode Using a Local Day-Ahead Electricity Market and MINLP", Energy Conversion and Management, VOL. 76 , PP. 314-322.

[9] Moghaddam A. A., Seifi A., Niknam T. and Alizadeh Pahlavani M.R. 2011. "Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source", Energy, VOL. 36 ,PP. 6490-6507.

[10] Mohamed F. A. and Koivo H.N., 2012. "Multiobjective optimization using Mesh Adaptive Direct Search for power dispatch problem of microgrid", Electrical Power and Energy Systems, VOL. 42, PP. 728–735.

[11] Mohammadi M., Hosseinian S.H. and Gharehpetian G.B., 2012. "GA-based optimal sizing of microgrid and DG units under pool and hybrid electricity markets", Electrical Power and Energy Systems, VOL. 35, PP. 83–92.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]

[12] Mousavi S. M., Tavakkoli-Moghaddam R., Vahdani B., Hashemi H. and Sanjari M. J., 2013. "A new support vector model-based imperialist competitive algorithm for time estimation in new product development projects", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, VOL. 29, PP. 157–168.

[13] Naraharisetti P. K., Karimi I. A., Anand A. and Lee D., 2011. "A linear diversity constraint - Application to scheduling in microgrids", Energy, VOL. 36. PP. 4235-4243.

[14] Nazari-Shirkouhi S., Eivazy H., Ghodsi R., Rezaie K. and Atashpaz-Gargari E., 2010. "Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the Imperialist Competitive Algorithm", Expert Systems with Applications, VOL. 37, PP. 7615–7626.

[15] Quiggin D., Cornell S., Tierney M. and Buswell R., 2012. "A simulation and optimisation study: Towards a decentralised microgrid, using real world fluctuation data", Energy, VOL. 41, PP. 549-559.

[16] Rashtchi V., Rahimpour E. and Shahrouzi H., 2012. "Model reduction of transformer detailed R-C-L-M model using the imperialist competitive algorithm", IET Electric Power Applications, VOL. 6, PP. 233–242.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-31]