بسمه تعالی

جمهوری اسلامی ایران
وزارت نیرو

کنفرانس بین المللی برق

آبان ماه ۱۳۹۳

PSC-2014

## جناب آقای مهندس وحید حیدری

مقاله ارزشمند شما، با عنوان:

"مدل سازی تاثیر عدم قطعیت انرژی باد در بازارهای همزمان انرژی و ذخیره با استفاده از برنامه ریزی تصادفی"

به وسیله هیات داوران و کمیته علمی در بیست و نهمین کنفرانس بین المللی برق مورد پذیرش قرار گرفت و در مستندات کنفرانس به ثبت رسید.

با ابراز خرسندی و تبریک به این مناسبت، از خداوند متعال سلامت و توفیق روز افزون شما را مسئلت می نمایم. اطمینان دارد با استمرار این کوشش ها در جهت افزایش توانمندی های علمی و پژوهشی کشور گام های مؤثری برداشته خواهد شد.

همایون حائری

مدیرعامل شرکت توانیر

(رئیس کنفرانس)

# مدلسازی تاثیر عدم قطعیت انرژی باد در بازارهای همزمان انرژی و ذخیره با استفاده از برنامهریزی تصادفی

وحید حیدری
گروه مهندسی برق، دانشکده فنی ومهندسی
دانشگاه اراک
اراک، ایران
v-heidari@arshad.araku.ac.ir

علی اصغر قدیمی
گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه اراک
اراک، ایران
a.ghadimi@au.ac.ir

هدایت صبوری
گروه مهندسی برق، دانشکده انرژی
دانشگاه صنعتی کرمانشاه
کرمانشاه، ایران
h.saboori@kut.ac.ir

**چکیده — در این مقاله، روشی جدید جهت مدلسازی اثر عدم قطعیت توان تولیدی توسط منابع انرژی بادی در بازارهای همزمان انرژی و ذخیره ارائه شده است. بدین منظور، از برنامهریزی تصادفی دو مرحله-ای برای مدلسازی مسئله استفاده شده است. در این مطالعه، خطای پیشبینی انرژی باد به عنوان پارامتر تصادفی اصلی در مدل برنامهریزی منظور شده است. از تابع توزیع احتمال نرمال استاندارد برای نمایش تغییرات خطا استفاده شده است. با توجه به پیوستگی تابع مذبور، تابع احتمال خطای پیشبینی با استفاده از روش جدید گسسته شده و تعداد معینی سناریو با احتمال مشخص استخراج شده است. روش پیشنهادی برروی یک شبکهی نمونه آزمایش شده و نتایج برای سناریوهای مختلف تحلیل گشته است.**

***واژههای کلیدی — بازار همزمان انرژی و ذخیره، برنامهریزی خطی ترکیبی عدد صحیح، برنامهریزی تصادفی، عدم قطعیت انرژی باد.***

## ۱.مقدمه

امروزه مزایای به کارگیری منابع تجدیدپذیر جهت تامین توان در سیستمهای قدرت بر کسی پوشیده نیست. در این میان انرژی باد به نسبت سهم بیشتری را در سبد تجدیدپذیر به خود اختصاص داده است. اما طبیعت متغیر و غیرقابل پیشبینی بودن باد منجر شده که اپراتور سیستم در بهرهبرداری و اتصال آن به شبکه دچار مشکل شود. به منظور تطبیق طبیعت غیر قابل پیش بینی باد، تولیدکنندگان و مصرفکنندگان بایستی میزان تولید و مصرف خود را در زمان واقعی اصلاح کنند. در بازارهای برق رقابتی این ذخیرهها هستند که خدمات مربوط به تنظیمات مورد نیاز شبکه را ارائه میدهند [۱].

علاوه بر این در سیستم های قدرت با میزان نفوذ بالای باد ارتباط بین انرژی و ذخیره بیش از گذشته معلوم گشته و استفاده همزمان انرژی و ذخیره به اپراتور سیستم این اجازه را می دهد که از روشن کردن واحدهای غیر ضروری و ریزش بارهای غیر ضروری پرهیز کند. از اولین مطالعات صورت گرفته در تعیین ذخیره پاسخگو به عدم قطعیت انرژی باد، میتوان به مرجع [۱] اشاره نمود. نویسندگان در این مطالعه با ارائه خطای پیش بینی بار و باد به صورت یک تابع توزیع احتمال نرمال استاندارد واحد، ذخیره مورد نیاز برای پاسخگویی به عدم قطعیت انرژی باد و بار را مشخص کردهاند.

