

پیشنهاد بهینه تولید واحدهای بادی برای بهره‌برداری هماهنگ این واحدها با سایر

نیروگاه‌های تجدیدپذیر در بازار برق

معین پرستگاری^۱، رحمت الله هوشمند^۲، امین خدابخشیان^۳ و امیرحسین زارع نیستانک^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

Parastegari@eng.ui.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق - اصفهان - اصفهان - ایران

Hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - اصفهان - اصفهان - ایران

aminkh@eng.ui.ac.ir

۴- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - اصفهان - اصفهان - ایران

emi.1366@yahoo.com

چکیده: امروزه مسائل بهره‌برداری بهینه از نیروگاه‌های تجدیدپذیر و پیشنهاد تولید بهینه این نیروگاه‌ها جزو مسائل روز بازار برق است. با توجه به این مسأله، در این مقاله، روش جدیدی در بهره‌برداری هماهنگ از نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک و تلمبه-ذخیره‌ای در بازار ارایه می‌شود. هدف اصلی این برنامه‌ریزی، افزایش سود مجموعه نیروگاه‌هاست. در این پژوهش، از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی تولید نیروگاه بادی استفاده شده است. افزون بر این، وجود عدم قطعیت قیمت انرژی و ذخیره چرخان در بازار برق و عدم قطعیت تولید واحدهای بادی و فتوولتائیک به تبدیل این مسأله به یک مسأله بهینه‌سازی تصادفی منجر می‌شود. در این پژوهش، عدم قطعیت شاخص‌ها توسط روش درخت سناریو مدل‌سازی شده است. با استفاده از روش درخت سناریو مسأله بهینه‌سازی به یک مسأله بهینه‌سازی تصادفی تبدیل می‌شود. در این مقاله، روش پیشنهادی بر روی نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک و تلمبه-ذخیره‌ای سیستم ارتقا یافته ۱۱۸ باس IEEE مدل‌سازی و با استفاده از نرم افزار GAMS حل شده است. بررسی مقادیر امید ریاضی سود سیستم تایید کننده افزایش سود مجموعه نیروگاهی در شرایط عملکرد هماهنگ نسبت به شرایط بهره‌برداری مستقل است.

واژه‌های کلیدی: پیشنهاد بهینه تولید به بازار برق، پیش‌بینی تولید واحد بادی، شبکه عصبی، مزرعه بادی، نیروگاه‌های تجدیدپذیر.

نمادگذاری

l ، p_v و w : اندیس واحدهای نیروگاه تلمبه-

ذخیره‌ای، فتوولتائیک و بادی

k : اندیس واحدهای نیروگاهی

s_p : اندیس سناریو برای قیمت انرژی

s_w : اندیس سناریو برای توان تولیدی توسط نیروگاه

بادی

s_{pv} : اندیس سناریو برای توان تولیدی نیروگاه

فتوولتائیک

$\rho(s_p, s_{pv}, s_w)$: احتمال وقوع سناریوهای s_p

t : اندیس زمان

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۳/۱۲

نام نویسنده مسئول: معین پرستگاری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان -

دانشکده برق

قیمت، s_w ام تولید بادی و s_{pv} ام تولید واحد فتولتائیک

NT : تعداد دوره‌های زمانی در مسأله برنامه‌ریزی

NS_{PV} : تعداد سناریوهای تولید واحدهای فتولتائیک

NS_W : تعداد سناریوهای تولید واحدهای بادی

NS_p : تعداد سناریوهای قیمت

NW : تعداد واحدهای بادی

NPS : تعداد واحدهای تلمبه-ذخیره‌ای

$I_p(l, t)$ و $I_g(l, t)$: نشانگر حالت تولید و پمپاژ نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای

$U_C(pv, t)$ و $U_d(pv, t)$: نشانگر حالت شارژ و دشارژ باتری ذخیره‌کننده انرژی در واحد فتولتائیک PV ام

$P_c(t)$: مقدار کل توان تعهد شده توسط مجموعه نیروگاه‌های بادی، فتولتائیک و تلمبه-ذخیره‌ای

$P_C, PV(pv, t)$ و $P_C, PS(l, t)$ ، $P_C, W(w, t)$ توان تعهد شده توسط نیروگاه بادی، تلمبه-ذخیره‌ای و فتولتائیک در زمان t در بهره‌برداری مستقل از واحدها.

$\tilde{P}_D(k, t)$: مقدار توان تحویلی واحد k ام (شامل: بادی، فتولتائیک و تلمبه-ذخیره‌ای) در ساعت t

$\tilde{P}_{D, PV}(pv, t)$ و $P_{D, PS}(l, t)$ ، $\tilde{P}_{D, W}(w, t)$ مقدار توان تحویلی توسط نیروگاه بادی w ام، نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای l ام و نیروگاه فتولتائیک pv -ام در زمان t

$RC, PS(l, t)$ و $NC, PS(l, t)$: مقادیر ذخیره چرخان و ذخیره غیرچرخان نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای l ام.

