

## برنامه‌ریزی عملکرد یکپارچه ریزشبه‌ها با در نظر گرفتن ذخیره چرخان و عدم قطعیت‌های تقاضا و تولید منابع تجدیدپذیر

فرهاد کوهیان<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد و علی زنگنه<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق

farhad.shtc@gmail.com

۲- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق

a.zangeneh@srttu.edu

**چکیده:** امروزه به دلایل فنی و اقتصادی استفاده از ریزشبه‌ها به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های ریزشبه‌ها انعطاف‌پذیری آن‌ها است که قادر به عملکرد در دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه اصلی می‌باشند. در این مقاله با استفاده از روش تجزیه بندرز یک مدل دوسطحی برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه‌ها به‌منظور عملکرد یکپارچه آن بین حالت‌های اتصال به شبکه و جزیره‌ای ارائه شده است. همچنین در مدل پیشنهادی، با در نظر گرفتن اثر یک ریزشبه مجاور فرض گردیده که ریزشبه اصلی فقط در حالت جزیره‌ای قادر به تبادل انرژی با آن هست. مدل ارائه شده شامل یک مسئله اصلی برای عملکرد در حالت اتصال به شبکه اصلی و یک زیر مسئله جهت عملکرد در حالت جزیره‌ای است. تابع هدف مسئله اصلی سعی در حداقل نمودن هزینه عملکرد کل ریزشبه شامل هزینه سوخت، هزینه راه‌اندازی، هزینه ذخیره چرخان، هزینه خرید توان از شبکه بالادست و ریزشبه مجاور دارد؛ درحالی‌که تابع هدف زیر مسئله به بررسی کافی بودن تولید ریزشبه و تأمین بدون وقفه بارها در ریزشبه در حالت جزیره‌ای می‌پردازد. عدم قطعیت‌های مربوط به توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، قیمت انرژی الکتریکی و بار ثابت توسط روش تخمین دونقطه‌ای مدل‌سازی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی تولید، ریزشبه، منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌ساز، تجزیه بندرز، تخمین دونقطه‌ای، ذخیره چرخان.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۶/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر علی زنگنه

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران - لویزان - خیابان شهید شعبانلو - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

مدل ارائه شده در [۶] شامل اصلاح برنامه ریزی‌های انجام شده برای واحدهای تولیدی قابل تنظیم، شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز و بارهای قابل تنظیم است که تا حد ممکن موجب کاهش عدم تطابق در حالت جزیره‌ای و کاهش نیاز به جابه‌جایی بار و قطعی بار و در نتیجه کاهش هزینه عملکرد ریزشبه می‌شود. به منظور توسعه مدل مذکور، موارد زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۱. عدم قطعیت پارامترهای تصادفی ریزشبه توسط روش تخمین دونقطه‌ای (TPE).

۲. ذخیره چرخان، جهت آنکه میزان تغییرات تولید واحدها در حالت جزیره‌ای قابل اعمال باشد و ریزشبه قابلیت عملکرد در حالت جزیره‌ای را داشته باشد.

۳. محدودیت‌های نرخ شیب افزایشی و کاهش‌ی هر واحد برای زمان تغییر عملکرد ریزشبه از حالت اتصال به شبکه به حالت جزیره‌ای.

۴. محدود نمودن تغییرات برنامه‌ریزی انجام شده برای بارهای قابل تنظیم ریزشبه به منظور کاهش نارضایتی برای این مصرف‌کننده‌ها در زمان تغییر عملکرد ریزشبه از حالت اتصال به شبکه اصلی به حالت جزیره‌ای (محدود نمودن جابه‌جایی بارهای حداکثر به مقدار ۲ ساعت). همچنین در این مقاله، یک ریزشبه مجاور در نظر گرفته شده و فرض شده که ریزشبه اصلی همواره به آن متصل بوده؛ اما فقط در حالت جزیره‌ای مجاز به تبادل انرژی با آن هست.

سایر قسمت‌های مقاله به صورت زیر است:

در بخش دوم روند حل مدل دوسطحی برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه ارائه شده است. بخش سوم شامل معرفی ساختار و فرمول‌بندی مدل دوسطحی است. الگوریتم تخمین دونقطه‌ای در بخش چهارم توضیح داده شده و در بخش پنجم، مطالعات موردی و نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری کلی مقاله ارائه گردیده است.

## ۲- روند حل مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه

شکل (۱) روند حل مدل دوسطحی پیشنهادی را نشان می‌دهد که در این روند، ابتدا مسئله  $MP$  و سپس مسئله  $SP$  حل می‌گردد. با حل مسئله  $SP$  چنانچه  $w_t$  مخالف صفر باشد، برش بندرز به مسئله  $MP$  جهت اصلاح برنامه در مدارقرارگرفتن واحدهای تولیدی (UC)، برنامه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز و برنامه‌ریزی انجام شده برای بارهای قابل تنظیم اضافه می‌گردد. مسئله  $MP$  مجدد حل شده و نتایج  $I_{it}$ ،  $U_{et}$ ،  $V_{et}$  و  $Z_{ets}$  برای زیر مسئله فرستاده می‌شود. با حل مسئله  $SP$  اگر همچنان  $w_t$  مخالف صفر بوده روند بالا تکرار می‌گردد. چنانچه با اضافه شدن برش بندرز مقدار  $w_t$  (عدم تطابق) به ازای چند تکرار دیگر کاهش پیدا نکند، محدوده زمانی تعیین شده برای بارهای قابل

ریزشبه، شبکه توزیع کوچکی است که با داشتن اجزایی نظیر منابع تولید پراکنده (تجدیدپذیر و یا تجدید ناپذیر)، منابع ذخیره‌ساز انرژی پراکنده (خازن، چرخ طیار، باتری)، بارهای الکتریکی و حرارتی قادر به فعالیت در دو حالت جزیره‌ای و یا متصل به شبکه سراسری است. تعدد تجهیزات و فن‌آوری‌های قابل برنامه‌ریزی و یا غیرقابل برنامه‌ریزی در ریزشبه‌ها، موجب پیچیدگی بهره‌برداری و مدیریت انرژی آن‌ها در مقایسه با شبکه‌های سنتی شده است. در یک ریزشبه، سیستم مدیریت انرژی مسئول تنظیم بهینه توان واحدهای تولید پراکنده، حالت عملکرد واحدهای ذخیره‌ساز انرژی، تأمین اقتصادی بارهای مصرفی و مدیریت عملکرد حالت گذرای ریزشبه در شرایط جزیره‌ای و متصل به شبکه هست. به‌طور کلی هدف سیستم مدیریت انرژی، هماهنگی و بهره‌برداری از اجزای مختلف ریزشبه به منظور برقرسانی ایمن، قابل اطمینان، کیفیت بالا و کمترین آلودگی زیست‌محیطی به اقتصادی‌ترین روش ممکن است.

