

برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه از منابع تولید بادی-تلمبه ذخیره‌ای در سیستم قدرت تجدید ساختار شده با استفاده از مدل‌سازی فازی

حسن سیاهکلی
محمدرضا مختاری
فرید احمدی
H_siahkali@azad.ac.ir mreza.mokhtary@gmail.com ahmadi.farid@gmail.com

دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب
تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی بهره‌برداری، توابع فازی، توربین بادی، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

چکیده

در سال‌های اخیر نگرانی‌های زیست‌محیطی و مسائل اقتصادی به شدت نیاز به تولید انرژی پاکیزه و پر بازده الکتریکی را افزایش داده است. به همین علت نیازهایی برای تولید حجم عظیمی از انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر احساس می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل پیشرفت‌هایی که در تولید انرژی به وسیله باد صورت پذیرفته، این منبع بیش از سایر منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی، مورد توجه قرار گرفته است. به علاوه کاهش هزینه‌های تولید از این منبع و پایدار بودن منابع بادی و همچنین امکان بهره‌برداری به صرفه از آن، این منبع را بیش از پیش مطرح نمود. اما ماهیت غیرقابل پیش‌بینی باد، حتی برای بازه‌های کوتاه مدت باعث بروز مشکلات جدی در زمینه‌ی عدم قطعیت سیستم‌های قدرت از لحاظ اقتصادی و بهره‌برداری از منابع می‌گردد. بدین جهت است که استفاده از نیروگاه‌های آبی تلمبه ذخیره‌ای در کنار تولید منابع بادی و متعارف به عنوان روشی مفید برای کاهش عدم قطعیت‌ها پیشنهاد می‌شود.

نحوه‌ی به‌کارگیری نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در کنار توربین‌های بادی و نیروگاه‌های متعارف موضوع مطالعه در این مقاله بوده که به‌عنوان یک مسئله‌ی هماهنگی ورود و خروج واحدهای نیروگاهی (UC)^۱ به حل آن پرداخته می‌شود. با استفاده از توابع فازی، به مدل‌سازی رفتار پارامترهای دارای عدم قطعیت در مساله‌ی فوق پرداخته شده و مدل‌سازی‌های انجام شده نیز با استفاده از نرم‌افزار GAMS و بر روی یک شبکه‌ی نمونه اجراء و نتایج ارائه می‌شوند.

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی بهره‌برداری^۲، تصمیماتی چون خرید میان‌مدت سوخت و حمل و نقل آن، برنامه‌ریزی انتقال و تولید میان‌مدت، تصمیمات مربوط به تعمیرات، استراتژی‌های کنترل آلودگی، قراردادهای خرید و فروش توان بین شرکت‌های برق، مدیریت طرف تقاضا^۳ (DSM)، برنامه‌ریزی تولید شرکتهای غیرعمومی^۴ و

¹ - Unit Commitment
² - Operation Planning
³ - Demand Side Management
⁴ - Non-Utility

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

این واحدهای تلمبه ذخیره‌ای می‌توانند به صورت مجزا در بازار فروش شرکت کنند یا توسط یک شرکت که دارای نیروگاه‌های بادی یا متعارف و یا هر دو هستند به صورت یکپارچه عمل کنند. تمرکز این مقاله بر روی حالت دوم است. به همین دلیل پمپاژ یا تولید انرژی این واحدها تنها به قیمت انرژی بازار وابسته نخواهد بود [۳].

در این مقاله و در بخش دوم، به فرمول‌بندی مسئله‌ی برنامه‌ریزی بهره‌برداری از دیدگاه یک شرکت تولیدکننده‌ی برق پرداخته شده سپس مدل توربین بادی در تولید انرژی الکتریکی در بخش سوم ارائه می‌شود. در بخش چهارم نحوه‌ی مدل‌سازی تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی با استفاده از توابع فازی و چگونگی تبدیل مسئله‌ی فوق به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی متعارف بیان خواهد شد. در بخش پنجم نیز نتایج اجرای این مدل‌سازی بر روی یک شبکه‌ی نمونه ارائه شده است. نتیجه‌گیری مقاله در بخش ششم بیان شده است.

۲- مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی بهره‌برداری

سؤال مهم در مسئله‌ی برنامه‌ریزی بهره‌برداری برای بهره‌بردار سیستم یا یک شرکت تولیدکننده انرژی الکتریکی این است که از منابع در دسترس به چه نحوی استفاده کند تا منافع خود را حداکثر نماید. بدین لحاظ مالکان یا بهره‌برداران با یک مسئله‌ی بهینه‌سازی (به همراه قیود مربوطه آن) مواجه هستند که بایستی منافع آن‌ها را در نظر گرفته و حداکثر نمایند. هر چند در افق زمانی مسئله‌ی برنامه‌ریزی بهره‌برداری اتفاق نظری وجود ندارد لیکن در ضرورت آن کمتر تردیدی وجود دارد. در مراجع مختلف [۴-۶] برای این مسئله، افق زمانی یک تا دو سال و با پیوندهای هفتگی تا ماهانه لحاظ شده است. از جمله مطالعاتی که در این افق زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرند می‌توان به هماهنگی ورود و خروج واحدهای نیروگاهی (UC)، برنامه‌ریزی تعمیرات واحدهای نیروگاهی (MS)^۱، برنامه‌ریزی منابع انرژی و تحلیل حالات اضطراری و برنامه‌ریزی خروج‌ها اشاره نمود.

مقاله حاضر به مسئله‌ی برنامه‌ریزی بهره‌برداری در افق زمانی میان‌مدت (یک ساله) با تمرکز بر روی برنامه‌ریزی

قیمت‌گذاری انرژی را شامل می‌شود. افق تصمیم‌گیری میان‌مدت در شرکت‌های برق مختلف، متفاوت بوده و بازه‌ی آن شامل یک دوره‌ی یک تا دو ساله می‌باشد [۱].

تجدید ساختار در صنعت برق، تغییراتی را در مسئله برنامه‌ریزی بهره‌برداری ایجاد کرده است. یکی از مهمترین تغییرات پیش آمده، به تابع هدف مسئله برمی‌گردد که از یک مسئله‌ی حداقل کردن هزینه به حداکثر نمودن سود تبدیل شده است. در این صنعت و با ظهور بازارهای رقابتی، بازیگران مختلفی پا به عرصه وجود نهاده‌اند. لذا هر چند وظایف برنامه‌ریزی بهره‌برداری که در ساختار سنتی وجود داشتند، در این ساختار جدید محو نمی‌شوند لیکن دست‌خوش تغییر و پیچیدگی می‌شوند [۲].

