

# مدیریت بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای قابل کنترل در ریزشبکه هوشمند

حدیث پوراصغرخمایی، محمدحسین جاویدی دشت بیاض

آزمایشگاه تجدید ساختار و مطالعات سیستم

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

hadis.pourasghar@stu-mail.um.ac.ir

t, h : واحد زمان (ساعت)

i : واحد شمارش تولیدات پراکنده

Df, De : بار مصرفی اولیه و بار قابل ارتجاع ثانویه

Pr : قیمت برق پیشنهادی به مصرف‌کننده

Pr,max : حد بالای قیمت پیشنهادی به مصرف‌کننده

Pf : قیمت برق تعرفه ثابت

Ps, Pb : قیمت فروش و خرید برق از شبکه توزیع

Pgrid,s, Pgrid,b : توان فروخته‌شده و توان خریداری‌شده از شبکه

Pgrid,max : حداکثر ظرفیت پست توزیع

C : هزینه توان تولیدی توسط واحدهای تولید پراکنده

a, b, c : ضرایب هزینه واحدهای تولید پراکنده

Cdn, Cup : هزینه راه‌اندازی یا خاموش کردن واحد

Pgen : توان تولیدی واحدهای تولید پراکنده

S : وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد

Up, Dn : متغیرهای کنترلی روشن یا خاموش کردن واحد

e : کشش تقاضا

RES : مجموع توان تولیدی بادی و خورشیدی

چکیده — در سال‌های اخیر، افزایش علاقه‌مندی به گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر به صورت تولیدات پراکنده و در مقیاس کوچک، منجر به ظهور ریز شبکه‌های هوشمند شده است. در این مقاله، ساختاری دوسطحی برای سیستم مدیریت انرژی، با هدف پیشینه‌سازی سود بهره‌برداری و کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از خطای پیش‌بینی، ارائه شده است. مدیریت هم‌زمان منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای قابل کنترل، می‌تواند به افزایش نفوذ انرژی‌های پاک در شبکه کمک کند. پاسخگویی بار به صورت غیرمستقیم و از طریق ارسال قیمت برق ساعتی به مصرف‌کنندگان، انجام می‌شود. با اجرای این برنامه، الگوی قیمت برق ۲۴ ساعت آینده برای ارسال به مصرف‌کنندگان، میزان توان خریداری‌شده از شبکه‌ی توزیع یا فروخته‌شده به آن و وضعیت منابع تولید پراکنده در هر ساعت، تعیین می‌شود. مدل پیشنهادی به صورت یک مسئله‌ی غیرخطی عدد صحیح مختلط تعریف و به کمک الگوریتم تجزیه‌ی بندرز حل شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، عملکرد مؤثر سیستم مدیریت انرژی را در کنترل عدم قطعیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش سود بهره‌برداری، نشان داده و در عین حفظ امنیت و تداوم برق‌رسانی، امکان افزایش نفوذ این منابع در شبکه را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی — سیستم مدیریت انرژی؛ ریزشبکه هوشمند؛ منابع

انرژی تجدیدپذیر؛ پاسخگویی بار؛ تجزیه بندرز

اختصارات

Pgen,max , Pgen,min : حداکثر و حداقل ظرفیت تولیدی

SR : رزرو چرخان

Rup ,Rdn : نرخ شیب رو به بالا و پایین

Mup ,Mdn : حداقل زمان روشن یا خاموش بودن

## ۱. مقدمه

امروزه صنعت برق در سراسر جهان با چالش‌های بی‌شماری، نظیر تأمین انرژی مورد نیاز، آلودگی‌های زیست‌محیطی، توسعه و گسترش بهی نه سرمایه‌های گران‌قیمت، حفظ امنیت و قابلیت اطمینان شبکه، مواجه است [1]. سهم تولید برق در انتشار گازهای گلخانه‌ای ۲۴٪ می‌باشد. پیش‌بینی شده‌ها سال ۲۰۳۰، برق مصرفی در جهان، ۷۷٪ افزایش یافته و متعاقباً، انتشار گاز دی‌اکسید کربن نیز به ۴۵.۵ بیلیون تن برسد [2]. بنابراین، کاهش مؤثر در انتشار گاز کربن، بدون مشارکت صنعت برق، امکان‌پذیر نخواهد بود. از سوی دیگر، ذخایر سوخت‌های فسیلی نظیر نفت، گاز و زغال‌سنگ نیز به‌سرعت کاهش یافته و رو به اتمام است. شرایط پیش روی، دانشمندان را به اتخاذ استراتژی‌های نوین در تأمین انرژی، نظیر توسعه‌ی شبکه هوشمند با بهره‌وری بالا و جایگزینی نیروگاه‌های سوخت فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر، واداشته است [3].