در مقالات انواع مدل‌های متمرکز و توزیع شده برنامه‌ریزی ریزشبه‌ها، به صورت گسترده‌ای بررسی شده است. هر دو روش دارای معایب و مزایایی هستند؛ اما به‌طور کلی روش متمرکز دارای ویژگی‌های مطلوب‌تری بوده و ایراد اصلی آن را می‌توان در انعطاف‌پذیری کم به هنگام اضافه نمودن اجزای جدید به مدل و حجم بالای محاسبات دانست [۱]. در این میان، بیشتر مقالات به برنامه‌ریزی ریزشبه در یکی از دو حالت اتصال به شبکه سراسری یا جزیره‌ای پرداخته و مطالعات کمتری بر روی عملکرد ریزشبه در هر دو حالت جزیره‌ای و اتصال به شبکه انجام شده است. به منظور در نظر گرفتن عملکرد ریزشبه در هر دو حالت بهره‌برداری، در [۲] از ذخیره انرژی اضافی جهت عملکرد ریزشبه در حالت جزیره‌ای، در [۳] از مدل پاسخگویی بار، در [۴] از تعیین میزان ذخیره‌سازی انرژی موردنیاز برای تضمین عملکرد مطلوب در حالت جزیره‌ای و در [۵] از دستگاه‌های ذخیره‌ساز برای تعادل توان و کاهش تبادل توان با شبکه اصلی در حالت اتصال به شبکه و اطمینان از انتقال موفق به حالت جزیره‌ای استفاده شده است. خدایی در [۶] یک مدل دوسطحی با استفاده از روش تجزیه بندرز ارائه نموده است. از نقاط قوت مدل می‌توان، استفاده از تجزیه بندرز به منظور کاهش زمان و حجم محاسبات، در نظر گرفتن قابلیت عملکرد ریزشبه در حالت جزیره‌ای در هر زمان، تأمین انرژی مصرف‌کنندگان در محدوده زمانی مشخص شده توسط آن‌ها و در صورت نیاز حداقل جابه‌جایی بار به منظور تضمین عملکرد ریزشبه در حالت جزیره‌ای، اشاره نمود.

در این مقاله به منظور برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه و قابلیت عملکرد یکپارچه آن در هر دو حالت اتصال به شبکه اصلی و جزیره‌ای یک مدل دوسطحی با استفاده از روش تجزیه بندرز و مبتنی بر توسعه مدل [۶] ارائه شده است.

$$P_{it} - P_i(t-1) \leq UR_i \quad (3)$$

$$P_i(t-1) - P_{it} \leq DR_i \quad (4)$$

$$T_{ion} \geq UT_i (I_{it} - I_i(t-1)) \quad (5)$$

$$T_{ioff} \geq DT_i (I_i(t-1) - I_{it}) \quad (6)$$

$$P_{et} \leq P_{edch} \max_{uet} - P_{ech} \min_{vet} \quad (7)$$

$$P_{et} \geq P_{edch} \min_{uet} - P_{ech} \max_{vet} \quad (8)$$

$$C_{emin} \leq C_{et} \leq C_{emax} \quad (9)$$

$$C_{eend} = C_{estart} \quad (10)$$

$$T_e^{ch} \geq MC_e (u_{et} - u_e(t-1)) \quad (11)$$

$$T_e^{dch} \geq MDe (v_{et} - v_e(t-1)) \quad (12)$$

$$u_{et} + v_{et} \leq 1 \quad (13)$$

$$D_d^{min} z_{dt} \leq D_{dt} \leq D_d^{max} z_{dt} \quad (14)$$

$$\sum_{t \in [\alpha_d - \beta_d]} D_{dt} = E_d \quad (15)$$

$$T_{don} \geq MU_d (z_{dt} - z_d(t-1)) \quad (16)$$

$$\sum_i P_{it} + \sum_r P_{rt} + \sum_e P_{et} + P_{mt} = \sum_a D_{dt} + L_t \quad (17)$$

$$P_{min} \leq P_{mt} \leq P_{max} \quad (18)$$

$$SR_{it} = (I_{it} P_{i,max}) - P_{it} \quad (19)$$

$$SR_{it} \geq 0 \quad (20)$$

$$SR_{up,t} = P_{max} - P_{mt} \quad (21)$$

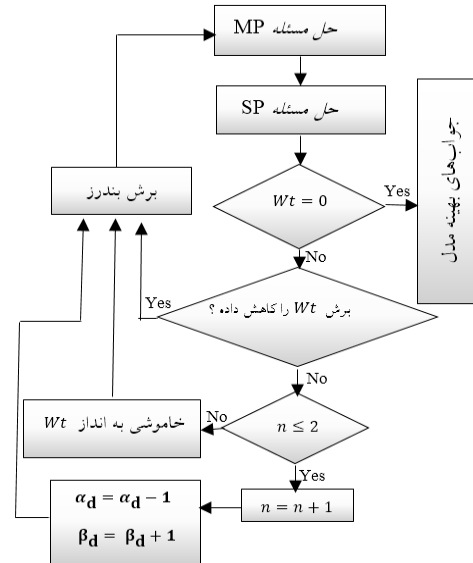
$$SR_{up,t} \leq P_{max} \quad (22)$$

$$SR_{mg,t} \leq \sum_i SR_{it} + SR_{up,t} \quad (23)$$

$$SR_{mg,t} \geq \sigma_d \times L_t + \sigma_r \times \sum_r P_{rt} \quad (24)$$

رابطه (۱) تابع هدف مسئله MP است که هدف از آن حداقل نمودن هزینه عملکرد ریزشبه که شامل حداقل نمودن هزینه تولید واحدهای ریزشبه، هزینه ذخیره چرخان، خرید انرژی از شبکه اصلی و همچنین افزایش درآمد ناشی از فروش انرژی به شبکه اصلی به صورت هم‌زمان است. روابط (۲) تا (۶) بیان‌کننده محدودیت‌های لازم جهت برنامه‌ریزی در مدارقرارگرفتن واحدهای تولیدی (UC) ریزشبه است. محدودیت تولید واحدهای قابل تنظیم ریزشبه در رابطه (۲) ارائه شده و روابط (۳) و (۴) بیانگر محدودیت‌های نرخ شیب تولید و نرخ کاهش تولید است. همچنین محدودیت‌های حداقل زمان کار و توقف است واحدها در (۵) و (۶) بیان شده است که روابط دقیق این محدودیت‌ها به منظور پیاده‌سازی در [۷] و [۸] آمده است. روابط (۷) تا (۱۳) مربوطه به محدودیت‌های سیستم ذخیره‌ساز است. محدودیت حداقل و حداکثر شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز در (۷) و (۸) ارائه شده است.  $P_{et}$  بیانگر میزان توان ذخیره‌ساز بوده که علامت منفی برای حالت شارژ و علامت مثبت برای حالت دشارژ استفاده می‌شود. رابطه (۹) محدودیت ظرفیت ذخیره‌ساز را مدل نموده و در (۱۰) تضمین می‌شود که انرژی نهایی ذخیره‌ساز با انرژی اولیه آن برابر باشد. به طور مشابه با (۵) و (۶)، محدودیت حداقل زمان شارژ و