از طرف دیگر، افزایش استفاده از انرژی‌های نو در سیستم‌های قدرت، مسائلی چون برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت را با مشکلاتی روبرو می‌کند که از متغیر بودن این منابع و نامشخص بودن تولید آن‌ها ناشی می‌شود لذا این منابع تحت عنوان منابع انرژی غیرقابل اطمینان بررسی می‌شوند.

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای یک منبع ذخیره‌ی انرژی است به‌گونه‌ای که در آن آب بین یک منبع بالا و پایین چرخش می‌کند. در بازار برق با ساختار سنتی هماهنگی واحدهای نیروگاه‌های آبی-حرارتی به منظور کاهش هزینه‌ی سوخت استفاده می‌گردید لذا از تولید نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای جهت تأمین پیک بار و سپس در دوره‌ی کم‌باری با پمپ کردن آب به مخزن بالایی بهره‌برداری می‌شود.

برای رفع این مشکل، استفاده از نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در کنار مزارع بادی که دارای عدم قطعیت در تولید هستند پیشنهاد شده است. نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در واقع یک مجموعه است که به وسیله چرخه‌ی آب در دو مخزن بالا و پایین خود انرژی را در خود ذخیره می‌کند. برای ذخیره‌ی انرژی، آب توسط پمپ‌ها از مخزن پایین به بالا پمپ می‌شود و برای استفاده از آن، واحد مانند یک نیروگاه آبی انرژی را از طریق توربین‌های آبی به مخزن پایین می‌فرستد. به این ترتیب می‌توان اضافه تولید مزارع بادی را ذخیره و یا کمبود تولید آن‌ها را توسط این واحدها بدون مصرف سوخت جبران نمود.

^۱ - Maintenance Scheduling

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$F(P_{GD}(g,t)) = a_g + b_g \cdot P_{GD}(g,t) + c_g \cdot (P_{GD}(g,t))^2 \quad (۴)$$

که در این روابط:

a_g, b_g, c_g : ضرایب تابع هزینه سوخت واحد نیروگاهی گام

N_G : تعداد واحد نیروگاهی متعارف

N_Y : تعداد واحدهای نیروگاهی تلمبه ذخیره‌ای

N_W : تعداد مزارع بادی

$n(t)$: تعداد ساعات در هر پریود (۱۶۸ ساعت در هر هفته)

T : تعداد پریودهای مطالعه (۵۲ هفته)

$EP(t)$: قیمت انرژی پیش‌بینی شده در پریود t ام

$RP(t)$: قیمت ذخیره پیش‌بینی شده در پریود t ام

$OMFCT(g)$: هزینه ثابت بهره‌برداری واحد نیروگاهی گام

$OMFCW(w)$: هزینه ثابت بهره‌برداری مزرعه بادی w ام

$OMVCT(g)$: هزینه متغیر بهره‌برداری واحد نیروگاهی گام

$OMVCW(w)$: هزینه متغیر بهره‌برداری مزرعه بادی w ام

$P_g(y, t)$: توان تولید واحد تلمبه ذخیره‌ای y ام در پریود t ام

$P_p(y, t)$: توان مصرفی پمپ واحد تلمبه ذخیره‌ای y ام در

پریود t ام

C_{su} : هزینه آغاز به کار واحد تلمبه ذخیره‌ای

C_{sd} : هزینه خاموش شدن واحد تلمبه ذخیره‌ای

$P_{GD}(g, t)$: میزان مشارکت واحد نیروگاهی گام در پریود

t ام در تامین بار

$P_{GR}(g, t)$: میزان مشارکت واحد نیروگاهی گام در پریود

t ام در تامین ذخیره

$P_w(w, t)$: میزان تولید مزرعه بادی w ام در پریود t ام

$P_{w,max}$: حداکثر ظرفیت تولید مزرعه بادی w ام

$U(g, t)$: وضعیت واحد نیروگاهی گام در پریود t ام (یک

یعنی روشن و صفر یعنی خاموش)

$V(w, t)$: وضعیت مزرعه بادی w ام در پریود t ام (یک

یعنی روشن و صفر یعنی خاموش)

$M(y, t)$: وضعیت ژنراتوری یا موتوری بودن واحد

تلمبه ذخیره‌ای y ام در پریود t ام (یک یعنی ژنراتوری و صفر

یعنی موتوری)

ورود و خروج واحدها و برنامه‌ریزی تعمیرات واحدهای نیروگاهی بدون در نظر گرفتن شبکه و قیود مربوط به آن پرداخته است. همچنین مسئله فوق در حضور منابع تولید انرژی بادی و عدم قطعیت موجود در تولید آن‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در ادامه، ابتدا فرمول‌بندی مسئله به صورت قطعی و معین ارائه می‌شود و سپس مدل‌سازی فازی مسئله بیان می‌گردد. تابع هدف مسئله شامل حداکثر کردن سود مجموعه سیستم که از تفاضل مجموع درآمدها (شامل فروش انرژی و ذخیره) و کلیه هزینه‌های واحدهای نیروگاهی سیستم قدرت از جمله هزینه سوخت، هزینه‌های ثابت و متغیر بهره‌برداری و هزینه‌های راه‌اندازی و خاموشی واحدها است، بدست خواهد آمد. تابع هدف مسئله، عبارت است از:

$$\text{Max } J = \text{Revenue} - \text{Cost} \quad (۱)$$

که در آن درآمد و هزینه کل از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \text{Revenue} = & \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} \{P_{GD}(g,t) \cdot EP(t) \cdot n(t)\} \cdot U(g,t) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} \left\{ P_{GR}(g,t) \cdot U(g,t) - RESW * \sum_{w=1}^{N_W} P_w(w,t) \cdot V(w,t) \right\} \cdot RP(t) \cdot n(t) \Big\} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^{N_W} \{P_w(w,t) \cdot EP(t) \cdot n(t)\} \cdot V(w,t) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^{N_Y} \{P_g(y,t) \cdot EP(t) \cdot n(t)\} \cdot M(y,t) \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} \text{Cost} = & \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} \{F(P_{GD}(g,t)) \cdot n(t)\} \cdot U(g,t) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} \{P_{GD}(g,t) + P_{GR}(g,t)\} \cdot OMVCT(g) \cdot n(t) \Big\} \cdot U(g,t) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} \{P_{Gg,max}(g) \cdot OMFCT(g) \cdot n(t) / 8760\} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^{N_W} \{P_w(w,t) \cdot OMVCW(w) \cdot n(t)\} \cdot V(w,t) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^{N_W} \{P_{w,max}(w) \cdot OMFCW(w) \cdot n(t) / 8760\} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^{N_Y} \{P_p(y,t) \cdot EP(t) \cdot n(t)\} \cdot (1 - M(y,t)) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^{N_Y} \{Csu(y) \times ((1 - M(y,t)) \times M(y,t+1)) + \\ & \quad Csd(y) \times (M(y,t) \times (1 - M(y,t+1)))\} \end{aligned} \quad (۳)$$