انرژی‌های پاک (آب، باد، خورشید و...) می‌توانند تأثیر قابل توجهی در کاهش گازهای گلخانه‌ای داشته و همچنین، از وابستگی به سوخت‌ها ی فسیلی بکاهند. این منابع برخلاف سوخت‌ها ی فسیلی، پایا ن‌پذیر بوده و در تمام نقاط جهان، قابل دسترسی هستند. بعلاوه، هزینه‌ی تولید برق توسط این منابع بسیار ناچیز بوده و درنهایت، منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه می‌شوند. ساخت، نصب و راه‌اندازی واحدهای تولید بادی و خورشیدی در مقایسه با نیروگاه‌های مرسوم، می‌تواند در مدت‌زمان بسیار کوتاه‌تر ی انجام پذیرد [4].

کلیه‌ی این عوامل در کنار هم، منجر به رشد بی‌سابقه‌ای در گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. ولیکن افزایش نفوذ این منابع در مقیاس و حجم بالا، به علت ماهیت غیردائمی و متناوب، بهره‌برداری را با عدم قطعیت‌های متعددی روبه‌رو ساخته و بر پایداری، امنیت و قابلیت اطمینان شبکه اثرات منفی می‌گذارد [5]. به همین علت در گام اول، بهره‌بردار به انواع مختلفی از خدمات جانبی برای حفظ تعادل بار و تولید، نیازمند خواهد شد. افزایش نیاز به خدمات جانبی نظیر رزرو چرخان، ردگیری بار، تنظیم

فرکانس و نرخ شیب<sup>۱</sup> بیشتر، از جمله مهم‌ترین مشکلات این منابع بوده و عملاً بر هزینه‌های بهره‌برداری افزایش می‌دهد. همچنین، در برخی موارد در اثر اضافه‌تولید واحدهای بادی و کمبود بار مصرفی، بهره‌بردار ناچار به قطع اجباری و خارج کردن این منابع از شبکه است [6]. عدم تطابق و هماهنگی بین پیک تولید و پیک مصرف یکی دیگر از مشکلات اساسی می‌باشد. به‌طورکلی، ضریب همبستگی<sup>۲</sup> بین بار مصرفی و تولید بادی منفی است. این امر منجر به کمبود انرژی در ساعات پیک‌بار و اضافه‌تولید در ساعات غیر پیک می‌شود [7]. این نکته به‌روشنی بیانگر عدم استفاده‌ی بهینه از ظرفیت نصب‌شده و هدر رفت حجم بالایی از توان تولیدی است.

اجرای صحیح برنامه‌های پاسخگویی بار و تعرفه‌های متغیر بازمان، می‌تواند به تطبیق الگوی مصرف و تولید کمک کند. بارهای انعطاف‌پذیر و قابل انتقال، برای منابع انرژی تجدیدپذیر که ذاتاً متغیر، نوسانی و غیردائمی هستند، مکمل‌های ایده‌آلی محسوب می‌شوند. بنابراین، می‌توان عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر را از طریق برنامه‌های پاسخگویی بار و مدیریت مصرف، تا حدی جبران نمود. هوشمندسازی شبکه، بستری مناسب برای پیاده‌سازی فراگیر برنامه‌های پاسخگویی بار و تسهیل مشارکت بخش خانگی در آن، فراهم نموده است [8].

در سال‌های اخیر، افزایش علاقه‌مندی به استفاده از انرژی‌های نو به‌صورت تولیدات پراکنده و در مقیاس کوچک، منجر به ظهور ریزشبکه‌های هوشمند شده است. ریزشبکه، یک شبکه کوچک و ولتاژ ضعیف، متصل به پست توزیع یا فوق توزیع و متشکل از انواع منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و بارهای قابل کنترل<sup>۳</sup> می‌باشد [9]. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های ریزشبکه، قابلیت بهره‌برداری در دو حالت متصل به شبکه و منفصل از آن است. با توجه به اهمیت موضوع، مقالات متعددی در زمینه‌ی مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها، باهدف گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر، ارائه شده است [10,11].

در مرجع [12]، نویسنده یک سیستم چندعامله<sup>۴</sup> برای پیشینه‌سازی سود حاصل از بهره‌برداری از ریزشبکه، ارائه می‌دهد. مسئله در دو حالت، برنامه‌ریزی برای روز بعد و برنامه‌ریزی لحظه‌ای با بازه‌ی زمانی ۵ دقیقه، پیاده‌سازی شده و وضعیت تولیدات پراکنده، ذخیره‌ساز و بارهای قابل انتقال، تعیین شده است. مرجع [13]، یک روش کنترل<sup>۳</sup> دوسطحی برای مدیریت انرژی ریزشبکه دارای حجم بالایی از منابع تجدیدپذیر، پیشنهاد می‌دهد. در

<sup>1</sup>Ramp rate

<sup>2</sup>Correlation

<sup>3</sup>Multi-agent system

## ۲. مدل پیشنهادی برای مدیریت انرژی ریزشبه

مدلی متشکل از دو لایه کنتری برای مدیریت انرژی ریزشبه، پیشنهاد شده است. با توجه به هزینه بسیار ناچیز بهره‌برداری از انرژی‌های بادی و خورشیدی، هدف تأمین حداکثر بار مصرفی از طریق این منابع است. لایه اول، مربوط به ارائه یک برنامه بهره‌برداری اساسی مقادیر پیش‌بینی شده برای روز بعد و لایه دوم، مربوط به اصلاح خطای پیش‌بینی و برنامه‌ریزی مجدد در طول روز است. در برنامه‌ریزی روز بعد، هدف بیشینه کردن سود بهره‌بردار با در نظر گرفتن قیود مربوط به تبادل توان با شبکه‌ی بالادست، تعادل توان تولیدی و مصرفی، میزان رزرو چرخان موردنیاز و محدودیت‌های منابع تولید پراکنده، شامل حداکثر و حداقل ظرفیت تولیدی، نرخ شیب افزایش و کاهش توان، حداقل زمان خاموش بودن، حداقل زمان روشن ماندن، هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن واحدها، می‌باشد.