تنظیم به‌اندازه یک ساعت از هر دو سمت بزرگ‌تر شده و مسئله MP و SP به‌طور مجدد حل می‌شوند. بزرگ نمودن محدوده زمانی بارهای قابل تنظیم نهایت دو بار تکرار می‌شود و اگر همچنان  $W_t$  مخالف صفر باشد به همان میزان از بار قابل قطع ریزشبه خاموشی داده می‌شود.



شکل (۱): الگوریتم مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه

### ۳- ساختار مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه

مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه شامل یک مسئله MP و یک مسئله SP است که در آن انواع محدودیت‌های فنی و اقتصادی دیده شده است. محدودیت‌های دیده شده در هر کدام از مسائل MP و SP به محدودیت‌های جادشدنی و متصل طبقه‌بندی شده‌اند. محدودیت‌های جادشدنی همانند قیود تولید و محدودیت‌های حداقل زمان توقف و حداقل زمان کار که وابسته به واحدهای حرارتی هستند و محدودیت‌های متصل نظیر قیود تعادل توان و قیود ذخیره چرخان موردنیاز که توسط تمام واحدهای تولید در سیستم تحت تأثیر واقع می‌شوند. لیست نمادهای به کاررفته در فرمول‌بندی مدل به همراه توضیحات مربوط در جدول (۱) در بخش ضمیمه آمده است.

#### ۳-۱- فرمول‌بندی مسئله اصلی (MP)

تابع هدف و قیود مسئله MP در زیر آورده شده است. مسئله MP به بررسی عملکرد ریزشبه در حالت اتصال به شبکه می‌پردازد.

$$\text{Min} \left\{ \begin{aligned} & \sum_i \sum_t (c_i P_{it} + S U_i f_{it} + S D_i k_{it}) + \\ & \sum_t \rho_{mt} \times p_{mt} + \\ & \sum_d \sum_t K_d \times \Delta_d \times D_{dt} + \sum_t SR_{mg,t} \times C_r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$P_i^{min} I_{it} \leq P_{it} \leq P_i^{max} I_{it} \quad (2)$$

(۲۷) محدودیت تعادل توان در حالت جزیره‌ای را نمایش می‌دهد و روابط (۲۸) و (۲۹) به ترتیب تضمین می‌نمایند که در زمان شروع حالت جزیره‌ای حداکثر تغییرات توان واحدهای تولیدی ریزش‌بکه برابر با نرخ شیب یا کاهش تولیدی آن واحد باشد و حداکثر تغییرات توان تأمینی برای بارهای قابل تنظیم نیز برابر با مقدار مشخص DD باشد تا در زمان شروع حالت جزیره‌ای حداقل نارضایتی را برای مصرف‌کنندگان دربرداشته باشد. رابطه (۳۰) محدودیت تبادل توان ریزش‌بکه با ریزش‌بکه مجاور در حالت جزیره‌ای را نمایش می‌دهد.

محدودیت‌های ذکرشده در روابط (۲) تا (۱۸) در مسئله SP نیز به‌طور مشابه اعمال می‌گردد. البته باید توجه نمود که کلیه محدودیت‌ها باید در تمام سناریوها برقرار بوده و لذا شاخص  $s$  برای تمام این محدودیت‌ها در مسئله SP در نظر گرفته شده است. رابطه (۳۱) بیان‌کننده برش بندرز است.

$$\begin{aligned} & \hat{w}_{sm} + \sum_i \sum_t \left\{ p_i^{max} \bar{\lambda}_{its} (I_{its} - \hat{I}_{it}) - \right. \\ & \left. p_i^{min} \underline{\lambda}_{its} (I_{itsm} - \hat{I}_{its}) \right\} + \\ & \sum_e \sum_t \left\{ p_e^{ch max} \bar{\mu}_{ets}^{ch} (U_{ets} - \hat{U}_{et}) - \right. \\ & \left. p_e^{ch min} \underline{\mu}_{ets}^{ch} (U_{ets} - \hat{U}_{ts}) \right\} + \\ & \sum_e \sum_t \left\{ p_e^{dch max} \bar{\mu}_{ets}^{dch} (V_{ets} - \hat{V}_{et}) - \right. \\ & \left. p_e^{dch min} \underline{\mu}_{ets}^{dch} (V_{ets} - \hat{V}_{ts}) \right\} + \\ & \sum_a \sum_t \left\{ D_d^{max} \bar{\pi}_{dts} (Z_{dts} - \hat{Z}_{dt}) - \right. \\ & \left. D_d^{min} \underline{\pi}_{dts} (Z_{dts} - \hat{Z}_{dt}) \right\} \leq 0 \quad (31) \end{aligned}$$

$\mu$  و  $\pi$  متغیرهای دوگان متناظر با برنامه واحدهای تولیدی، شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز و بارهای قابل تنظیم است.  $\hat{U}_{ets}$ ،  $\hat{I}_{its}$  و  $\hat{V}_{ets}$  و  $\hat{Z}_{dts}$  برنامه‌ریزی انجام‌شده برای واحدهای تولیدی، شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز و همچنین بارهای قابل تنظیم است که در مسئله MP به‌دست‌آمده است. اطلاعات بیشتر در مورد نحوه پیاده‌سازی الگوریتم بندرز در [۸] آمده است.

#### ۴- الگوریتم تخمین دونقطه‌ای

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در برنامه‌ریزی ریزش‌بکه باید در نظر گرفته شود عدم قطعیت ناشی از پارامترهای تصادفی ریزش‌بکه است. مزیت روش TPE نسبت به روش‌هایی مانند مونت‌کارلو این است که احتیاج به تعداد حل کمتری خصوصاً برای مسائل با تعداد پارامترهای تصادفی زیاد داشته و همچنین نیاز کمتری به شناخت دقیق نسبت به توابع احتمالی متغیرهای غیرقطعی مسئله هست.