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\prod_i^{t+d_i} MS(i,t) = 1 \quad \begin{cases} T_i^{Min} \leq t \leq T_i^{Max} - d_i \\ i = 1, 2, \dots, N_G + N_W \end{cases} \quad (7)$$

که در آن

$MS(i,t)$: وضعیت واحد نیروگاهی نام در پریود نام
(یک یعنی به تعمیرات رفته است)

d_i : دوره‌ی تعمیرات مورد نیاز واحد نام

T_i^{Min} : زمان ابتدایی دوره‌ی تعمیرات مجاز نام

T_i^{Max} : زمان انتهایی دوره‌ی تعمیرات مجاز نام

در صورتی که محدودیت در تعداد تیم‌های تعمیراتی در هر پریود وجود داشته باشد، بایستی قید زیر را نیز به مسئله‌ی بهینه‌سازی اضافه نمود.

$$\sum_{i=1}^{N_G+N_W} MS(i,t) = MT_t \quad (8)$$

که در آن MT_t تعداد تیم تعمیراتی در اختیار در پریود نام می‌باشد.

۲-۲- قیود نیروگاهی

قیود نیروگاهی شامل ظرفیت حداکثر و حداقل واحدهای نیروگاهی و میزان تولید در دسترس واحدها می‌باشد.

۱- قید ظرفیت تولید بادی در دسترس

$$P_W(w,t) = W_{av}(w,t) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

$W_{av}(w,t)$: حداکثر تولید بادی در دسترس مزرعه بادی نام در پریود نام که از رابطه‌ی (۱۳) بدست می‌آید.

۲- قید ظرفیت تولید واحدهای نیروگاهی متعارف

$$P_{Gg,min} \leq P_{GD}(g,t) + P_{GR}(g,t) \leq P_{Gg,max} \quad (10)$$

$P_{Gg,min}$: حداقل ظرفیت تولید واحد نیروگاهی متعارف نام

$P_{Gg,max}$: حداکثر ظرفیت تولید واحد نیروگاهی متعارف نام

۳- قیود تغییرات آب ذخیره شده در مخازن بالا و پایین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

مسئله‌ی بهینه‌سازی فوق دارای تعدادی قید می‌باشد که بایستی در حل مسئله در نظر گرفته شوند. این قیود را می‌توان به دو دسته قیود سیستمی و قیود نیروگاهی طبقه‌بندی نمود.

۱-۲- قیود سیستمی

قیود سیستمی شامل قیود برقراری تعادل تولید و بار، تأمین ذخیره‌ی مورد نیاز و برنامه‌ریزی تعمیرات واحدهای نیروگاهی می‌باشد.

۱- قید تعادل تولید و بار

$$\sum_{g=1}^{N_G} P_{GD}(g,t) \cdot U(g,t) + \sum_{w=1}^{N_W} P_W(w,t) \cdot V(w,t) + \sum_{y=1}^{N_Y} P_G(y,t) \cdot M(y,t) = P_d(t) + \sum_{y=1}^{N_Y} P_P(y,t) \cdot (1 - M(y,t))$$

$$t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

$P_d(t)$: میزان پیک بار در پریود نام

۲- قید ذخیره مورد نیاز

ذخیره مورد نیاز در این مسئله به دو قسمت تفکیک شده است. بخش اول متناسب با درصدی از پیک بار انتخاب می‌شود (مثلاً ۵ درصد بار در هر پریود). بخش دوم که به دلیل حضور منابع بادی و عدم قطعیت موجود در انرژی اولیه و خطای پیش‌بینی میزان تولید این منابع می‌باشد، به صورت درصدی از تولید در دسترس این منابع در هر پریود در نظر گرفته می‌شود (مثلاً ۱۰ درصد میزان تولید بادی در دسترس).

$$\sum_{g=1}^{N_G} P_{GR}(g,t) \cdot U(g,t) - RESW * \sum_{w=1}^{N_W} P_W(w,t) \cdot V(w,t) \leq P_R(t) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$P_R(t)$: بخش اول از ذخیره‌ی مورد نیاز متناسب با بار

$RESW$: ضریب بخش دوم از ذخیره‌ی مورد نیاز متناسب با تولید بادی در دسترس

۳- قید برنامه‌ریزی تعمیرات واحدهای نیروگاهی متعارف

تعمیرات واحدهای نیروگاهی بایستی در زمان خاموشی واحدها و با توجه به دوره‌ی زمانی مجاز برای تعمیرات و همچنین تعداد تیم‌های تعمیراتی انجام شود.

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$Wav_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq SW_i < V_{ci} \\ P_{W,max} * (A + B * SW_i + C * SW_i^2) & V_{ci} \leq SW_i < V_r \\ P_r & V_r \leq SW_i \leq V_{co} \\ 0 & SW_i > V_{co} \end{cases} \quad (13)$$

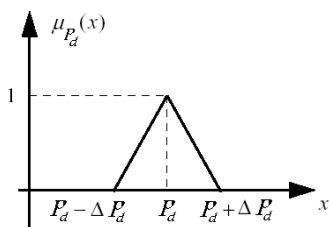
که در آن حداکثر ظرفیت توان تولیدی توسط توربین بادی، SW_i سرعت وزش باد و Wav_i توان تولیدی در دسترس توربین بادی نام می‌باشند. ضرایب ثابت A, B و C در [۴] داده شده‌اند.

۴- مدل‌سازی فازی مسئله برنامه‌ریزی بهره‌برداری

با توجه به فرمول‌بندی مسئله‌ی اشاره شده در بخش دوم، می‌توان مشاهده کرد که تابع هدف و قیود مسئله شامل معادلات تعادل تولید و مصرف، ذخیره‌ی مورد نیاز و توان تولید بادی در دسترس، ماهیتی غیردقیق و نامشخص دارند. لذا برای این معادلات می‌توان با تعریف توابع فازی، آن‌ها را به شکل معادلات/نامعادلات فازی بیان نمود [۵-۸].