بار مصرفی در این روابط با استفاده از کشش<sup>۹</sup> تقاضا، به صورت تابعی از قیمت برق در نظر گرفته شده است [18]. از این رو، بهره‌بردار (مالک یا مدیر ریزشبه) می‌تواند با پیش‌بینی میزان تقاضا، توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و قیمت برق در شبکه‌ی بالادست، برنامه‌های مناسبی برای اجرای پاسخگویی بار ارائه کرده و به الگوی بار مصرفی، به نحوی که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر محلی حداکثر شود، شکل دهد [19]. برخلاف تحقیقات پیشین، که انتقال بار عموماً به صورت مستقیم از سوی بهره‌بردار در نظر گرفته شده بود، در این مقاله، کنترل بار تنها از طریق ارسال قیمت ساعتی برق<sup>۱۰</sup> به مصرف‌کنندگان و کنترل غیرمستقیم (بر پایه‌ی قیمت) صورت می‌گیرد [20]. کلیدی خانه‌ها و لوازم برقی خانگی، هوشمند و مجهز به سیستم مدیریت انرژی، فرض شده‌اند. بدین ترتیب، بدون نیاز به مداخله‌ی مستقیم مصرف‌کننده، عمل پاسخگویی بار به طور خودکار بر اساس برنامه و تنظیمات از پیش تعیین شده، قابل اجرا می‌باشد [21]. تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده که پتانسیل موجود در بخش خانگی را اثبات می‌کند. همچنین، راهکارهای بسیاری برای شناسایی انواع بارهای قابل کنترل، در نظر گرفتن سطح رفاه مصرف‌کننده و نحوه‌ی الویت بندی بار از سوی او ارائه شده است. به کمک این تحقیقات می‌توان، درک مناسبی از پتانسیل موجود برای انتقال بار و احتمال استفاده از هر وسیله در هر ساعت، به دست آورد [22]. بر این اساس، مقادیر کشش تقاضا تعریف شده است [23].

سطح اول، یک برنامه بهره‌برداری اقتصادی برای روز بعد، با هدف بیشینه‌سازی درآمد ریزشبه، اجرا شده و سطح دوم، برنامه‌ی سطح اول را با هدف کمینه کردن هزینه‌های رزرو موردنیاز برای جبران خطای پیش‌بینی، دنبال می‌کند. در مرجع [14]، یک ساختار نوین با استفاده از روش افق غلتان<sup>۴</sup> ارائه شده، که می‌تواند از طریق به‌روزرسانی اطلاعات جدید مربوط به متغیرهای تصادفی، اثرات ناشی از خطای پیش‌بینی را کاهش دهد. در مرجع [15]، هزینه‌های ریزشبه شامل هزینه بهره‌برداری از تولیدات پراکنده، ذخیره‌ساز انرژی، بارهای قابل ارتجاع و هزینه بدترین حالت<sup>۵</sup> ناشی از نوسانات منابع تجدیدپذیر، کمینه شده است. مرجع [16]، یک استراتژی قیمت دهی تصادفی برای مشارکت ریزشبه در بازار انرژی و رزرو روز بعد، با در نظر گرفتن عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر و بار مصرفی، ارائه می‌دهد. مرجع [17]، با هدف کمینه کردن هزینه بهره‌برداری از ریزشبه و تضمین کیفیت خدمات<sup>۶</sup> به مصرف‌کنندگان، مسئله برنامه‌ریزی برای منابع تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز، مدیریت مصرف و شرکت در بازار برق را بررسی کرده است.

در این مقاله، ساختاری برای سیستم مدیریت انرژی در یک ریزشبه هوشمند، با هدف بیشینه‌سازی سود حاصل از بهره‌برداری، ارائه شده است. این ریزشبه هوشمند، مسکونی فرض شده و دارای ظرفیت بالایی از منابع انرژی بادی و خورشیدی و همچنین، میکرو توربین‌های گازی می‌باشد. با اجرای این برنامه، الگوی قیمت برق ۲۴ ساعت آینده برای ارسال به مصرف‌کنندگان، میزان توان خریداری شده از شبکه‌ی توزیع یا فروخته شده به آن، آرایش منابع تولید پراکنده و توان تولیدی آن‌ها در هر ساعت، تعیین می‌شود. مدل پیشنهادی به صورت یک مسئله غیرخطی عدد صحیح مختلط<sup>۷</sup> تعریف و به کمک الگوریتم تجزیه‌ی بندرز<sup>۸</sup> حل شده است.