در مرجع [۲]، نویسندگان با استفاده از برنامهریزی تصادفی دو مرحلهای، ذخیره پاسخ گو به عدم قطعیت انرژی باد را محاسبه نموده اما هیچ اشارهای به مدل احتمالی باد و نحوه تشکیل سناریوها نشده است.

همچنین مولفین در مرجع [۳] و در تکمیل کار ارائه شده در مرجع [۲]، علاوه بر تعیین ذخیره پاسخگو به عدم قطعیت انرژی باد به تسویه همزمان انرژی و ذخیره در زمان واقعی و روز قبل پرداختهاند.

در مرجع [۴]، مدل احتمالی انرژی باد به کمک مدل احتمال سرعت باد محاسبه شده و علاوه بر این، قید امنیتی سیستم نیز در نظر گرفته شده است؛ سپس به کمک برنامهریزی چندهدفه ذخیره مورد نیاز برای تامین قید امنیتی سیستم و عدم قطعیت انرژی باد به طور همزمان محاسبه شده است.

از جمله مطالعات مشابه دیگر که در این خصوص انجام گرفتهاست میتوان به مراجع [۵-۷] اشاره کرد .

در تمامی مراجع اشاره شده در فوق به نحوه تشکیل سناریوها از مدل عدم قطعیت باد که در تعیین میزان ذخیره مورد نیاز بسیار اهمیت دارد، اشارهای

نشده است و یا اینکه انرژی باد به کمک سه سناریوی محدود سرعت باد کم، زیاد و متوسط مدل نموده و برنامه‌ریزی انجام شده است.

هدف از این مقاله بیان نحوهی تشکیل سناریوها از تابع توزیع احتمال خطای پیشبینی باد و اصلاح مدل برنامهریزی تصادفی ارائه شده در مرجع [۲] می‌باشد. در ادامه و پس از این مقدمه در بخش ۲ مدل پیشنهادی فرمولبندی و تشریح خواهد گردید. سپس در بخش ۳ سیستم استفاده شده معرفی و نتایج پیادهسازی روش پیشنهادی بر روی آن ارائه خواهد گشت. در نهایت، بخش ۴ به نتیجهگیری و ارائه پیشنهادات جهت ادامه کار خواهیم پرداخت.

## ۲. مدلسازی روش پیشنهادی

برای تعیین ذخیره پاسخگو به عدم قطعیت انرژی باد از برنامهریزیخطی - ترکیبی عدد صحیح تصادفی[1] استفاده شده است. در برنامهنویسی تصادفی دو مرحلهای دو نوع متغیر تعریف میشوند: متغیرهای مرحلهی اول که مقادیر بهینه آنها با رخداد هر سناریو تغییر نمیکنند و در همه سناریوها مقداری ثابت را دارند و با توجه به متغیرهای مرحله دوم تصمیمگیری میشوند؛ متغیرهای مرحلهی دوم که مقدار آنها با توجه به رخداد سناریوها در زمان واقعی تعیین میشوند. با توجه به اینکه در مدلسازی مسئله از ترکیب متغیرهای پیوسته (برای نمایش میزان تولید، فلوی خطوط، ..) و همچنین متغیرهای گسسته به فرم اعداد صحیح (متغیرهای باینری برای نمایش وضعیت خاموش یا روشن واحدها) استفاده شده است، برنامهریزی را برنامهریزی خطی ترکیبی عدد صحیح تصادفی گویند [۸].

### ۱.۲ برنامهریزی خطی ترکیبی عدد صحیح تصادفی

ساختار تابع هدف متشکل از دو بخش هزینه میباشد، هزینههای مربوط به بازار روز قبل (مجموع هزینههای متغیرهای مرحلهی اول) و هزینههای مربوط به بازار زمان واقعی (مجموع هزینههای متغبرهای مرحلهی دوم) که بایستی در مجموعهای از قیدها مربوط به زمان روز قبل و زمان واقعی حداقل گردد. هزینههای متغیرهای مرحله اول که مقدار آنها به رخداد سناریو خاصی در زمان وابسته نیست عبارتند از:

۱. هزینهی راهاندازی واحدها به صورت:

$$\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{i=1}^{N_G} C_{it}^{SU} \qquad (۱)$$

۲. هزینهی تولید توان واحدها برابر:

$$\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{i=1}^{N_G} C_{it}^{SU} + \sum_{t=1}^{N_T} d_t \left[\sum_{i=1}^{N_G}\sum_{m=1}^{N_{oit}} \lambda_{Git}(m)\, p_{Git}(m) - \sum_{j=1}^{N_L} \lambda_{Ljt} L_{jt}\right] + \sum_{i=1}^{N_G}(C_{it}^{R^U} R_{it}^U + C_{it}^{RD} R_{it}^D) + \sum_{j=1}^{N_L}(C_{jt}^{R^U} R_{jt}^U + C_{jt}^{RD} R_{jt}^D) \qquad (۲)$$