۱- تابع عضویت معادله‌ی تعادل عرضه و تقاضا: بار پیش‌بینی شده در سیستم قدرت معمولاً دارای خطایی مابین ± 2 تا ± 5 درصد می‌باشد. لذا معادله‌ی تعادل عرضه و تقاضا به صورت معادله‌ی فازی (\cong) زیر و به شکل (۳) و با در نظر گرفتن میزان تغییرات بار پیش‌بینی شده (ΔP_d) بیان می‌شود.

$$\mu_{P_d}(x) = \begin{cases} 1 & x = P_d \\ \frac{x - P_d + \Delta P_d}{\Delta P_d} & P_d - \Delta P_d \leq x \leq P_d \\ \frac{P_d + \Delta P_d - x}{\Delta P_d} & P_d \leq x \leq P_d + \Delta P_d \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (14)$$



شکل (۳) تابع عضویت معادله برابری تولید و بار

$$Eu(y, t) = Eu(y, t - 1) - (Pg(y, t) \times M(y, t)) + efp(y) \times [Pp(y, t) \times (1 - M(y, t))] \quad (11)$$

$$El(y, t) = El(y, t - 1) + (Pg(y, t) \times M(y, t)) - efp(y) \times [Pp(y, t) \times (1 - M(y, t))] \quad (12)$$

$EL(y, t)$: انرژی ذخیره شده در مخزن پایینی واحد

تلمبه ذخیره‌ای y ام در پی‌یود t ام

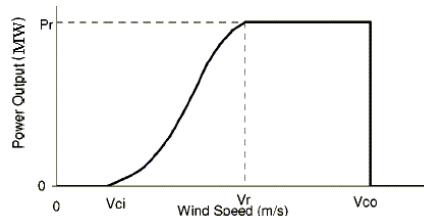
$EU(y, t)$: انرژی ذخیره شده در مخزن بالایی واحد

تلمبه ذخیره‌ای y ام در پی‌یود t ام

$efp(y)$: راندمان پمپ واحد تلمبه ذخیره‌ای y ام

۳- مدل توربین بادی

میزان تولید توان در توربین‌های بادی تابعی از سرعت وزش باد می‌باشد. شکل (۲) منحنی مشخصه تغییرات توان تولیدی بر حسب سرعت باد را برای یک توربین بادی نمونه نشان می‌دهد.



شکل (۲) منحنی مشخصه توربین بادی بر حسب سرعت باد

در این منحنی، سه سرعت ابتدایی^۱، نامی^۲ و قطع^۳ برای هر نوع توربین بادی در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که در زیر سرعت ابتدایی و بالای سرعت قطع، توان تولیدی توربین بادی صفر می‌باشد. همچنین توان تولیدی توربین بادی در فاصله بین سرعت‌های نامی و قطع نیز ثابت در نظر گرفته می‌شود لیکن در فاصله مابین سرعت‌های ابتدایی و نامی، منحنی تغییرات توان تولیدی توربین بادی با سرعت باد رابطه غیرخطی دارد. لذا رابطه‌ی کلی مابین توان تولیدی و سرعت باد را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$(13)$$

1 - Cut-in Wind Speed
2 - Rating Wind Speed
3 - Cut-out Wind Speed

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

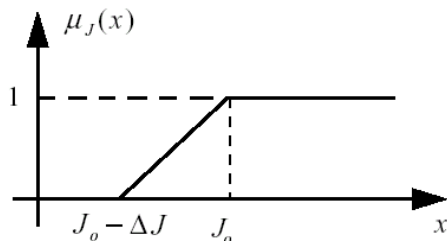
۴- تابع عضویت تابع هدف: معادله هدف را با در نظر گرفتن یک مقدار نهایی و مناسب (J_0) که انتظار می‌رود مقدار تابع هدف بایستی بیشتر از این مقدار باشد، می‌توان به یک نامعادله فازی ($\tilde{\geq}$) تبدیل کرد.

$$\text{Max } J \tilde{\geq} J_0 \quad (17)$$

تابع عضویت نامعادله تابع هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_J(x) = \begin{cases} 0 & x \leq J_0 - \Delta J \\ \frac{x - J_0 + \Delta J}{\Delta J} & J_0 - \Delta J \leq x \leq J_0 \\ 1 & x \geq J_0 \end{cases} \quad (18)$$

سطح مقدار نهایی (J_0) مقدار مطلوب سود سیستم را نشان می‌دهد. هر چه مقدار سود از این مقدار کمتر شود، مقدار رضایت نیز کاهش خواهد یافت که این موضوع با کاهش تابع عضویت نشان داده شده است (شکل ۶). مقدار سود معادل با J_0 در حقیقت بیانگر سود حاصله از حل مسئله‌ی بهینه‌سازی در محیط قطعی و معین است که در آن کلیه‌ی قیود ارضاء شده‌اند. مقدار ΔJ را می‌توان با توجه به تجربه انتخاب کرد.



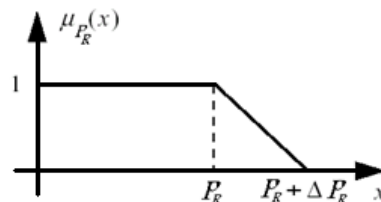
شکل (۶) تابع عضویت نامعادله تابع هدف

با تعریف متغیر Z به‌عنوان حداقل درجه ارضای تمامی قیود مسئله‌ی بهینه‌سازی، می‌توان رابطه زیر را با استفاده روش متقارن "زاده" و "بلمن" بدست آورد:

۲- تابع عضویت نامعادله ذخیره‌ی مورد نیاز: قید ذخیره می‌تواند به صورت نامعادله‌ی فازی ($\tilde{\leq}$) و با تابع عضویت زیر تعریف شود.

$$\mu_{P_R}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq P_R \\ \frac{P_R + \Delta P_R - x}{\Delta P_R} & P_R \leq x \leq P_R + \Delta P_R \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

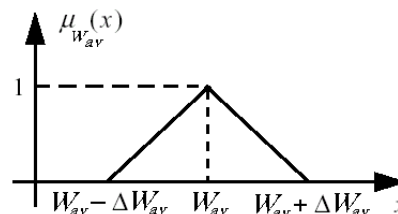
که در آن P_R مقدار طبیعی ذخیره‌ی مورد نیاز می‌باشد. شکل (۴) تابع عضویت معادله ذخیره را نشان می‌دهد.