الگوریتم تخمین نقطه‌ای به‌صورت دو روش  $2m$  و  $2m + 1$  در مسائل مورد‌استفاده قرار می‌گیرد. در روش  $2m$  تابع F فقط از ۲ تمرکز برای هر متغیر تصادفی ورودی استفاده می‌نماید و با  $m$  متغیر تصادفی ورودی، مسئله به تعداد  $2 \times m$  بار باید حل گردد. در روش  $2m + 1$  - علاوه بر آنکه مسئله به تعداد  $2 \times m$  بار حل می‌شود یک‌بار نیز

دشارژ سیستم ذخیره‌ساز در روابط (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است. همچنین رابطه (۱۳) بیانگر این مسئله است که ذخیره‌ساز نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان شارژ و دشارژ شود.

محدودیت‌های مربوط به بارهای قابل تنظیم در روابط (۱۴) تا (۱۶) نمایش داده شده است. حداقل و حداکثر انرژی تأمین‌شده بارهای قابل تنظیم در هر بازه زمانی در رابطه (۱۴) ارائه شده است. رابطه (۱۵) بیان می‌کند که مقدار انرژی تأمینی برای بارهای قابل تنظیم در محدوده زمانی  $\alpha_d - \beta_d$  باید برابر با مقدار انرژی تعیین‌شده  $Ed$  باشد. محدودیت حداقل زمان لازم برای تأمین انرژی بارهای قابل تنظیم در (۱۶) ارائه شده است. همچنین محدودیت تعادل توان میان تولید و مصرف در ریزش‌بکه و محدودیت حداقل و حداکثر توان ارسالی یا دریافتی از شبکه اصلی به ترتیب در روابط (۱۷) و (۱۸) نمایش داده شده است.

روابط (۱۹) تا (۲۴) محدودیت‌های لازم جهت ذخیره چرخان در ریزش‌بکه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۹) معرف حداکثر ذخیره‌ای است که هر کدام از واحدهای حرارتی می‌توانند ارائه دهند. این مقدار همواره مثبت بوده که این مسئله در رابطه (۲۰) دیده شده است. روابط (۲۱) و (۲۲) بیان‌کننده حداکثر میزان ذخیره‌ای است که می‌توان از شبکه بالادست (شبکه سراسری) تهیه نمود و این مقدار از حداکثر توان قابل دریافت از آن کمتر است. رابطه (۲۳) حداکثر میزان ذخیره چرخان در دسترس و رابطه (۲۴) میزان ذخیره چرخان موردنیاز را نشان می‌دهد [۹].

#### ۳-۲- فرمول‌بندی زیر مسئله (SP)

تابع هدف و قیود مسئله SP در این بخش آورده شده است. مسئله SP به‌منظور عملکرد ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای در نظر گرفته شده است.

$$Min wt = \sum_s w_s \quad (25)$$

$$w_s = \sum_t (SL1_{ts} + SL2_{ts}) \quad (26)$$

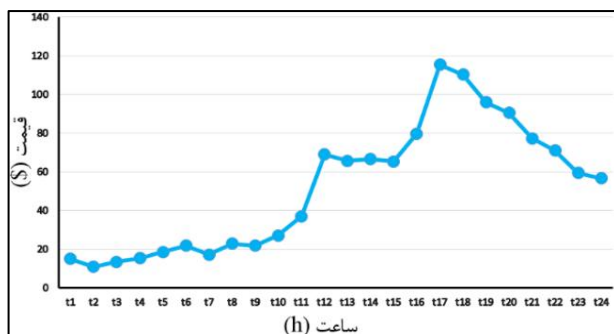
$$\sum_i P_{its} + \sum_r P_{rt} + PM_{ts} + Pcm_{ts} + SL1_{ts} - SL2_{ts} = \sum_d D_{dts} + L_t \quad (27)$$

$$|P_{its} - \hat{P}_{it}| \leq UR_i \quad (28)$$

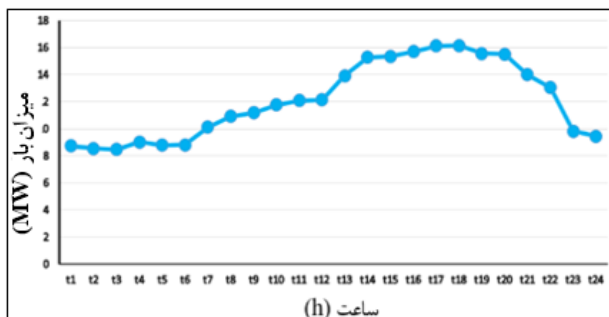
$$|D_{dts} - \hat{D}_{dt}| \leq DD \quad (29)$$

$$PCm^{min} \times (1 - UMts) \leq PCm_t \leq PCm^{max} \times (1 - UMts) \quad (30)$$

تابع هدف مسئله SP در (۲۵) نشان داده شده است. این تابع (wt) بیانگر عدم تطابق کلی میان تولید و مصرف در ریزش‌بکه است. از آنجایی که مدت‌زمان جزیره‌ای شدن و زمان رخ داد آن مشخص نیست برای مدت‌زمان مشخص جزیره‌ای شدن  $\tau$  (ساعت)، ۲۴ سناریو ( $s$ ) در نظر گرفته شده است.  $w_s$  میزان عدم تطابق برای هر سناریو است و  $SL1_{ts}$  و  $SL2_{ts}$  متغیرهای اسلک این مسئله هستند. رابطه



شکل (۲): قیمت انرژی الکتریکی شبکه اصلی در هر ساعت



شکل (۳): بار ثابت ریزشبه در هر ساعت

مدل دوسطحی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MIP) پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS و با استفاده از حل‌کننده CPLEX [۱۲ و ۱۱] پیاده‌سازی شده و الگوریتم تخمین دونقطه‌ای جهت بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل در نرم‌افزار MATLAB اجرا و دو نرم‌افزار باهم لینک شده‌اند.

چهار پارامتر عدم قطعیت در نظر گرفته شده در این مقاله عبارت‌اند از: قیمت انرژی الکتریکی شبکه سراسری، مقدار بار ثابت ریزشبه و مقدار توان خروجی دو واحد تجدیدپذیر. با توجه به آنچه در بخش چهارم در مورد الگوریتم تخمین دونقطه‌ای گفته شد، مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه به ازای هر کدام از تمرکزهای به‌دست‌آمده برای ۴ پارامتر عدم قطعیت، یک‌بار و به ازای تمام مقادیر پیش‌بینی‌شده (میانگین) آن‌ها نیز یک‌بار حل شده که در مجموع مدل برنامه‌ریزی ۹ بار حل می‌گردد.

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی جهت بهره‌برداری بهینه و یکپارچه ریزشبه، دو حالت مطالعاتی زیر تعریف و نتایج به‌دست‌آمده تحلیل و بررسی می‌گردند.