$C_{it}^{SU}$: هزینهی راه اندازی واحد i در زمان t

$p_{Git}(m)$ : مقدار برنامهریزی شدهی انرژی از هر واحد تولیدی در زمان t

$R_{it}^U, R_{it}^D$: ذخیره افزایشی و کاهشی برنامهریزی شدهی سمت تولید در زمان t

$R_{jt}^U, R_{jt}^D$: ذخیره افزایشی و کاهشی برنامهریزی شدهی سمت تقاضا در زمان t

هزینههای متغیرهای مرحله دوم که مقدار آنها به رخداد سناریوی خاصی در زمان وابسته است، شامل:

۱. هزینهی مربوط به راهاندازی واحدها در زمان واقعی:

$$\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{i=1}^{N_G} C_{itw}^{SU} \qquad (۳)$$

۲. هزینههای مربوط به حذف اجباری بار به علاوه هزینهی مربوط به ذخیره-های چرخان عملیاتی سمت تولید و سمت مصرفکننده در پاسخ به عدم قطعیت باد:

$$\left[\sum_{j=1}^{N_L} V_{jt}^{LOL} L_{jtw}^{shed} + \sum_{i=1}^{N_G}\sum_{m=1}^{N_{Oit}} (\lambda_{Git}(m) r_{itw}^U - \lambda_{Git}(m) r_{itw}^U)\right] + \sum_{j=1}^{N_L} \lambda_{Ljt}(r_{jt}^U - r_{jt}^D) \qquad (۴)$$

$r_{itw}^U, r_{itw}^D$ : ذخیره چرخان عملیاتی کاهشی و افزایشی سمت تولید در سناریوی w و زمان t

$r_{jtw}^D, r_{jtw}^U$:ذخیره چرخان عملیاتی افزایشی(کاهش مصرف) وکاهشی(افزایش مصرف) سمت بار در سناریوی w و زمان t

$L_{jtw}^{shed}$: بار حذف شده اجباری در سناریوی w و زمان t

تابع هدف شامل مجموع هزینه (روابط۱ تا ۴) به صورت زیر قابل نمایش میباشد:

(۵)

$$\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{i=1}^{N_G} C_{it}^{SU} + \sum_{t=1}^{N_T} d_t \left[\sum_{i=1}^{N_G}\sum_{m=1}^{N_{oit}} \lambda_{Git}(m)\, p_{Git}(m) - \sum_{j=1}^{N_L} \lambda_{Ljt} L_{jt}\right] + \sum_{i=1}^{N_G}(C_{it}^{R^U} R_{it}^U + C_{it}^{RD} R_{it}^D) + \sum_{j=1}^{N_L}(C_{jt}^{R^U} R_{jt}^U + C_{jt}^{RD} R_{jt}^D) + \sum_{w=1}^{N_w} \pi_w * \left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^{N_T}\sum_{i=1}^{N_G} C_{itw}^{SU} + \sum_{t=1}^{N_T} d_t \left[\sum_{j=1}^{N_L} V_{jt}^{LOL} L_{jtw}^{shed}\right] + \\ \sum_{i=1}^{N_G}\sum_{m=1}^{N_{Oit}} (\lambda_{Git}(m) r_{itw}^U - \lambda_{Git}(m) r_{itw}^D) + \sum_{j=1}^{N_L} \lambda_{Ljt}(r_{jtw}^U - r_{jtw}^D) \end{array} \right\}$$

در تابع هدف بالا، $\pi_w$ احتمال رخداد سناریوی w میباشد.

### ۱.۲.۱. قیدهای بهرهبرداری بازار قبل از زمان واقعی

این قیدها شامل قیدهای تعادل توان، محدودیت تولید و ذخیرههای برنامه - ریزی شده سمت تولید و تقاضا میباشند که در ادامه روابط هر یک تشریح شده است.

قید تعادل توان:

$$\sum_{i=1}^{N_G}\sum_{m=1}^{N_{Oit}} p_{Git} + p_t^{WP,S} = \sum_{j=1}^{N_L} L_{jt}^S \quad \forall t \qquad (۶)$$

$p_{Git}$ : مقدار برنامهریزی شده ی هر بلوک انرژی از هر واحد تولیدی است

$p_t^{WP,S}$ : مقدار پیشبینی شدهی انرژی تولیدی باد

$L_{jt}^S$: مقدار مصرفی برنامهریزی شده برای هر بار

قید محدودیت تولید:

$$p_{it}^s = \sum_{m=1}^{N_{Oit}} p_{Git}(m) \quad \forall i, \forall t$$
$$p_i^{\min} u_{it} \le p_{it}^s \le p_i^{\max} u_{it} \quad \forall i, \forall t \qquad (۷)$$

$u_{it}$: متغییر باینری که ارزش آن برای روشن بودن واحد i در زمان t، ۱ می- باشد و در غیر این صورت صفر است.