شکل (۴) تابع عضویت نامعادله توان ذخیره‌ی مورد نیاز

۳- تابع عضویت معادله‌ی توان تولید بادی: قید توان تولیدی در دسترس توربین‌های بادی را می‌توان به صورت یک معادله‌ی فازی ($\tilde{=}$) در نظر گرفت. شکل (۵) تابع عضویت معادله‌ی توان تولیدی بادی را نشان می‌دهد.

$$\mu_{W_{av}}(x) = \begin{cases} 1 & x = W_{av} \\ \frac{x - W_{av} + \Delta W_{av}}{\Delta W_{av}} & W_{av} - \Delta W_{av} \leq x \leq W_{av} \\ \frac{W_{av} + \Delta W_{av} - x}{\Delta W_{av}} & W_{av} \leq x \leq W_{av} + \Delta W_{av} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$



شکل (۵) تابع عضویت معادله برابری تولید توان بادی

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

ملاحظه می‌شود که متغیر z با تجاوز قیود مثلاً درآمد و ذخیره از حدود مجاز کاهش خواهد یافت. لذا کاهش مقدار متغیر z از مقدار یک، ممکن است با ارضاء نشدن کامل قیود در محدوده‌ی مجاز همراه باشد.

$$\max_{z \in [0,1]} z = \max_{z \in [0,1]} \{ \min \{ \mu_J, \mu_{P_d(t)}, \mu_{P_R(t)}, \mu_{W_{av}(w,t)} \} \}$$

$$t = 1, 2, \dots, T \quad w = 1, 2, \dots, N_W \quad (19)$$

رابطه بالا می‌تواند دوباره بازنویسی و به شکل زیر بیان شود:

$$\text{Max } z \quad (20)$$

$$\begin{aligned} z &\leq \mu_J \\ z &\leq \mu_{P_d(t)} \quad , \quad t = 1, 2, \dots, T \\ z &\leq \mu_{P_R(t)} \quad , \quad t = 1, 2, \dots, T \\ z &\leq \mu_{W_{av}(w,t)} \quad , \quad t = 1, 2, \dots, T \quad , \quad w = 1, 2, \dots, N_W \\ 0 &\leq z \leq 1 \end{aligned}$$

این رابطه به‌همراه سایر قیود قطعی مسئله‌ی فوق از جمله ظرفیت واحدهای نیروگاهی متعارف و قیود برنامه‌ریزی تعمیرات واحدها به‌عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی قطعی قابل حل توسط هر الگوریتم استاندارد می‌باشد. رابطه‌ی زیر مسئله‌ی فوق را که از ترکیب رابطه (20) با روابط (18)-(14) بدست آمده، نشان می‌دهد.

$$\text{Max } z \quad (21)$$

تحت قیود زیر

$$\begin{aligned} (z-1) \cdot \Delta J + J_0 - J &\leq 0 \\ (z-1) \cdot \Delta P_d - \sum_{g=1}^{N_G} P_{GD}(g,t) \cdot U(g,t) - \sum_{w=1}^{N_W} P_W(w,t) \cdot V(w,t) - \\ &\sum_{y=1}^{N_Y} P_g(y,t) \cdot M(y,t) + \sum_{y=1}^{N_Y} P_p(y,t) \cdot (1-M(y,t)) + P_d(t) \leq 0 \\ (z-1) \cdot \Delta P_d + \sum_{g=1}^{N_G} P_{GD}(g,t) \cdot U(g,t) + \sum_{w=1}^{N_W} P_W(w,t) \cdot V(w,t) + \\ &\sum_{y=1}^{N_Y} P_g(y,t) \cdot M(y,t) - \sum_{y=1}^{N_Y} P_p(y,t) \cdot (1-M(y,t)) - P_d(t) \leq 0 \\ (z-1) \cdot \Delta P_R + \sum_{g=1}^{N_G} P_{GR}(g,t) \cdot U(g,t) - RESW * \sum_{w=1}^{N_W} P_W(w,t) \cdot V(w,t) - P_R(t) \leq 0 \\ (z-1) \cdot \Delta W_{av}(w,t) - W_{av}(w,t) + P_W(w,t) &\leq 0 \\ (z-1) \cdot \Delta W_{av}(w,t) + W_{av}(w,t) - P_W(w,t) &\leq 0 \\ P_{Gg,min} \leq P_{GD}(g,t) + P_{GR}(g,t) &\leq P_{Gg,max} \\ Eu(y,t) = Eu(y,t-1) - (Pg(y,t) \times M(y,t)) + efp(y) \times [Pp(y,t) \times (1-M(y,t))] \\ El(y,t) = El(y,t-1) + (Pg(y,t) \times M(y,t)) - efp(y) \times [Pp(y,t) \times (1-M(y,t))] \\ \prod_t^{t+d_i} MS(i,t) = 1 \quad \begin{cases} T_i^{Min} \leq t \leq T_i^{Max} - d_i \\ i = 1, 2, \dots, N_G + N_W \end{cases} \\ \sum_{i=1}^{N_G+N_W} MS(i,t) = MT_i \end{aligned}$$

۵- تحلیل شبکه نمونه
در جدول (۱) اطلاعات مربوط به یک سیستم نمونه شامل ۶ واحد نیروگاهی متعارف و ۲ مزرعه بادی که هر یک دارای ۴۰ توربین بادی ۲ مگاواتی و دو واحد آبی تلمبه ذخیره‌ای را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای حالت تولید واحدهای تلمبه ذخیره‌ای بازده یک در نظر گرفته شده، در حالی که بازده در حالت پمپ کردن کمتر از یک است که در جدول اشاره شده است.

شکل (۷) منحنی تغییرات بار سیستم در پریودهای مختلف (یک بار سیستم ۳۰۰ مگاوات است) را نشان می‌دهد.