حالت مطالعاتی ۱: برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبه در حالت اتصال

به شبکه سراسری.

حالت مطالعاتی ۲: برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبه در حالت جزیره-ای و معیار T-10 (جزیره‌ای شدن به مدت ۱۰ ساعت) در هر دو حالت با در نظر گرفتن ریزشبه مجاور و بدون در نظر گرفتن آن.

بر اساس مقادیر متوسط متغیرهای ورودی تصادفی حل شده و لذا به این روش  $2m + 1$  گفته می‌شود. در این مقاله از روش  $2m + 1$  استفاده شده که الگوریتم و نحوه پیاده‌سازی آن در مرجع [۱۰] آورده شده است.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

ریزشبه در نظر گرفته شده از ۴ واحد قابل کنترل، ۲ واحد تجدیدپذیر، یک عدد سیستم ذخیره‌ساز و ۵ بار قابل تنظیم تشکیل شده که مشخصات آن‌ها به ترتیب در جدول‌های (۲) تا (۴) ارائه شده است [۶]. شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب قیمت انرژی الکتریکی شبکه سراسری و میزان بار ثابت ریزشبه در هر ساعت را نشان می‌دهد. حداکثر توان ارسالی و یا دریافتی از شبکه اصلی و ریزشبه مجاور به ترتیب در هر ساعت برابر  $10\text{ MW}$  و  $2\text{ MW}$  است. قیمت ذخیره چرخان برابر  $0/1$  و ضریب خطای پیش‌بینی تولید واحدهای تجدیدپذیر  $\sigma_r$  برابر  $0/13$  در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مشخصات واحدهای تولیدی

unit	Type	Cost Coefficient (\$/MWh)	Min-max Capacity (MW)	Min up/down time (h)	Ramp up/down Rate (MW/h)
۱	قابل کنترل	۲۷/۷	۱-۵	۳	۲/۵
۲	قابل کنترل	۳۹/۱	۱-۵	۳	۲/۵
۳	قابل کنترل	۶۱/۳	۰/۸-۳	۱	۳
۴	قابل کنترل	۶۵/۶	۰/۸-۳	۱	۳
۵	تجدید پذیر	۰	۰-۱	-	-
۶	تجدید پذیر	۰	۰-۱/۵	-	-

جدول (۳): مشخصات سیستم ذخیره‌ساز

Storage	Capacity (MWh)	Min-Max Charging/Discharging Power (MW)	Min Charging/Discharging Time (h)
باتری	۱۰	۰/۴-۲	۵

جدول (۴): مشخصات بارهای قابل تنظیم

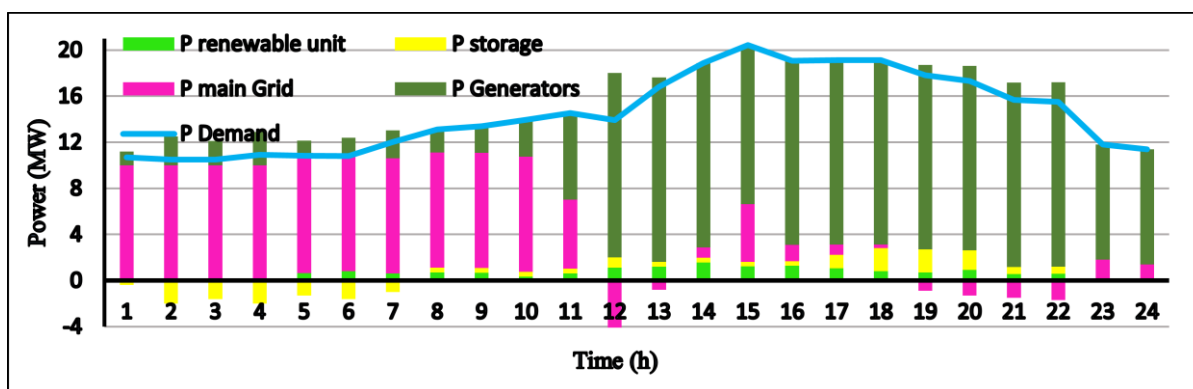
Load	Type	Min-Max Capacity (MW)	Required Energy (MWh)	Start-End Time (h)	Min Up Time (h)
۱	قابل انتقال	۰-۰/۴	۱/۶	۱۱-۱۵	۱
۲	قابل انتقال	۰-۰/۴	۱/۶	۱۵-۱۹	۱
۳	قابل انتقال	۰/۰۲-۰/۸	۲/۴	۱۶-۱۸	۱
۴	قابل انتقال	۰/۰۲-۰/۸	۲/۴	۱۴-۲۲	۱
۵	قابل قطع	۱/۸-۲	۴۷	۱-۲۴	۲۴

جدول (۵): برنامه‌ریزی انجام شده جهت واحدهای قابل کنترل در حالت اتصال به شبکه اصلی

تولید	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
واحد ۱	۱/۲	۲/۵	۲/۱	۲/۹	۱/۵	۱/۶	۲/۴	۲	۲/۳	۳/۲	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
واحد ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
واحد ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
واحد ۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۳	۳	۰/۸	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳

جدول (۶): برنامه‌ریزی انجام شده جهت بارهای قابل تنظیم در حالت اتصال به شبکه اصلی

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
بار ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	۰	۰/۴	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸	۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بار ۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۲



شکل (۴): نتایج بهره‌برداری ریزشبه در حالت اتصال به شبکه اصلی

### ۵-۱- حالت مطالعاتی ۱: برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبه در حالت اتصال به شبکه سراسری

کرده است. در ساعات اوج مصرف نیز به دلیل بالا بودن قیمت انرژی شبکه اصلی، واحدها میزان توان بیشتری تولید کرده و خرید انرژی از شبکه اصلی کمتر است و همچنین در این ساعات ذخیره‌ساز دشارژ شد. در ساعات ۱۹ تا ۲۲ به دلیل بالا بودن قیمت انرژی شبکه اصلی نسبت به هزینه تولید واحدها و نیز تضمین تأمین انرژی مصرف‌کنندگان در این ساعات مازاد تولید توان به شبکه اصلی فرستاده شده و به‌عنوان سود در تابع هدف در نظر گرفته شده و باعث کاهش هزینه عملکرد ریزشبه می‌شود. همان‌طور که در جدول (۶) نیز نشان داده شده است بارهای قابل تنظیم در بازه زمانی مشخص شده خود برنامه‌ریزی شده‌اند از این رو ضریب جریمه ناشی از انتقال بارهای قابل تنظیم در تابع هدف برابر صفر است.