ذخیره برنامهریزی شده سمت تولید:

$$R_{it}^{UMAX} = p_i^{\max} - p_{it}^s \qquad (۸)$$

$$R_{it}^{DMAX} = p_{it}^s - p_i^{\min} \qquad (۹)$$

$$R_{it}^U \le R_{it}^{UMAX} \qquad (۱۰)$$

$$R_{it}^D \le R_{it}^{DMAX} \qquad (۱۱)$$

مدل ارائه شده در مرجع [۲] در این قسمت اصلاح گشته و مقدار حداکثر برای ذخیره افزایشی و کاهشی مقدار بر اساس میزان تولید برنامهریزی شده- ی هر واحد مشخص میگردد و مقداری اختیاری نیست.

ذخیره برنامهریزی شده سمت تقاضا:

$$R_{jt}^{DMAX} = L_{jt}^{\max} - L_{jt} \qquad (۱۲)$$

$$R_{jt}^{UMAX} = L_{jt} - L_{jt}^{\min} \qquad (۱۳)$$

$$R_{jt}^D \le R_{jt}^{DMAX} \qquad (۱۴)$$

$$R_{jt}^U \le R_{jt}^{UMAX} \qquad (۱۵)$$

مدل ارائه شده در مرجع [۲] در این قسمت اصلاح گشته و مقدار حداکثر برای ذخیره افزایشی و کاهشی مقدار بر اساس میزان مصرف برنامهریزی شدهی هر بار مشخص میگردد و مقداری اختیاری نیست.

### ۲.۲.۱. قیدهای بهرهبرداری بازار در زمان واقعی

این قیدها مشابه قیدهای بهرهبرداری بازار قبل از زمان واقعی میباشند، با این تفاوت که برای رخداد هر سناریو نیز برقرار باشند. شامل:

تعادل توان:

$$\sum_{i=1}^{N_G}\sum_{m=1}^{N_{Oit}} (p_{Git} + r_{itw}^U - r_{itw}^D) + (p_{tw}^{WP,S} - p_t^{WP,S}) + p_t^{WP,S} = \sum_{j=1}^{N_L} (L_{jt}^S + r_{jtw}^D - r_{jtw}^U) \quad \forall t, \forall w \qquad (۱۶)$$

$r_{itw}^U, r_{itw}^D$ : ذخیره چرخان عملیاتی کاهشی و افزایشی سمت تولید در سناریو w و زمان t

$p_{tw}^{WP,S}$ : عدم قطعیت انرژی باد در سناریو w و زمان t

$r_{jtw}^D, r_{jtw}^U$ : ذخیره چرخان عملیاتی افزایشی(کاهش مصرف ) وکاهشی(افزایش مصرف) سمت بار در سناریو w و زمان t

قید محدودیت تولید:

$$p_i^{\min} v_{itw} \le p_{it}^s + r_{itw}^U - r_{itw}^D \le p_i^{\max} v_{itw} \qquad (۱۷)$$

$v_{itw}$ : متغییر باینری که ارزش آن برای روشن بودن واحد i در زمان t و سناریو w ، ۱ میباشد و در غیر این صورت صفر است.

قید محدودیت ذخیره افزایشی و کاهشی عملیاتی شده در زمان واقعی:

ذخیره عملیاتی سمت تولید

$$r_{itw}^{U} \le R_{it}^{U} \quad \forall t, \forall w \tag{۱۸}$$

$$r_{itw}^{D} \le R_{it}^{D} \quad \forall t, \forall w \tag{۱۹}$$

ذخیره عملیاتی سمت تقاضا:

$$r_{jtw}^{D} \le R_{jt}^{D} \quad \forall t, \forall w \tag{۲۰}$$

$$r_{jtw}^{U} \le R_{jt}^{U} \quad \forall t, \forall w \tag{۲۱}$$

قید محدودیت مصرف:

$$L_{jt}^{\min} \le L_{jt} + r_{jtw}^{D} - r_{jtw}^{U} \le L_{jt}^{\max} \tag{۲۲}$$