همچنین میزان توان تولیدی در دسترس هر یک از مزارع بادی با توجه به سرعت وزش باد پیش‌بینی شده، در شکل (۸) نشان داده شده است. همچنین در این مطالعه میزان تغییرات بار پیش‌بینی شده (ΔP_d) و همچنین میزان تغییرات تولیدی بادی (ΔW_{av}) معادل ± 5 درصد در نظر گرفته شده‌اند. هزینه‌های شروع به‌کار (C_{su}) و خاموش شدن (C_{sd}) واحدهای تلمبه ذخیره‌ای طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند

$$C_{su} = 2.5 p_{gmax} \quad (22)$$

$$C_{sd} = 0.1 C_{su} (\$)$$

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول (۱) مشخصات واحدهای تولیدی شبکه‌ی نمونه

مشخصات	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶
حداکثر تولید (MW)	۵۰	۶۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۰۰	۶۰
حداقل تولید (MW)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
هزینه ثابت بهره‌برداری (\$/MWyear)	۱۰۰ ۰۰	۱۰۰۰۰	۸۵۰۰	۷۰۰۰	۸۵۰۰	۱۰۰۰۰
هزینه متغیر بهره‌برداری (\$/MWH)	۰/۹	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۹
ضریب a (\$/MW)	۵۰۰	۶۵۰	۷۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۶۰۰
ضریب b (\$/MWH)	۲۵	۲۶/۵	۱۸	۱۶	۱۵	۲۷/۵
ضریب c (\$/MW ² H)	۰/۱۰	۰/۱۲/۰	۰/۰۴/۰	۰/۰۶/۰	۰/۰۴/۰	۰/۱/۰
مدت تعمیرات (هفته)	۲	۲	۳	۴	۳	۲
هفته ابتدا و انتهای تعمیرات	-۱۸ ۹	۹-۱۸	۲۷-۴۴	۲۷-۴۴	۲۷-۴۴	۹-۱۸

مشخصات	بادی ۱	بادی ۲	مشخصات	پمپ ۱	پمپ ۲
حداکثر تولید (MW)	۸۰	۸۰	حداکثر تولید (MW)	۹۰	۹۰
حداقل تولید (MW)	۰	۰	حداکثر پمپ (MW)	۸۰	۸۰
هزینه ثابت بهره‌برداری (\$/MWyear)	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	راندمان پمپی کردن	۸/۰	۸/۰
هزینه متغیر بهره‌برداری (\$/MWH)	۳	۲	حداکثر انرژی مخزن بالا (MWweek)	۱۲۵۰	۱۲۵۰
ضریب a (\$/MW)	-	-	حداقل انرژی مخزن بالا (MWweek)	۴۵۰	۴۵۰
ضریب b (\$/MWH)	-	-	حداکثر انرژی مخزن پایین (MWweek)	۸۰۰	۸۰۰
ضریب c (\$/MW ² H)	-	-	حداقل انرژی مخزن پایین (MWweek)	۰	۰
مدت تعمیرات (هفته)	۲	۲	هزینه روشن شدن (\$) (\$)	۲۲۵	۲۲۵
هفته ابتدا و انتهای تعمیرات	-	-	هزینه خاموش شدن (\$) (\$)	۵/۲۲	۵/۲۲

۵-۱- تحلیل قطعی مسئله

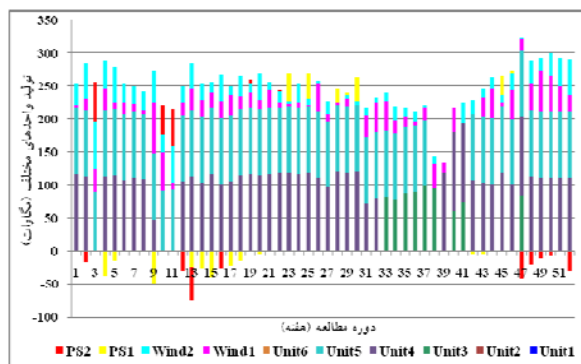
همان‌گونه که اشاره شد ابتدا مسئله‌ی بهینه‌سازی فوق در محیط قطعی و معین که بایستی تمامی قیود ارضاء شوند، حل می‌شود. این مسئله با استفاده از نرم‌افزار GAMS [۹] و برنامه

بهینه‌سازی BARON^۱ و به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی - عدد صحیح^۲ حل شده است. میزان ذخیره‌ی مورد نیاز که توسط واحدهای نیروگاهی متعارف بایستی تأمین شود، شامل

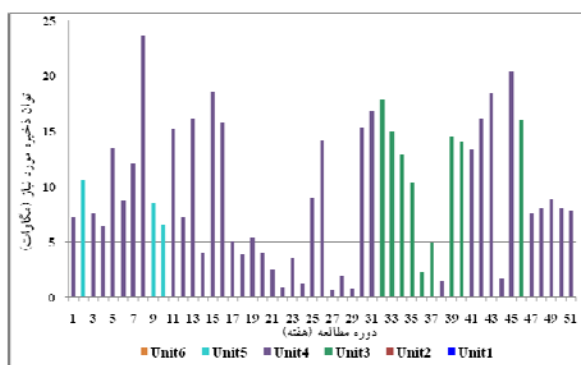
^۱ - Branch and Reduce Optimization Navigator (BARON)

^۲ - Mixed Integer Non Linear Programming (MINLP)

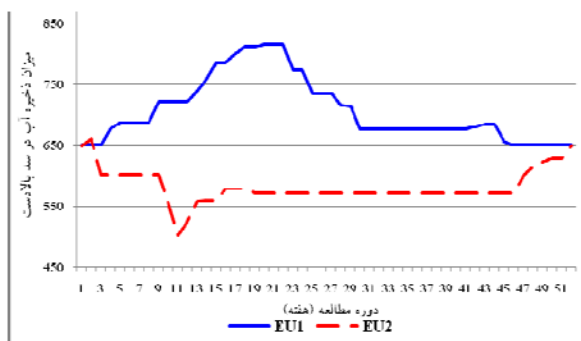
بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۹) سهم هر یک از واحدها در تأمین بار در کل دوره‌ی مطالعه



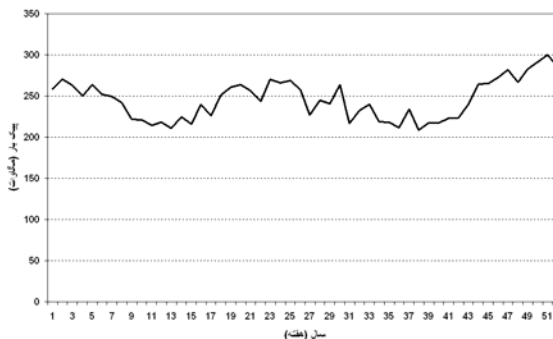
شکل (۱۰) سهم هر یک از واحدها در تأمین توان ذخیره‌ی مورد نیاز