در ادامه مقاله، مدل پیشنهادی برای سیستم مدیریت انرژی ریزشبه در بخش ۲ و فرمول‌بندی مسئله نیز در بخش ۳، بیان می‌شود. در بخش ۴، مطالعه موردی و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده و نهایتاً، در بخش ۵ به جمع‌بندی نتیجه‌گیری پرداختیم.

<sup>4</sup>Rolling Horizon

<sup>5</sup>Worst-case

<sup>6</sup>Quality of Service (QoS)

<sup>7</sup>Mixed Integer Non-Linear Problem (MINLP)

<sup>8</sup>Benders Decomposition

<sup>9</sup>Elasticity

<sup>10</sup>Real-time pricing

نحوه‌ی تبادل توان با شبکه‌ی بالادست، می‌باشد. در این روابط Profit، سود بهره‌برداری، Revenue، درآمد بهره‌برداری و Cost، هزینه بهره‌برداری است.

- تابع هدف

$$\text{Max Profit} = \text{Revenue} - \text{Cost} \quad (1)$$

$$(2)$$

$$(3)$$

هزینه تولید توان Pgen توسط تولیدات پراکنده

$$C_i(P_{gen}(t)) = a.P_{gen}^2(t) + b.P_{gen}(t) + c \quad (4)$$

رابطه‌ی بار قابل کشش بر اساس قیمت برق و کشش تقاضا

$$(5)$$

- قید تعادل توان تولیدی و مصرفی

$$De(t) - RES(t) = \sum_{i=1}^3 P_{gen, i}(t) + P_{grid, b}(t) - P_{grid, s}(t) \quad (6)$$

- قید رزرو چرخان

$$[P_{grid, max} - P_{grid, b}(t) - P_{grid, s}(t)] + \sum_{i=1}^3 [P_{gen, max, i} - P_{gen, i}(t)] \geq SR(t) \quad (7)$$

- قیود قیمت برق

حد بالای قیمت پیشنهادی، به منظور حفظ حقوق

مصرف‌کننده طراحی شده، تا از او در برابر قیمت‌های بسیار بالای برق، حفاظت شود. همچنین، متوسط قیمت‌های پیشنهادی نیز نباید بیش از تعرفه ثابت برق باشد، در غیر این صورت بهره‌بردار برای بیشینه کردن سود خود، اغلب قیمت‌هایی در حدود حد بالا پیشنهاد داده و مصرف‌کننده به طور مداوم در معرض قیمت‌های بالا قرار خواهد گرفت.

$$Pr(t) \leq Pr, max \quad (8)$$

$$\frac{\sum_{t=1}^{24} Pr(t)}{24} \leq Pf \quad (9)$$

- قیود خرید و فروش توان

از دیگر اهداف، به حداقل رساندن تبادل توان با شبکه‌ی توزیع بالادست و کاهش وابستگی به آن است. با توجه به افزایش علاقه‌مندی به استفاده از انرژی‌های نو به صورت منابع تولید پراکنده در نزدیکی محل بار، فرض شده چندین ریزشبکه هوشمند با شرایط مشابه، به شبکه‌ی توزیع متصل است.

بنابراین، مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از انرژی‌های بادی و خورشیدی در درون ریزشبکه، به منظور کاهش اثرات منفی آن بر شبکه‌ی توزیع، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به این منظور، قراردادی بین شبکه‌ی توزیع بالادست و ریزشبکه متصل به آن منعقد شده، که می‌تواند این دو را از یکدیگر مستقل نماید. بر طبق این قرارداد، شبکه‌ی توزیع، برق را به قیمتی زیر قیمت بازار خرده‌فروشی در هر ساعت، از ریزشبکه خریداری کرده و بالعکس، به قیمتی بالاتر می‌فروشد. هم‌اکنون، قانون نسبتاً مشابهی برای ورود تولیدات پراکنده به شبکه‌ی توزیع، در بازار برق ایران نیز در حال اجرا است.

در لایه‌ی دوم، به منظور اصلاح خطای پیش‌بینی انرژی‌های بادی و خورشیدی، یک برنامه‌ریزی مجدد در هر ساعت، با بازه زمانی ۱۵ دقیقه، انجام می‌شود. این برنامه‌ریزی مجدد، باهدف کمینه کردن هزینه‌های ناشی از خطای پیش‌بینی، برنامه‌ی پیشنهادی در لایه‌ی اول را دنبال می‌کند. این امر از طریق تغییر در توان تولیدی میکرو توربین‌های گازی، خرید و فروش برق در بازار یک ساعت بعد<sup>11</sup> و یا قطع بار<sup>12</sup>، صورت می‌گیرد. بهره‌بردار بر اساس قیود مربوط به نرخ شیب واحدهای تولید پراکنده، قیمت برق بازار و پاداش پرداختی به مصرف‌کنندگان برای قطع بار، یک استراتژی بهینه برای حفظ تعادل تولید و مصرف، اتخاذ خواهد کرد. از عدم قطعیت‌های مرتبط با بار مصرفی و قیمت برق، صرف نظر شده است.