$$0 \le L_{jtw}^{shed} \le L_{jt} + r_{jtw}^{D} - r_{jtw}^{U} \tag{۲۳}$$

## ۲.۲مدلسازی عدم قطعیت باد و تشکیل سناریوها

در این مطالعه، عدم قطعیت انرژی باد از طریق مدلسازی خطای پیشبینی نمایش داده شده است. نحول تشکیل سناریوها و روش تعیین احتمال هر یک در ادامه تشریح شده است. میزان خطا از مقدار پیشبینی شده با تابع توزیع احتمال نرمال با انحراف معیار استاندارد برابر ۰/۱ و میانگین صفر در نظر گرفته شده است. روند تشکیل و احتمال رخ داد هر سناریو استفاده شده در مدل ارائه شده در بخش ۱.۲ از منحنی تابع توزیع احتمال نرمال شده خطا به صورت زیر میباشد:

ابتدا چون سناریوها به صورت گسسته ارائه شدهاند بایستی تابع توزیع احتمال فوق را گسسته کنیم؛ پس مطابق با مرجع [۹] *داریم:*

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \tag{۲۴}$$

$$\int_{a_n}^{b_n} f(x)dx \approx f\left(\frac{a_n+b_n}{2}\right)(b_n - a_n) \tag{۲۵}$$

f(x) : تابع توزیع احتمال متغیر x

$[a_n, b_n]$: بازه n از تقسیمات کل بازه تغییرات تابع توزیع احتمال

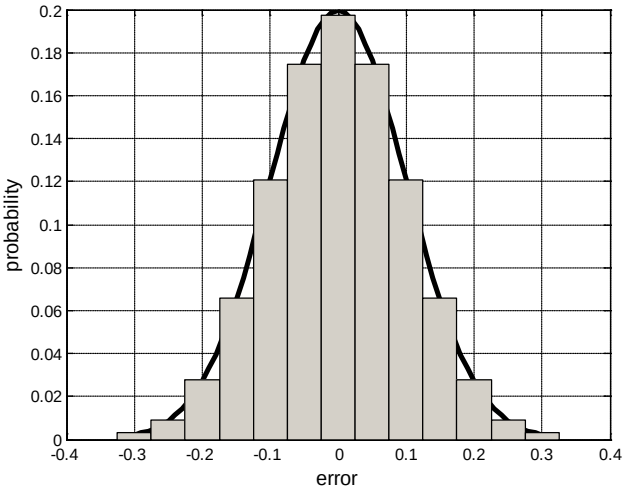
همچنین میتوان نتیجه گرفت که:

$$\sum_{n=1}^{N} f\left(\frac{a_n+b_n}{2}\right)(b_n - a_n) \tag{۲۶}$$

$$\approx \sum_{n=1}^{N} \int_{a_n}^{b_n} f(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$$

N: تعداد تقسیمات کل بازه

روابط فوق نشان میدهد که تابع توزیع احتمال را میتوان به صورت زیر نمایش داد.




**شکل ۱: گسسته سازی تابع توزیع احتمال**

حال در برنامهریزی تصادفی احتمال رخداد هر بازه را میتوان به صورت زیر نمایش داد:

$$f\left(\frac{a_n+b_n}{2}\right) = \int_{a_n}^{b_n} f(x)dx \tag{۲۷}$$

حال با توجه به روابط فوق میتوان سناریوها و احتمال رخداد آن را در هر زمان را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$p_{tw}^{WP,S} = p_{t}^{WP,S}(1 + error(t,w)) \qquad \forall w, \forall t$$

$$w = n \tag{۲۸}$$

$$error(t,n) = \frac{a_n + b_n}{2}$$

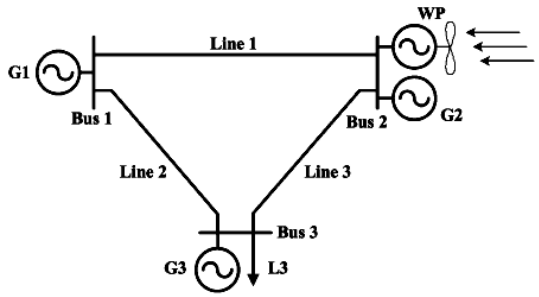
مطابق با روابط فوق میتوان نتیجه گرفت که برای هر بازهی زمانی، میتوان N سناریو مجزا طبق فرمول فوق تشکیل داد که احتمال رخداد هر سناریو با احتمال خطای آن سناریو برابر است یعنی:

$$f(p_{tw}^{WP,S}) = f(error(t,n)) \tag{۲۹}$$

# ۳.معرفی شبکه و شبیهسازی

## ۱.۳سیستم مورد مطالعه

برای مطالعه مدل ارائه شده سیستم نشان داده شده در شکل ۲ برای ۲۴ ساعات شبانهروز شبیهسازی شده است. جهت مدل - سازی عدم قطعیت انرژی باد از ۱۳ سناریوی مختلف با احتمال رخداد متفاوت استفاده شده است. سناریوها با استفاده از روش تشریح شده در بالا و از تابع توزیع خطای احتمال گاوسی با انحراف معیاراستاندارد برابر ۱٪ و میانگین صفر استخراج شدهاند. مدل تشریح شده در محیط برنامهنویسی GAMS پیاده شده و توسط حلگر CPLEX نسخه ۱۰ حل شده است[۱۰].