$epr(s_p, t)$ ، $srpr(s_p, t)$ و $nsrpr(s_p, t)$: قیمت لحظه‌ای انرژی، رزرو چرخشی و رزرو غیرچرخشی برای سناریو s ام قیمت در لحظه t

\tilde{C}_{imb} : ضریب هزینه عدم تعادل

β و D_{CR} ، S_{CR} : ضریب هزینه عدم تعادل

a ، b و c : ضرایب هزینه تولید واحدها

$U(k, t)$: نشانگر حالت روشن یا خاموش بودن واحد k ام در ساعت t

$R_p(l, t)$ ، $R_g(l, t)$: رزرو چرخشی در حالت تولید

و پمپاژ واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام در ساعت t

$N_u(l, t)$ ، $N_d(l, t)$: رزرو غیرچرخشی در زمان روشن و خاموش بودن واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام در ساعت t

$\tilde{P}_{D, W}(s_w, w, t)$ ، $P_W(s_{pv}, t)$: مقدار توان تولیدی توسط واحد بادی w -ام برای سناریو s_w در ساعت t

RV_{PH} و RV_{PS} ، RV_W : درآمد واحدهای بادی، تلمبه-ذخیره‌ای و فتولتائیک در بازار برق

$Cost_{Batt}$ ، IC ، $Cost_{st}$: هزینه راه‌اندازی، هزینه عدم تعادل و هزینه خرید توان برای شارژ باتری

$v^l(l, t)$ ، $v^l(l, ini)$ و $v^l(l, end)$: میزان حجم آب در زمان t ، حجم اولیه و حجم نهایی مخزن پایین واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام

$v^u(l, t)$ ، $v^u(l, ini)$ و $v^u(l, end)$: میزان حجم آب در زمان t حجم اولیه و حجم نهایی مخزن بالایی واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام

$v_{min}^u(l)$ و $v_{max}^u(l)$: مینیمم و ماکزیمم حجم مخزن بالای واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام

$v_{min}^l(l)$ و $v_{max}^l(l)$: مینیمم و ماکزیمم حجم مخزن پایین واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام

$qp(l, t)$ و $qg(l, t)$: مقدار نرخ تخلیه و پمپاژ واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام در ساعت t

$qp_{min}(l)$ و $qp_{max}(l)$: حداقل و حداکثر نرخ پمپاژ واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام

$qg_{min}(l)$ و $qg_{max}(l)$: حداقل و حداکثر نرخ تخلیه واحد تلمبه-ذخیره‌ای l ام

$P_{ChBatt}(bt, t)$ و $P_{ChBatt}^{max}(bt)$: مقدار شارژ باتری b -ام در لحظه t و ماکزیمم مقدار مجاز آن

$P_{DeBatt}(bt, t)$ و $P_{DeBatt}^{max}(bt)$: مقدار دشارژ باتری در لحظه t و ماکزیمم مقدار مجاز آن

$E(bt, t)$: مقدار انرژی ذخیره شده در باتری در ساعت t

$PF(k, t)$ ، $RV(k, t)$ ، $TC(k, t)$ ، $IC(k, t)$: هزینه‌های عدم تعادل، بهره‌ی، درآمد و سود واحد k ام در ساعت t

راستا در [۱۲] از روش ARMA^۱ برای پیش‌بینی توان تولیدی مزارع بادی استفاده شده است. افزون بر این در [۱۳] از روش ANFIS^۲ و در [۱۴] از ترکیب روش‌های ANFIS و PSO^۳ برای پیش‌بینی تولید واحدهای بادی استفاده شده است.

برنامه‌ریزی مشارکت واحدها در بازار برق، با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف تولید واحدها، موجب افزایش امید ریاضی سود واحدهای تولیدی و کاهش میزان خطرپذیری تولیدکنندگان توان بادی می‌شود [۱۱ و ۱۵]. در این شرایط در مرجع [۲] برنامه‌ریزی واحدهای بادی برای افزایش سود و کاهش خطرپذیری متناظر با آن مطالعه بررسی شده است. در [۱۶] خطرپذیری نیروگاه‌های فتوولتائیک ارزیابی شده است.