در این حالت فرض شده که در طول افق برنامه‌ریزی (۲۴ ساعت)، ریزشبه همواره به شبکه اصلی متصل است. مدت‌زمان شبیه‌سازی ۴۱ ثانیه و هزینه عملکرد ریزشبه برابر \$ ۱۱۳۴۳ بوده است. میزان ذخیره چرخان برابر ۳۴/۵ MW و هزینه ناشی از آن برابر \$ ۶۹ است. نتایج برنامه‌ریزی انجام شده برای واحدهای قابل کنترل ریزشبه در حالت اتصال به شبکه سراسری در جدول (۵) و برنامه‌ریزی انجام شده جهت بارهای قابل تنظیم در جدول (۶) نشان داده شده است، سلول‌های رنگ‌شده در این جدول نشان‌دهنده محدوده زمانی تعیین شده توسط هرکدام از مصرف‌کنندگان جهت تأمین انرژی موردنیاز آن‌ها است. نتایج بهره‌برداری ریزشبه در حالت اتصال به شبکه اصلی در شکل (۴) نشان می‌دهد که تا پیش از ساعت ۱۱ به دلیل پایین بودن قیمت انرژی الکتریکی شبکه اصلی نسبت به هزینه تولید توان واحدهای قابل کنترل،

## ۲-۵- حالت مطالعاتی ۲: برنامه‌ریزی عملکرد

### ریزشبه در حالت جزیره‌ای و معیار T-10

ریزشبه در پاسخ به اختلالات پیش‌آمده در شبکه اصلی باید قابلیت سوئیچ به حالت جزیره‌ای در هر ساعت و برای هر مدت‌زمان مشخص را داشته باشد و بعد از برطرف شدن این اختلالات، مجدد به شبکه اصلی

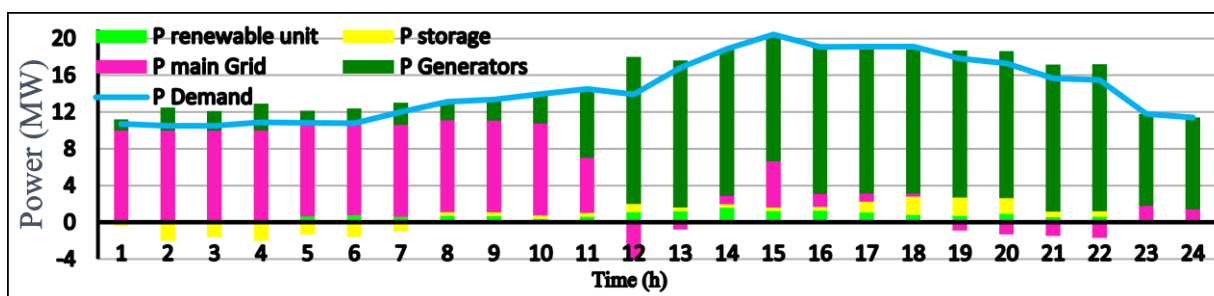
متصل گردد. برای توصیف قابلیت ریزشبه برای عملکرد در حالت جزیره‌ای با توجه به متغیر بودن زمان شروع حالت جزیره‌ای، معیار جزیره‌ای  $T-t$  ارائه شده است.  $T$  نشان‌دهنده تعداد ساعت متوالی است که ریزشبه قابلیت عملکرد در حالت جزیره‌ای به صورت پیوسته را بایستی داشته باشد. به علت عدم قطعیت در زمان شروع حالت جزیره‌ای، برای مدت‌زمان مشخص عملکرد در حالت جزیره‌ای، ۲۴ سناریو به‌منظور

جدول (۷): برنامه‌ریزی انجام‌شده جهت واحدهای قابل کنترل در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای T-10

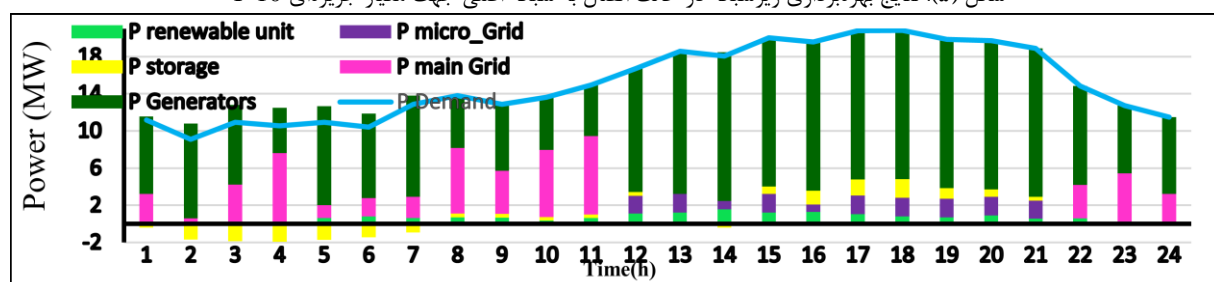
t24	t23	t22	t21	t20	t19	t18	t17	t16	t15	t14	t13	t12	t11	t10	t9	t8	t7	t6	t5	t4	t3	t2	t1	واحد
۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۲/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۴/۱	۳/۲	۳/۳	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۲/۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	
-۱/۸	-۱/۸	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	
۰	۰	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱/۱	۳	۳	۳	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	

جدول (۸): برنامه‌ریزی انجام‌شده جهت بارهای قابل تنظیم در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای T-10

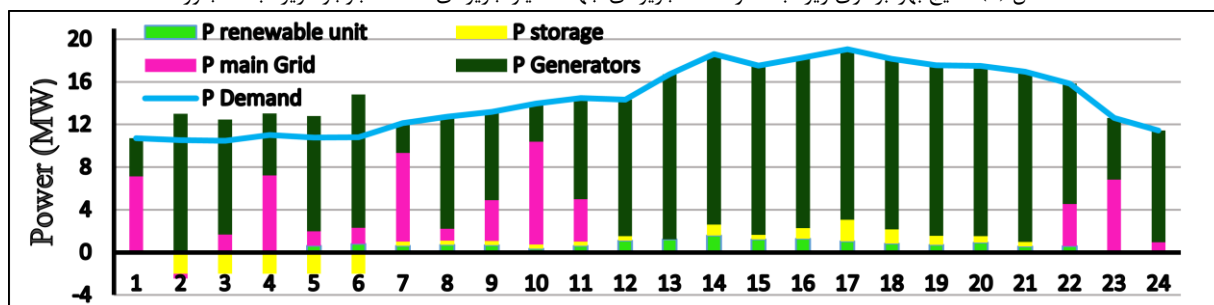
t24	t23	t22	t21	t20	t19	t18	t17	t16	t15	t14	t13	t12	t11	t10	t9	t8	t7	t6	t5	t4	t3	t2	t1	بار
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱/۴	-۱/۴	-۱/۴	۰	-۱/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	-۱/۴	-۱/۴	۰	-۱/۴	-۱/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱/۸	-۱/۸	-۱/۸	۰	-۱/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۰	-۱/۲	-۱/۲	-۱/۲	۰	۰	۰	۰	۰	-۱/۸	-۱/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۲	۲	۲	۲	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	