### ۳. فرمول‌بندی مسئله

مدل پیشنهادی برای مدیریت انرژی ریزشبکه هوشمند به صورت یک مسئله غیرخطی عدد صحیح مختلط، تعریف شده و روابط آن به شرح ذیل می‌باشد:

#### ۳.۱. برنامه‌ریزی برای روز بعد

در سطح اول مدیریت، برنامه‌ی باهدف بیشینه‌سازی سود بهره‌بردار ریزشبکه اجرا می‌شود. متغیرهای کنترلی، شامل قیمت برق پیشنهادی به مصرف‌کنندگان برای ۲۴ ساعت آینده، وضعیت واحدهای تولید پراکنده و

<sup>11</sup>Hour-ahead market

<sup>12</sup>Load curtailment

در تکرار اول، مقادیر اولیه برای متغیرهای عدد صحیح در نظر گرفته شده و حد پایین تابع هدف به دست می‌آید. با حل زیرمسئله‌ها، حد بالای تابع هدف نیز مشخص و مسئله اصلی با توجه به قیود نقض شده، مجدداً حل می‌شود. در هر تکرار، حدود بالا و پایین تابع هدف به روزرسانی شده و شرط پایان الگوریتم، رسیدن این دو حد به یکدیگر می‌باشد. روش تجزیه بندرز، یک روش مبتنی بر ریاضیات بوده و نسبت به الگوریتم‌های هوشمند نظیر الگوریتم ژنتیک، از زمان محاسبه بسیار کمتر و همگرایی بهتری برخوردار است.

$$st_i(t) = \hat{st}_i^{(IT)}(t)$$

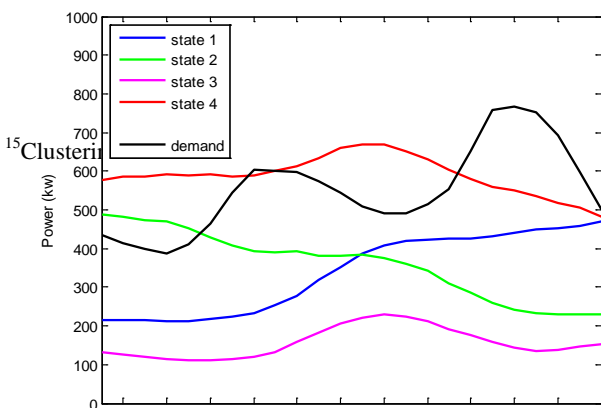
(17)

(18)

$$Profit(IT) = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^3 (st_i(t) - \hat{st}_i^{(IT)}(t)) < \epsilon$$

#### ۴. مطالعه موردی و نتایج شبیه‌سازی

مدل پیشنهادی، بر اساس اطلاعات مربوط به بازار برق کالیفرنیا، در نرم‌افزار GAMS پداده‌سازی‌های و مسئله اصلی توسط CPLEX و زیرمسئله توسط CONOPT حل شده است. این اطلاعات به صورت ساعتی برای بازه زمانی یک سال دریافت شده و شامل تولید بادی و خورشیدی، قیمت برق و بار مصرفی خانگی می‌باشد. داده‌های مربوط به تولیدات بادی و خورشیدی در سال ۲۰۱۳، با استفاده از جعبه‌ابزار Signal Clustering در نرم‌افزار MATLAB، خوشه‌بندی<sup>۱۱</sup> و هر حالت به صورت جداگانه شبیه‌سازی شده است. شکل ۱، مرکز خوشه را در ۴ حالت مختلف از مجموع تولیدات بادی و خورشیدی به همراه الگوی بار خانگی، نشان می‌دهد. احتمال وقوع هر حالت در طول سال مشخص بوده و بیانگر شرایط گوناگون بهره‌برداری از ریزشبهه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اوج تولید بادی می‌تواند در اوایل صبح و یا اواخر شب رخ دهد و در برخی از روزهای سال نیز بسیار اندک (نزدیک به صفر) و یا بالعکس، مقدار قابل توجهی باشد. ریزشبهه مورد مطالعه از یک واحد فتوولتائیک، یک توربین بادی و ۳ میکروتوربین گازی تشکیل و نفوذ انرژی‌های بادی و خورشیدی، درصد بالایی فرض شده است. در شکل ۲، برنامه بهره‌برداری از



شکل ۱: بار مصرفی و ۴ حالت مجموع انرژی بادی و خورشیدی

این قیود، شامل حداکثر ظرفیت پست توزیع متصل به ریزشبهه و شرط تنها خرید یا فروش برق در هر ساعت، می‌باشد.