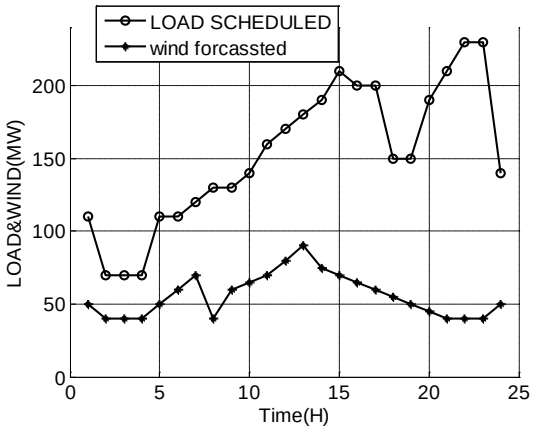



**شکل ۲ : سیستم ۳ شین شبیهسازی شده**

**جدول ۱: مشخصات واحدهای تولیدی**

| ژنراتور | هزینه قرار داد ذخیره | | هزینه تولید | حداقل توان | حداکثر توان |
|---|---|---|---|---|---|
| | کاهشی | افزایشی | | | |
| ۱ | ۵ | ۵ | ۳۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| ۲ | ۷ | ۷ | ۴۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| ۳ | ۸ | ۸ | ۲۰ | ۰ | ۵۰ |

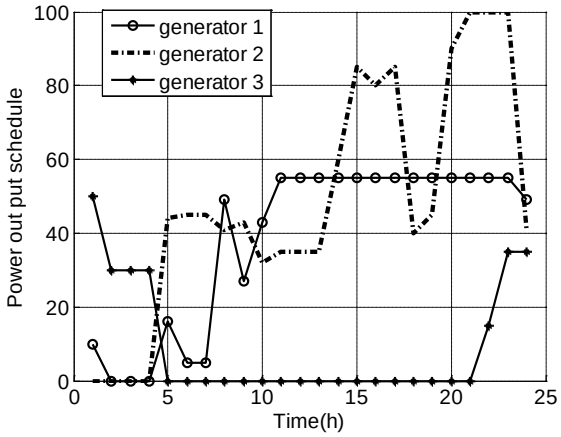
هزینهی تامین ذخیرههای چرخان عملیاتی افزایشی و کاهشی با قیمت انرژی برابر فرض شده است. همچنین، حداکثر میزان افزایش و کاهش بار مساوی با ۱۰ درصد مقدار برنامهریزی شده آن، قیمت قرارداد برای تولید ذخیره توسط بار۵ دلار بر مگاوات ،هزینهی ذخیره عملیاتی برای بار ۷۰ دلار بر مگاوات و قیمت حذف بار اجباری ۱۰۰۰دلار در نظر گرفته شده است.علاوه بر این، راکتانس هر یک از خطوط برابر ۱۳٪ پریونیت در نظر گرفته شده است. مقدار برنامهریزی شدهی بار و باد پیشبینی شده در شکل(۳) نمایش داده شده است .




**شکل۳: مقدار برنامهریزی شده بار و پیشبینی شدهی باد**

## ۲.۳ نتایج شبیهسازی

مقدار برنامهریزی شده هر ژنراتور با توجه به تشکیل سناریوها از مدل عدم قطعیت باد و با توجه به رخداد هر سناریو در هر زمان مقداری ثابت و در شکل ( ۴) نمایش داده شده است. بنابرین عملیات تسویه بازار در روز قبل میبایست بر اساس این مقادیر صورت پذیرد.