شکل (۵): نتایج بهره‌برداری ریزشبه در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای T-10



شکل (۶): نتایج بهره‌برداری ریزشبه در حالت جزیره‌ای جهت معیار جزیره‌ای T-10 با وجود ریزشبه مجاور



شکل (۷): نتایج بهره‌برداری ریزشبه در حالت جزیره‌ای جهت معیار جزیره‌ای T-10 بدون وجود ریزشبه مجاور

مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزش شبکه با استفاده از روش تجزیه بندرز به یک مسئله اصلی برای عملکرد در حالت اتصال به شبکه اصلی و یک زیر مسئله برای عملکرد در حالت جزیره‌ای تجزیه شده است. جهت تضمین عملکرد یکپارچه ریزش شبکه از معیار جزیره‌ای  $T-t$  استفاده شده است و لذا ریزش شبکه هر زمان از شبکه اصلی قطع شود قابلیت عملکرد در حالت جزیره‌ای برای مدت زمان مشخص  $t$  ساعت را دارد. جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای تصادفی ریزش شبکه از روش تخمین دونقطه‌ای استفاده شده است و همچنین ذخیره چرخان نیز در مدل در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نحوه عملکرد خوب ریزش شبکه برای هر دو حالت اتصال به شبکه اصلی و جزیره‌ای (با وجود عدم وجود ریزش شبکه مجاور) را نشان می‌دهد.

### ضمایم

جدول (۱): لیست نمادهای مورد استفاده

شاخص‌های مسئله	
$t$	شاخص برای بازه‌های زمانی
$i$	شاخص برای واحدهای قابل تنظیم ریزش شبکه
$r$	شاخص برای واحدهای تجدیدپذیر ریزش شبکه
$d$	شاخص برای بارهای ریزش شبکه
$e$	شاخص برای سیستم‌های ذخیره‌ساز ریزش شبکه
$s$	شاخص برای سناریوهای حالت جزیره‌ای
پارامترهای مسئله	
$c$ (\$/MW)	ضریب هزینه تولید واحد $i$ ام
$SU_i$ (\$)	هزینه روشن شدن واحد $i$ ام
$SD_i$ (\$)	هزینه خاموش شدن واحد $i$ ام
$pm_t$ (\$/MW)	قیمت انرژی الکتریکی شبکه اصلی در زمان $t$ ام
$Kd$ (\$/h.MW)	ضریب جریمه تأمین انرژی بارهای قابل تنظیم
$\Delta d$ (h)	میزان ساعت جابه‌جایی بارهای قابل تنظیم
$p_i^{min}$ (MW)	حداقل توان قابل تولید واحد $i$ ام
$p_i^{max}$ (MW)	حداکثر توان قابل تولید واحد $i$ ام
$UR_i$ (MW)	حداکثر نرخ افزایش تولید واحد $i$ ام
$DR_i$ (MW)	میزان حداکثر نرخ کاهش تولید واحد $i$ ام
$UT_i$ (h)	حداقل زمان روشن بودن واحد $i$ ام
$DT_i$ (h)	حداقل زمان خاموش بودن واحد $i$ ام
$MC_e$ (h)	حداقل زمان شارژ شدن ذخیره‌ساز $e$ ام
$MDe$ (h)	حداقل زمان دشارژ شدن ذخیره‌ساز $e$ ام
$D_d^{min}$ (MW)	حداقل مقدار توان قابل تأمین برای بار قابل تنظیم $d$
$D_d^{max}$ (MW)	حداکثر مقدار توان قابل تأمین برای بار قابل تنظیم $d$
$E_d$ (MWh)	انرژی موردنیاز بار قابل تنظیم $d$ ام
$\alpha_d$ (h)	ساعت آغاز محدوده زمان تعیین شده بار قابل تنظیم $d$
$\beta_d$ (h)	ساعت پایان محدوده زمان تعیین شده بار قابل تنظیم $d$
$MU_d$ (h)	حداقل مدت‌زمان فعال بودن بار قابل تنظیم $d$ ام
$Pm^{min}$ (MW)	حداقل توان قابل مبادله با شبکه اصلی در هر ساعت
$Pm^{max}$ (MW)	حداکثر توان قابل مبادله با شبکه اصلی در هر ساعت
$Pcm_t^{max}$ (MW)	حداکثر میزان توان قابل مبادله با ریزش شبکه مجاور

در نظر گرفتن کلیه ساعات ممکن شروع زمان جزیره‌ای در مدل مسئله دیده شده است. در این بخش به بررسی عملکرد ریزش شبکه در حالت جزیره‌ای پرداخته شده است و برای این منظور معیار جزیره‌ای  $T-10$  (حالت جزیره‌ای به مدت ۱۰ ساعت) در نظر گرفته شده است.

مدت‌زمان انجام شبیه‌سازی برابر ۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه بوده است. میزان هزینه عملکرد ریزش شبکه در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای  $T-10$  برابر \$ ۱۲۰۸۲ است. نتایج عددی به دست آمده به منظور برنامه‌ریزی واحدهای قابل کنترل ریزش شبکه در حالت اتصال به شبکه جهت معیار جزیره‌ای  $T-10$  در جدول (۷) ارائه شده است. همان طور که از مقایسه با حالت قبل (جدول (۵)) مشاهده می‌شود در حالت جزیره‌ای واحدها توان بیشتری تولید می‌نمایند. برنامه‌ریزی انجام شده جهت بارهای قابل تنظیم در حالت اتصال به شبکه سراسری برای معیار جزیره‌ای  $T-10$  در جدول (۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود  $0.2$  MW توان موردنیاز بارهای ۳ و ۴ در خارج از محدوده زمانی تعیین شده این بارها برنامه‌ریزی شده است و ضریب جریمه ناشی از آن در تابع هدف در نظر گرفته شده است.