$$0 \leq P_{grid,b}(t), P_{grid,s}(t) \leq P_{grid,max} \quad (10)$$

$$P_{grid,b}(t) \cdot P_{grid,s}(t) = 0 \quad (11)$$

• قیود واحدهای تولید پراکنده

$$P_{gen,min,i} \cdot Si(t) \leq P_{gen,i}(t) \leq P_{gen,max,i} \cdot Si(t) \quad (12)$$

$$P_{gen,i}(t+1) - P_{gen,i}(t) \leq Rup,i \quad (13)$$

$$P_{gen,i}(t) - P_{gen,i}(t+1) \leq Rdn,i \quad (14)$$

$$[Up,i(t-1) - Mup,i] \cdot [Si(t-1) - Si(t)] \geq 0 \quad (15)$$

$$[Dn,i(t-1) - Mdn,i] \cdot [Si(t-1) - Si(t)] \geq 0 \quad (16)$$

#### ۳.۲. برنامه‌ریزی مجدد در طول روز

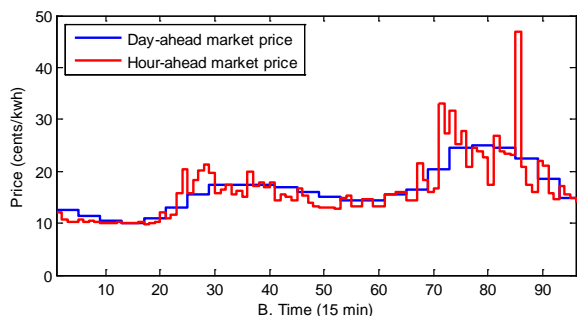
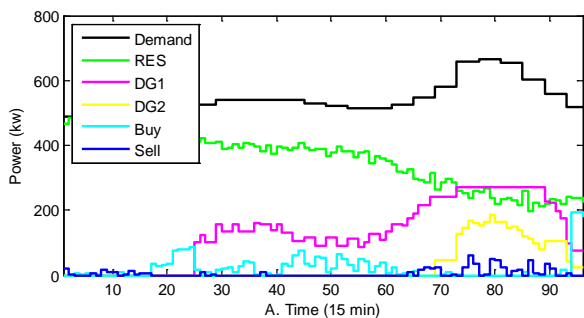
در سطح دوم مدیریت، برنامه‌ریزی مجدد با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از خطای پیش‌بینی انرژی‌های تجدیدپذیر، صورت می‌گیرد. متغیرهای کنترلی شامل میزان افزایش یا کاهش در توان تولیدی واحدهای روشن، نحوه‌ی مشارکت در بازار ساعت بعد و قطع بار، می‌باشد. این متغیرها با توجه به این‌که تولیدات منابع تجدیدپذیر نسبت به مقادیر پیش‌بینی‌شده، افزایش یا کاهش یافته است، به صورت بهینه تعیین خواهند شد. در این سطح از مدیریت، با توجه به اینکه برنامه‌ریزی برای بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه انجام می‌شود، روشن کردن واحدی که در مدار نمی‌باشد، از نظر اقتصادی بهینه نیست. در غیر این صورت، برنامه جدید به شدت از برنامه اقتصادی تعیین شده در سطح اول، فاصله گرفته و برنامه اولیه اساساً بی‌فایده خواهد شد. قیود مسئله نیز تقریباً مشابه حالت قبل تکرار می‌شود. تفاوت‌ها در تغییر نرخ شیب و اضافه شدن گزینه قطع بار درازای پرداخت پاداش، می‌باشد. محدودیت در تعداد صفحات مانع از نگارش سایر روابط شد.

#### ۳.۳. حل مسئله به روش تجزیه بندرز

تجزیه بندرز یکی از مطلوب‌ترین روش‌ها از لحاظ بهینگی پاسخ و زمان برای حل این‌گونه مسائل است. هنگام استفاده از این الگوریتم، مسئله به یک مسئله اصلی<sup>۱۳</sup> و چند زیرمسئله<sup>۱۴</sup> تجزیه می‌شود [24]. مسئله اصلی معمولاً یک مسئله عدد صحیح و زیرمسئله‌ها به صورت مسائل خطی یا غیرخطی هستند. با حل مسئله اصلی، مقادیر متغیرهای عدد صحیح (۰ یا ۱) که نشان‌دهنده وضعیت در مدار بودن واحدها می‌باشند، تعیین شده و زیرمسئله‌ها از این پاسخ استفاده می‌کنند تا قیود باقیمانده را برآورده سازند.

<sup>13</sup> Master problem

<sup>14</sup> Subproblem

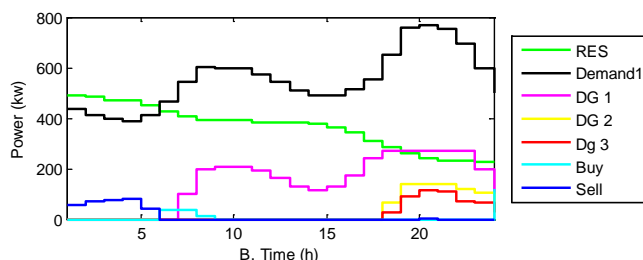
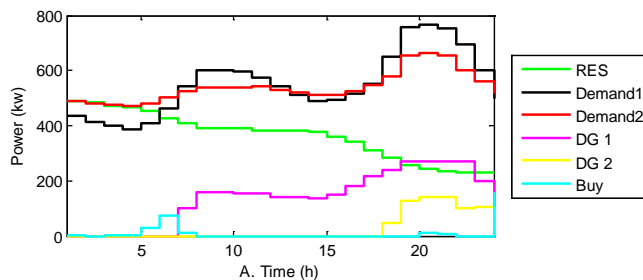