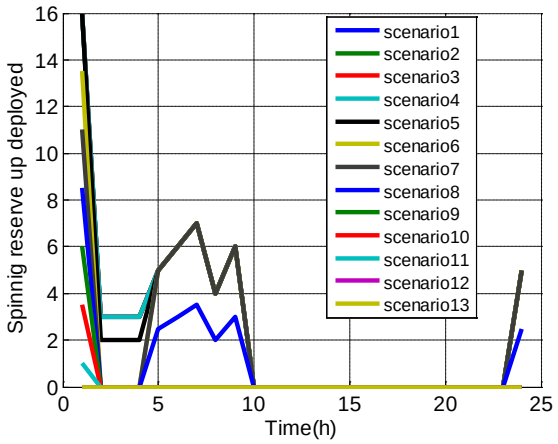



**شکل ۴: نتایج مقادیر بهینه برنامهریزی شدهی توان برای واحدهای تولیدی**

مقدار برنامهریزی شدهی توان تولیدی هر ژنراتور با توجه به رخداد هر سناریو دارای تغییراتی در زمان واقعی میباشد که در شکلهای ( ۵) تا ( ۷) نمایش داده شده است.

مطابق با شکل (۵)، مقدار برنامهریزی شده برای ژنراتور اول با عدم قطعیت انرژی باد در ساعت اول از حساسیت بیشتری برخوردار است؛ به طوری که دامنهی این تغییرات بسته به رخداد سناریو مربوطه تغییراتی دربازه ی ۱ تا

۱۶ مگاوات افزایش توان تولیدی را به خود اختصاص داده است. همچنین برای ساعات ۱۰ تا ۲۳ مقدار تغییرات در توان برنامهریزی شده با رخداد هر سناریویی از انرژی باد صفر میباشد. توجه به این نکته الزامی است که اگر تعداد سناریوها مطابق با مراجع [۲]، [۳] انتخاب میشد بررسی دقیق دامنهی تغییرات توان تولیدی ژنراتور ۱ امکانپذیر نبود.

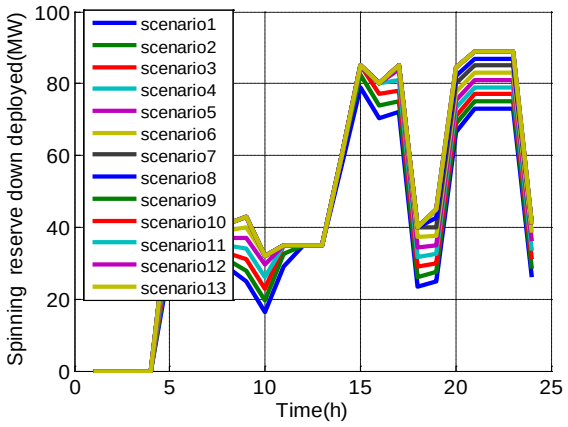



**شکل۵: تغییرات مقدار بهینه برنامهریزی شده توان تولیدی ژنراتور ۱**

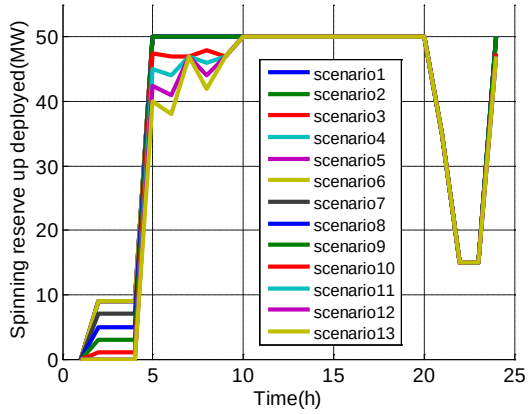
نتایج تغییرات توان تولیدی برای ژنراتورهای ۲ و۳ به ترتیب در شکلهای (۶) و ( ۷) آورده شده است. با توجه به نتایج، ژنراتور سوم حساسیت بیشتری را به عدم قطعیت انرژی باد نسبت به ژنراتور اول نشان میدهد به طوری که برای ساعات بین ۱۰ تا ۲۰ حداکثر ظرفیت ذخیره چرخشی افزایشی خود را به ازای رخداد هر سناریو وارد مدار میکند. علت این رویداد را می توان اینگونه تشریح نمود که قیمت پیشنهادی توسط ژنراتورسوم نسبت به ژنراتور اول کمتر بوده، درنتیجه در صورت کاهش توان پیشبینی شده انرژی باد، بهرهبردار سعی بر استفاده بیشتر از این واحد خواهد داشت.

میزان ذخیره چرخان کاهشی دو ژنراتور ۱و۳ برخلاف ژنراتور ۲ صفر است. یکی از دلایل این مسئله این است که پیشنهاد هزینهی ذخیره این دو ژنراتور نسبت به ژنراتور ۲ کمتر بوده، درنتیجه بهرهبردار سیستم در نوسانات عدم قطعیت باد تمایل کمتری را به کاهش توان تولیدی این دو ژنراتور دارد و بیشتر سعی بر کاهش تولید ژنراتور۲ دارد.