شکل (۵) نتایج بهره‌برداری ریزش شبکه در حالت اتصال به شبکه اصلی جهت معیار جزیره‌ای  $T-10$  را نشان می‌دهد. در ساعات ابتدایی ریزش شبکه حداکثر مقدار توان موردنیاز خود را از شبکه سراسری دریافت نموده و سیستم ذخیره‌ساز نیز در این بازه زمانی شارژ می‌شود. در ساعات اوج مصرف، ذخیره‌ساز دشارژ شده، واحدهای تولیدی توان بیشتری را تولید نموده و ریزش شبکه مازاد توان تولید شده خود را به شبکه اصلی ارسال می‌نماید. شکل (۶) نتایج بهره‌برداری ریزش شبکه در حالت جزیره‌ای جهت معیار جزیره‌ای  $T-10$  و برای سناریوی شروع حالت جزیره‌ای در ساعت ۱۲ را نشان می‌دهد. در مدت‌زمان جزیره‌ای (۲۱-۱۲) تبادل توان ریزش شبکه با شبکه سراسری برابر صفر بوده و از ریزش شبکه مجاور نیز توان دریافت می‌نماید.

شکل (۷) برنامه‌ریزی ریزش شبکه در حالت جزیره‌ای برای معیار جزیره‌ای  $T-10$  و سناریو ۱۲ بدون در نظر گرفتن ریزش شبکه مجاور را نشان می‌دهد در این حالت ریزش شبکه به صورت کاملاً مستقل در حالت جزیره‌ای عمل میکند. هزینه عملکرد ریزش شبکه در این حالت به \$ ۱۳۰۲۱ افزایش یافته که ناشی از افزایش تولید واحدهای قابل تنظیم، کاهش فروش انرژی به شبکه اصلی و افزایش جریمه ناشی از جابه‌جایی بارهای قابل تنظیم بوده است، که این امر اهمیت تبادل توان با ریزش شبکه مجاور در حالت جزیره‌ای را نشان می‌دهد.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل دوسطحی برنامه‌ریزی عملکرد یکپارچه ریزش شبکه در هر دو حالت جزیره‌ای و اتصال به شبکه سراسری ارائه شده است.

- microgrid—Modeling and simulation,” in Proc. Int. Conf. Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Sep. 2010.
- [6] Khodaei, Amin. "Microgrid optimal scheduling with multi-period islanding constraints." *IEEE Transactions on Power Systems* 29, no. 3 (2014): 1383-1392.
- [7] Pandžić, Hrvoje, Ting Qiu, and Daniel S. Kirschen. "Comparison of state-of-the-art transmission constrained unit commitment formulations." In *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5. IEEE, 2013.
- [8] Shahidehpour, M., and Y. Fu. "Tutorial: benders decomposition in restructure power systems." (2005).
- [9] Alabedin, A. Z. "Generation Scheduling in Microgrids under Uncertainties in Power Generation". M.A.S. Thesis, University of Waterloo, 2012.
- [10] Morales, Juan M., and Juan Perez-Ruiz. "Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow." *IEEE Transactions on Power Systems* 22, no. 4 (2007): 1594-1601.
- [11] GAMS Webpage: <http://www.gams.com/>.
- [12] GAMS Webpage: <http://www.cplex.com/>

$P_{cm}^{min}(MW)$	حداقل میزان توان قابل‌مبادله با ریزشبکه مجاور
$P_{rt}(MW)$	توان خروجی $t$ مین واحد تجدیدپذیر در زمان $t$
$L_t(MW)$	مقدار بار ثابت ریزشبکه برای ساعت $t$ ام
$UM_{ts}$	متغیر باینری جهت حالت اتصال و قطع ریزشبکه از شبکه اصلی (۱ حالت اتصال، ۰ حالت قطع)
<b>متغیرهای مسئله</b>	
$I_{it}$	متغیر باینری تعهد واحد $i$ ام در زمان $t$
$f_{it}$	متغیر باینری زمان روشن شدن واحد $i$ ام در زمان $t$
$k_{it}$	متغیر باینری زمان خاموش شدن واحد $i$ ام در زمان $t$
$u_{et}$	متغیر باینری حالت شارژ ذخیره‌ساز $e$ ام در زمان $t$
$v_{et}$	متغیر باینری حالت دشارژ ذخیره‌ساز $e$ ام در زمان $t$
$z_{dt}$	متغیر باینری عملکرد بار قابل تنظیم $d$ ام در زمان $t$
$P_{it}(MW)$	توان تولیدی واحد $i$ ام واحد در زمان $t$
$P_{m_t}(MW)$	میزان تبادل توان ریزشبکه با شبکه اصلی در زمان $t$
$P_{cm_t}(MW)$	میزان تبادل توان ریزشبکه با ریزشبکه مجاور در
$D_{dt}(MW)$	مقدار توان تأمین‌شده بار $d$ ام در ساعت $t$ ام
$T_{ion}(h)$	مدت‌زمان روشن بودن واحد $i$ ام
$T_{ioff}(h)$	مدت‌زمان خاموش بودن واحد $i$ ام
$P_{et}(MW)$	توان خروجی ذخیره‌ساز $e$ ام در زمان $t$
$C_{et}(MWh)$	ظرفیت انرژی موجود در ذخیره‌ساز $e$ ام در ساعت $t$
$T_e^{ch}(h)$	مدت‌زمان شارژ شدن ذخیره‌ساز $e$ ام
$T_e^{dch}(h)$	مدت‌زمان دشارژ شدن ذخیره‌ساز $e$ ام
$T_{don}(h)$	مدت‌زمان فعال بودن بار قابل تنظیم $d$ ام
$w_t(MWh)$	میزان عدم تطابق ریزشبکه
$w_s(MWh)$	میزان عدم تطابق در ریزشبکه به ازای سناریو $s$ ام
$SL_1(MW)$	متغیر اسلک اول (از جنس تولید)
$SL_2(MW)$	متغیر اسلک دوم (از جنس مصرف)
$SR_{it}(MW)$	ذخیره فراهم‌شده توسط واحد $i$ ام در زمان $t$
$SR_{up_t}(MW)$	ذخیره فراهم‌شده توسط شبکه اصلی در زمان $t$
$SR_{mg_t}(MW)$	ذخیره چرخان موردنیاز ریزشبکه در زمان $t$

## مراجع

- [1] D. E. Olivares, C. A. Canizares, and M. Kazerani, "A centralized optimal energy management systems for microgrids," in Proc. Power and Energy Society General Meeting, Jul. 2011.
- [2] A. Seon-Ju and M. Seung-Il, "Economic scheduling of distributed generators in a microgrid considering various constraints," in Proc. IEEE Power Energy Society General Meeting, Jul. 2009.
- [3] C. Gouveia, J. Moreira, C. L. Moreira, and J. A. P. Lopes, "Coordinating storage and demand response for microgrid emergency operation," *IEEE Trans. Smart Grid*, to be published.
- [4] J. Mitra and M. R. Vallem, "Determination of storage required to meet reliability guarantees on island-capable microgrids with intermittent sources," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 2360–2367, Nov. 2012.
- [5] R. Pawelek, I. Wasiak, P. Gburczyk, and R. Mienski, "Study on operation of energy storage in electrical power