شکل ۴: برنامه‌ریزی مجدد در طول روز (A) قیمت برق در بازار روز بعد و بازار یک ساعت بعد (B)

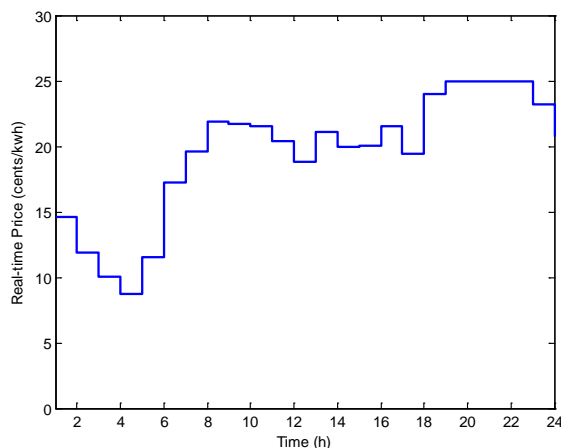
جدول ۱: میزان تغییرات سود بهره بردار در حالات مختلف

تعداد روز در سال	درصد افزایش سود	سود روزانه پس از مدیریت	سود روزانه پیش از مدیریت	شرایط شبکه
۶۷	٪ ۶.۵	۱۸۱۵ دلار	۱۷۰۵ دلار	۱
۹۴	٪ ۶.۵	۱۸۰۵ دلار	۱۶۹۰ دلار	۲
۱۵۸	٪ ۱۳.۵	۹۸۰ دلار	۸۶۰ دلار	۳
۴۶	٪ ۴.۵	۲۷۱۰ دلار	۲۶۰۰ دلار	۴

تعیین شده است. به‌طور مشابه، سه حالت دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته و همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، سود بهره‌بردار در تمام حالات با افزایش همراه بوده و بر اساس احتمال وقوع هر حالت، سود کل نیز در طول یک سال بهره‌برداری از ۷۲۳۸۶۰ دلار به ۷۶۴۸۰۵ دلار رسیده است. خطای پیش‌بینی منابع انرژی تجدیدپذیر با استفاده از توزیع نرمال با میانگین صفر، مدل شده است. فرض بر این است که با نزدیک شدن به اواخر دوره، خطای پیش‌بینی و متعاقباً، انحراف از معیار در توزیع نرمال، افزایش خواهد یافت. برنامه‌ریزی مجدد ریزشکبه، در شکل ۴ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بر عملکرد صحیح و کارآمد ساختار ارائه شده، دلالت دارد. جدول ۲، اطلاعات مربوط به تولیدات پراکنده را نشان می‌دهد.



شکل ۲: برنامه بهره‌برداری روز بعد در دو حالت؛ پس از مدیریت انرژی پیشنهادی (A) و پیش از آن (B)



شکل ۳: قیمت برق پیشنهادی به مصرف‌کنندگان

ریزشکبه، قبل و بعد از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی و همچنین در شکل ۳، قیمت برق ارسالی به مصرف‌کنندگان، مشاهده می‌شود. سود بهره‌بردار با ۶.۵٪ افزایش از ۱۶۹۰ دلار در روز به ۱۸۱۰ دلار در روز رسیده است.

تغییر الگوی بار مصرفی، از طریق انتقال بار از ساعات تولید محدود انرژی‌های تجدیدپذیر به ساعاتی که تولید این منابع بیشتر است، صورت گرفته و بدین ترتیب، نیاز به استفاده از میکروتوربین‌های گازی و خرید برق از شبکه، کاهش یافته است. سیگنال قیمت برق بهینه در هر ساعت، با توجه به میزان بار مصرفی، تولیدات تجدیدپذیر و قیمت برق در شبکه بالادست،

جدول ۲: اطلاعات مربوط به واحدهای تولید پراکنده

هزینه خاموشی	هزینه راه‌اندازی	حداقل زمان روشنی	حداقل زمان خاموشی	نرخ شیب پایین	نرخ شیب بالا	حداقل ظرفیت	حداکثر ظرفیت	c	b	a	
۴۵۰	۴۵۰	۳	۳	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۷۰	۴۵	۱۶/۲	۰/۰۰۲	۱
۷۵۰	۷۵۰	۲	۲	۸۰	۸۰	۲۵	۱۴۰	۳۸	۱۷/۵	۰/۰۰۴	۲
۸۰۰	۸۰۰	۲	۲	۶۰	۶۰	۲۵	۱۴۰	۴۰	۱۸/۸	۰/۰۰۵۵	۳

no. 4, 2012.