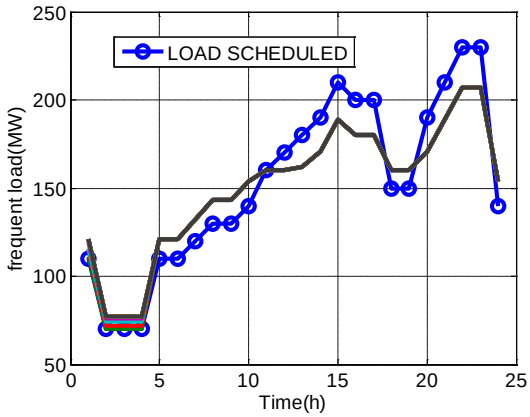
در پایان، منحنی تغییرات بار با تغییر سناریوی پیشبینی انرژی باد در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل، با وجود این که بار قیمتهای بالایی را در تامین ذخیرهی چرخان عملیاتی پیشنهاد داده است، طبیعت غیر قابل پیشبینی باد منجر شده که در زمان واقعی اپراتور سیستم به ناچار از آن بهره جوید.




**شکل۷:کاهش توان در مقدار برنامه ریزی شده ی توان تولیدی ژنراتور ۲**




**شکل ۶ .افزایش توان در مقدار برنامهریزی شدهی توان تولیدی ژنراتور ۳**




**شکل ۸: میزان تغییرات بار با در نظر گرفتن عدم قطیت در پیشبینی باد**

## ۴. نتایج

با توجه به روند توسعه انرژیهای نو در شبکه به خصوص انرژی باد که دارای ماهیتی تغییرپذیر و غیر قابل پیشبینی است و همچنین ساختار رقابتی بازار که تسویهی بازار بر اساس مدل عدم قطعیت صورت میگیرد، همواره بهرهبرداری از انرژی باد در بازارهای برق رقابتی، بهرهبرداران سیستم را دچار مشکل میکند. در این راستا، در این مقاله سعی شده که عدم قطعیت ناشی از حضور باد در بازار برق از طریق برنامهریزی تصادفی مدیریت گردد. مدل ارائه شده از نوع برنامهریزی خطی ترکیبی عدد صحیح بوده که به صورت برنامهریزی تصادفی اصلاح شده است. سناریوهای استفاده شده جهت نمایش خطای پیشبینی توان باد از گسستهسازی تابع توزیع احتمال خطا (توزیع گوسی) استخراج گشته است. نتایج شبیهسازی بر روی سیستم نمونه نشاندهنده کارائی مدل پیشنهادی در بازارهای همزمان با نفوذ بالای انرژی باد میباشد.

## مراجع

[1] François Bouffard , Francisco D. Galiana ;"Stochastic Security for Operations Planning With Significant Wind Power Generation"; IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS; VOL. 23, NO. 2, MAY 2008

[2] Juan M. Morales,Antonio J. Conejo, and Juan Pérez-Ruiz, "Economic Valuation of Reserves in Power Systems With High Penetration of Wind Power"; IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 24, NO. 2, MAY 2009

[3] Juan M. Morales, Antonio J. Conejo, *Fellow,*Kai Liu, and Jin Zhong,*;* "Pricing Electricity in Pools With Wind Producers", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 27, NO. 3, AUGUST 2012.

[4] S. Surender Reddy, P. R. Bijwe, and A. R. Abhyankar, "Joint Energy and Spinning Reserve Market Clearing Incorporating Wind Power and Load Forecast Uncertainties",early access(2014).

[5] Anthony Papavasiliou, , Shmuel S. Oren, , and Richard P. O'Neill ,"Reserve Requirements for Wind Power Integration: A Scenario-Based Stochastic Programming Framework", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 26, NO. 4, NOVEMBER 2011.

[6] Juha Kiviluoma, Mark O'Malley, Aidan Tuohy, Peter Meibom, Michael Milligan, Bernhard Lange,Hannele Holttinen, Madeleine Gibescu,"Impact of Wind Power on the Unit Commitment, Operating Reserves, and Market Design ",2011

[7] Manuel A. Matos and R. J. Bessa "Setting the Operating Reserve Using Probabilistic Wind Power Forecasts" ; IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 26, NO. 2, 2011

[8] John R.Birge ,Francois Louveaux, "Iintroduction Stochastic Programming " ,springer series in operations research.

[9] Alberto Leon-Garcia "Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering ", University of Toronto

[10] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman, and R. E. Rosenthal, *GAMS, a User's Guide*. Washington, DC: GAMS Development Corporation