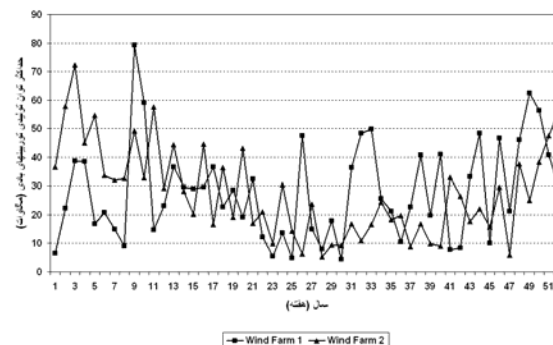
شکل (۱۱) تغییرات میزان آب ذخیره شده در سد بالادست نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای

شکل (۱۱) نیز نحوه‌ی عملکرد واحدهای تلمبه ذخیره‌ای در هفته‌های مختلف از دوره‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بررسی عملکرد دو نیروگاه بیانگر این موضوع است که در تعدادی از هفته‌ها یکی از واحدها در جهت تولید و دیگری در جهت پمپ کردن استفاده شده‌اند. میزان تولید بادی در دسترس، قیمت انرژی، میزان تقاضای بار و هزینه‌ی

۵ درصد از پیک بار و ۱۰ درصد از میزان تولید توان بادی می‌باشد. به عبارت دیگر، شرکت بایستی سهم ۱۰ درصدی از تولید بادی در توان ذخیره‌ی مورد نیاز را تأمین نماید و سپس مازاد تولید خود را در صورت تمایل در بازار توان ذخیره به فروش برساند.



شکل (۷) میزان بار پیش‌بینی شده در افق یک سال با پیوندهای هفتگی



شکل (۸) میزان توان تولیدی مزارع بادی پیش‌بینی شده در افق مطالعه

شکل (۹) سهم هر یک از واحدهای نیروگاهی متعارف، نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای و مزارع بادی را در هر یک از پیوندهای افق زمانی یک ساله برای تأمین بار نشان می‌دهد. شکل (۱۰) نیز سهم هر یک از واحدهای نیروگاهی متعارف را در تأمین توان ذخیره‌ی مورد نیاز سیستم، نشان می‌دهد. کل سود سالانه‌ی این سیستم نمونه، معادل ۵۷/۰۹۸ میلیون دلار بدست آمده است. شکل (۱۱) میزان ذخیره‌ی آب در سد بالادست نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای را نشان می‌دهد.

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

J (سود سیستم) نیز در جدول فوق ارائه شده است. در این جدول برای انتخاب بهترین حالت در میان اجراهای مختلف از یک معیار انتخاب (CI) به صورت زیر استفاده می‌شود [۱۰]:

$$CI = z \cdot \left(\frac{TP_i - \text{Min}\{TP_i\}}{\text{Max}\{TP_i\} - \text{Min}\{TP_i\}} \right) \quad (23)$$

در این معیار، از حاصل ضرب سود مورد نظر در متغیر تصمیم برای انتخاب بهترین سناریو استفاده شده است. در این رابطه $\text{Min}\{TP_i\}$ و $\text{Max}\{TP_i\}$ به ترتیب معادل بیشترین و کمترین مقدار سودی است که در سناریوهای مختلف مسئله بدست آمده‌اند.

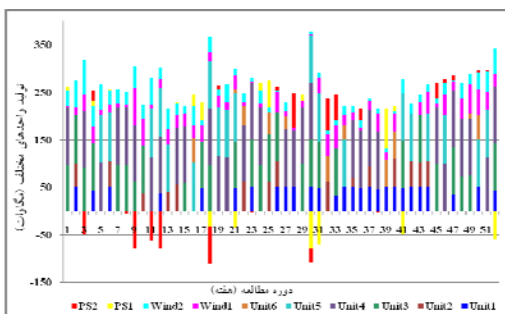
بهره‌برداری از هر کدام از واحدها مجموعه عوامل تعیین‌کننده‌ی نوع رفتار واحدهای تلمبه ذخیره‌ای می‌باشد.

۵-۲- تحلیل فازی مسئله

خلاصه‌ای از نتایج بهینه‌سازی فازی مسئله‌ی فوق در جدول (۲) آورده شده است. تمامی این اجراها با استفاده از نرم‌افزار GAMS و برنامه بدست آمده است. این نتایج با استفاده از مقادیر مختلف J_0 بدست آورده شده‌اند (لازم به ذکر است که مقدار ΔJ معادل ۳۰ درصد J_0 فرض شده است). مقدار متغیر تصمیم‌سازی Z و مقدار تابع هدف

جدول (۲) نتایج اجراهای مختلف مسئله‌ی برنامه‌ریزی بهره‌برداری فازی

شماره اجرا	J_0 (میلیون دلار در سال)	متغیر تصمیم (Z)	سود کل (J) (میلیون دلار در سال)	معیار $z \cdot \left(\frac{TP_i - \text{Min}\{TP_i\}}{\text{Max}\{TP_i\} - \text{Min}\{TP_i\}} \right)$
۱	۴۴/۵۷	۱/۰۰	۴۴/۵۷	۰/۴۸۷۳
۲	۴۵/۲۷۶	۱/۰۰	۴۵/۲۷۶	۰/۵۷۲۶
۳	۴۶/۲۵	۰/۸۱۴	۴۳/۶۷	۰/۳۰۸
۴	۴۷/۴۱	۰/۵۱۷	۴۰/۵۴	۰/۰
۵	۴۹/۴۷۶	۰/۷۱۳	۴۵/۲۱۶	۰/۴۰۳۱
۶	۵۰/۶۵۲	۰/۶۴۰	۴۵/۱۸۲	۰/۳۵۹۱
۷	۵۱/۷۷۸	۰/۷۱۷	۴۷/۳۸۲	۰/۵۹۳۱
۸	۵۲/۷۵۲	۰/۷۵۱	۴۸/۸۱۱	۰/۷۵۱
۹	۵۳/۹۶۲	۰/۶۳۳	۴۶/۱۴۶	۰/۴۲۹
۱۰	۵۵/۳۰۶	۰/۳۶۴	۴۴/۷۵۳	۰/۱۸۵۴
۱۱	۵۵/۷۷۶	۰/۱۳۶	۴۱/۳۱۹	۰/۰۱۲۸



شکل (۱۲) سهم هر یک از واحدها در تأمین بار در کل دوره‌ی مطالعه (مربوط به اجرای شماره ۸)

آشکار است که با توجه به نتایج بدست آمده بهره‌بردار سیستم بایستی نسبت به انتخاب سناریوی مناسب با مصالحه بین هزینه و ارضای قیود مسئله اقدام نماید. اجرای شماره ۸ با داشتن سود کل ۴۸/۸۱۱ میلیون دلار در سال می‌تواند یکی از گزینه‌های خوب باشد. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) میزان مشارکت در برنامه‌ریزی تولید واحدهای مختلف سیستم نمونه را برای تأمین بار و ذخیره‌ی سیستم نشان می‌دهند.