- [8] Mohammad-Iman Alizadeh J. Aghaei, "Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 64-72, 2012.
- [9] Jianhui Wang Wencong Su, "Energy Management Systems in Microgrid Operations," *The Electricity Journal*, vol. 25, no. 8, 2012.
- [10] R. M. Kamel, R. Andoulsi, K. Nagasaka A. Chaouachi, "Multiobjective Intelligent Energy Management for a Microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011.
- [11] Yunsi Fei Bingnan Jiang, "Dynamic Residential Demand Response and Distributed Generation Management in Smart Microgrid with Hierarchical Agents," *Energy Procedia*, vol. 12, 2011.
- [12] Dipti Srinivasan, Ashwin M. Khambadkone, Htay Nwe Aung Thillainathan Logenthiran, "Multiagent System for Real-Time Operation of a Microgrid in Real-Time Digital Simulator," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, 2012.
- [13] Meidong Xue, Guangchao Geng Quanyuan Jiang, "Energy Management of Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 28, no. 3, 2013.
- [14] Carlos Benavides, Fernando Lanas, Bernardo Severino, Lorenzo Reyes, Jacqueline Llanos, Doris Sáez Rodrigo Palma-Behnke, "A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, 2013.
- [15] Nikolaos Gatsi, Georgios B. Giannakis Yu Zhang, "Robust Energy Management for Microgrids With High-Penetration Renewables," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013.
- [16] Y. Luo, G.Y. Tu L. Shi, "Bidding strategy of microgrid with consideration of uncertainty for participating in power market," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 59, 2014.
- [17] Shiwen Ma, R.M. Nelm Yingsong Huang, "Adaptive Electricity Scheduling in Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 1, 2014.
- [18] M. Parsa Moghaddam, G.R. Yousefi H.A. Aalami, "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, 2010.
- [19] Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W. S. Wong, Robert Schober Pedram Samadi, "Tackling the Load Uncertainty Challenges for Energy Consumption Scheduling in Smart Grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, 2013.
- [20] M.H. Javidi H. Poursaghar Khomami, "An Efficient Home Energy Management System for Automated Residential Demand Response," in *International Power System Conference (PSC)*, Tehran, 2013.
- [21] Lingfeng Wang Christopher O. Adika, "Autonomous Appliance Scheduling for Household Energy Management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, 2014.
- [22] Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W. S. Wong, Robert Schober Pedram Samadi, "Real-Time Pricing for Demand Response Based on Stochastic Approximation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, 2014.
- [23] Goran Strbac, Pariya Cumperayot, Dilemar de Paiva Mendes Daniel S. Kirschen, "Factoring the Elasticity of Demand in Electricity Prices,"

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله، یک سیستم مدیریت انرژی برای ریزشبکه هوشمند دارای حجم بالایی از منابع انرژی تجدیدپذیر، معرفی شد. مدل پیشنهادی با هدف گسترش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر به کمک برنامه‌های پاسخگویی بار، در دو سطح ارائه شده است. در سطح اول، هدف بیشینه‌سازی سود بهره‌بردار و در سطح دوم، هدف کمینه‌سازی هزینه‌های ناشی از خطای پیش‌بینی انرژی‌های بادی و خورشیدی می‌باشد. کنترل بار به صورت غیرمستقیم و از طریق ارسال قیمت برق ساعتی به مصرف‌کنندگان، اجرا می‌شود. ساختار پیشنهادی به صورت مسئله غیرخطی عدد صحیح مختلط، فرمول‌بندی شده و به کمک تجزیه بندرز حل شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، عملکرد مؤثر سیستم مدیریت انرژی را در کنترل عدم قطعیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش سود بهره‌بردار، نشان داده و در عین حفظ امنیت و تداوم برق‌رسانی، امکان افزایش نفوذ این منابع در شبکه را فراهم می‌کند.

## منابع

- [1] H. Farhangi, "The Path of the Smart Grid," *IEEE power & energy magazine*, pp. 18-28, 2010.
- [2] International Energy Agency IEA, "World energy outlook 2009," IEA, Paris, 2009.
- [3] M. Azam, M. Naem, A.S. Khwaja, A. Anpalagan M. Iqbal, "Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 640-654, July 2014.
- [4] J. M. Latorre, L. Olmos, A. Ramos K. Dietrich, "Demand Response in an Isolated System With High Wind Integration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, 2012.
- [5] F. Albuyeh A. Ipakchi, "Grid of the Future," *EEE power & energy magazine*, pp. 52-63, 2009.
- [6] A. Benigni, A. Helmedag, K. Chen, D. Cali, P. Jahangiri C. Molitor, "Multiphysics Test Bed for Renewable Energy Systems in Smart Homes," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, 2013.
- [7] Mahmud Fotuhi-Firuzabad, Farrokh Aminifar Amir Safdarian, "Compromising Wind and Solar Energies From the Power System Adequacy Viewpoint," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27,

عنوان مقاله

بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۳ تهران، ایران

*IEEE Transactions on Power System*, vol. 15, no. 2, 2000.

- [24] Enrique Castillo, Roberto Mínguez, Raquel García-Bertrand Antonio J. Conejo, *Decomposition Techniques in Mathematical Programming.*: Springer, 2006.