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

فروش انرژی به عنوان یک قیمت گیرنده^۱ شرکت می‌کند بیان نماید. این برنامه‌ریزی که در آن تعمیرات واحدهای متعارف و بادی نیز لحاظ شده است به شرکت‌های تولیدکننده در تصمیم‌گیری و حداکثر نمودن سود آن‌ها کمک می‌نماید. ظهور منابع تولید جدید از جمله انرژی‌های نو، با توجه به عدم قطعیت ذاتی آن‌ها، می‌تواند این مسئله را پیچیده‌تر نماید. به دلایل مختلف سهم این منابع بیشتر شده و در آینده نیز بخش قابل توجهی از این منابع در سیستم‌های قدرت فعالیت خواهند کرد. عدم قطعیت در مورد میزان تولید مزارع بادی مسئله دیگری است که در این مقاله سعی شده تا با به‌کار بردن واحدهای تلمبه ذخیره‌ای رفع شود. همان‌طور که در نمودارهای فوق نیز مشخص می‌باشد در هفته‌هایی که قیمت انرژی نسبتاً بالاتر است واحدهای تلمبه ذخیره‌ای به دلیل پایین‌تر بودن قیمت تمام شده‌ی انرژی تولیدی آن‌ها نسبت به واحدهای متعارف، مشارکت بیشتری در تأمین بار نموده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه شد این روش می‌تواند سناریوهای مختلفی از آرایش واحدها و سود حاصله را به همراه میزان عدم تحقق معادلات مسئله‌ی بهینه‌سازی را در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد، تا در دوره‌ی بهره‌برداری از آن‌ها استفاده نمایند.

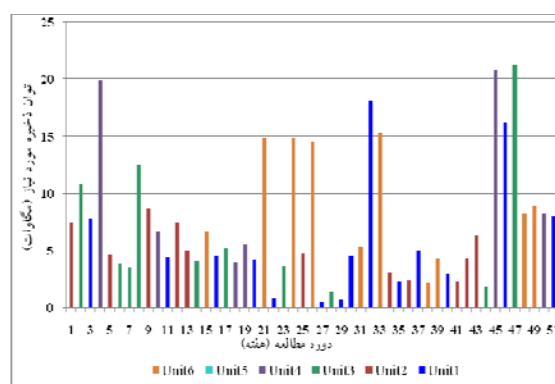
۷- مراجع

- [1] Power Learn, "Overview of power system reliability analysis," Electric Power Engineering Education.
- [۲] ح. سیاهکلی، م. وکیلان، "برنامه‌ریزی بهره‌برداری منابع تولید در سیستم قدرت تجدید ساختار شده با حضور توربین‌های بادی و با استفاده از بهینه‌سازی فازی"، بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران، ۱۳۸۷.

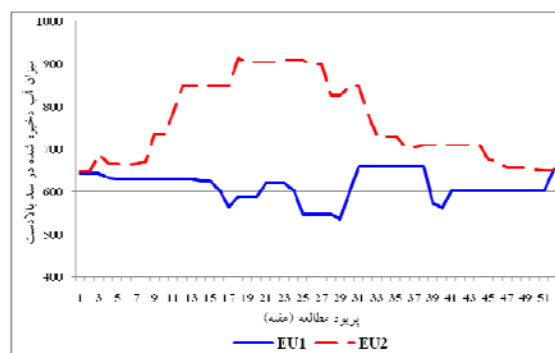
- [3] N. Lu and J. H. Chow and A. A. Desrochers, "Pumped-Storage Hydro-Turbine Bidding Strategies in a Competitive Electricity Market," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, May 2004, pp. 885-895.

^۱ - Price Taker

برای تأمین ذخیره‌ی مورد نیاز که مجموع ذخیره‌ی درخواستی شبکه و همچنین ۱۰ درصد از تولیدات مزارع بادی (که الزام شبکه بوده و قابل فروش نمی‌باشد) تنها از واحدهای نیروگاهی متعارف استفاده شده است. شکل (۱۳) سهم هریک از واحدهای متعارف در تأمین توان ذخیره در هر هفته را نشان می‌دهد. بدین ترتیب توان ذخیره‌ی تولیدی توسط واحدهای متعارف، باید حداقل میزان تغییرات توان تولید بادی (۱۰٪ کل تولید باد) را پوشش دهد.



شکل (۱۳) سهم هر یک از واحدها در تأمین توان ذخیره‌ی مورد نیاز در کل دوره‌ی مطالعه (مربوط به اجرای شماره ۸)



شکل (۱۴) تغییرات میزان آب ذخیره شده در سد بالادست واحدهای تلمبه ذخیره‌ای (مربوط به اجرای شماره ۸)

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شده است تا گوشه‌ای از مسئله‌ی برنامه‌ریزی بهره‌برداری که به برنامه‌ریزی تولید میان‌مدت می‌پردازد را با دیدگاه یک شرکت تولیدکننده برق که در بازار

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [4] B. Bagen, "Reliability and cost/worth evaluation of generating systems utilizing wind and solar energy," *PhD dissertation*, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2005.
- [5] H. Yan and P. B. Luh, "A fuzzy optimization based method for integrated power system scheduling and inter utility power transaction with uncertainties," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 756-763.
- [6] S. Saneifard, N. R. Prasad and H. A. Smolleck, "A fuzzy logic approach to unit commitment," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 988-995.
- [7] C. C. Su and Y. Y. Hsu, "Fuzzy dynamic programming: An application to unit commitment," *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 6, No. 3, Aug. 1991, pp. 1231-1237.
- [8] M. M. El-Saadawi, M. A. Tantawi and E. Tawfik, "A fuzzy optimization-based approach to large scale thermal unit commitment," *Electric Power Systems Research*, Aug. 2004.
- [9] GAMS Release 2.50, "A user's guide," GAMS Development Corporation, 1999.
- [10] H. Siahkali and M. Vakilian, "Fuzzy generation scheduling for a generation company (GenCo) with large scale wind farms," *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, Issue 10, Oct. 2010, pp. 1947-1957.