روش دیگری که برای کاهش هزینه عدم تعادل واحدهای تجدیدپذیر استفاده می‌شود، بهره‌برداری هماهنگ از این واحدها به همراه عناصر ذخیره‌کننده انرژی یا سایر نیروگاه‌هاست. در این شرایط، مقادیر سود مجموعه افزایش یافته و خطرپذیری مجموعه کاهش می‌یابد. امروزه در مورد بهره‌برداری هماهنگ از واحدها پژوهش‌های وسیعی انجام شده است [۲، ۴-۷، ۱۵ و ۱۷-۲۰]. در این راستا در [۲ و ۱۹] بهره‌برداری هماهنگ از یک نیروگاه‌های بادی به همراه یک منبع ذخیره‌کننده انرژی (مانند باتری) مطالعه شده است. معادلات لازم برای مدل‌سازی مسئله بهره‌برداری هماهنگ نیروگاه‌های بادی و آبی در [۴] بررسی شده است. برنامه‌ریزی تصادفی مجموعه نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره‌ای و بادی در بازار توان در [۵ و ۱۱ و ۱۸ و ۲۰] انجام شده است. در مراجع [۷-۱۰ و ۱۹] عملکرد اقتصادی برنامه‌ریزی هماهنگ واحد بادی و فتوولتائیک مطالعه شده است. همچنین، در [۲۱] نشان داده شده است که برنامه‌ریزی هماهنگ واحدهای فتوولتائیک و بادی میزان رزرو مورد نیاز سیستم قدرت را تغییر می‌دهد.

با بررسی پژوهش‌های انجام شده در مورد مسئله بهره‌برداری هماهنگ از واحدهای بادی و سایر واحدها مشاهده شد که در این پژوهش‌ها سعی شده عدم قطعیت و

$SU(k,t)$: هزینه راه اندازی واحد k ام در ساعت t

شاخص‌های مربوط به بخش پیش‌بینی

$Par(s,t)$: مقدار شاخص Par در سناریو s و زمان t

$Par_f(t)$: مقدار پیش‌بینی شده Par در زمان t

$\Delta Par(s,t)$: مقدار خطای پیش‌بینی شاخص Par

در سناریو s و زمان t

۱- مقدمه

امروزه با توجه به کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و افزایش قیمت آن‌ها و افزایش آلودگی محیط زیست، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش یافته است [۱-۵]. در اثر افزایش استفاده از این منابع انرژی، نرخ افزایش مصرف سوخت فسیلی کمی کاهش یافته است. این مسأله خود موجب کاهش رشد آلودگی محیط زیست شده است. از آنجا که واحدهای تجدیدپذیر برای تولید توان از سوخت فسیلی استفاده نمی‌کنند، هزینه تولید توان این واحدها کمتر از واحدهای فسیلی است.

از جهتی دیگر، با توجه به وجود عدم قطعیت در تولید واحدهای تجدیدپذیر، افزایش استفاده از این واحدها به افزایش عدم قطعیت در سیستم قدرت منجر می‌شود. در این شرایط بهره‌بردار سیستم قدرت برای کاهش تاثیر عدم قطعیت تولید واحدها، از واحدها جریمه عدم تعادل (بین توان پیش‌بینی شده و توان تولیدی) دریافت می‌کند. در نتیجه اگر نیروگاهی در تعهدات خود کوتاهی کند، بیشتر از قیمت برق جریمه می‌شود. اگر بیش از تعهدات خود تولید کند، به مقداری کمتر از قیمت برق پاداش داده می‌شود [۲ و ۴-۵]. از آنجا که تولید نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک نامعین است، هزینه عدم تعادل این واحدها نیز نامعین خواهد بود [۱-۱۰]. این مسأله موجب افزایش میزان خطرپذیری مشارکت این واحدها در بازار برق می‌شود [۱-۲ و ۱۱].

بهره‌برداران از واحدهای تجدیدپذیر، به منظور کاهش هزینه عدم تعادل، تولید واحدها را پیش‌بینی می‌کنند. در این

استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی بر روی نیروگاه‌های تجدیدپذیر شبکه ۱۱۸ باس IEEE^۵ بیانگر توانایی الگوریتم پیشنهادی در افزایش سود و کاهش خطر پذیری برنامه‌ریزی تولید این نیروگاه‌ها در بازار برق است.

۲- ساختار پیشنهادی برای برنامه‌ریزی

هماهنگی واحدهای تجدیدپذیر در بازار برق

۲-۱- مسأله مورد بررسی

در بازار برق، هر یک از شرکت‌های تولید کننده انرژی، برنامه‌ریزی تولید و مشارکت خود را به گونه‌ای انجام می‌دهند که سود خود را حداکثر کنند. در صورتی که چند نیروگاه به شکل هماهنگ بهره‌برداری شوند، ابعاد و پیچیدگی‌های مسأله برنامه‌ریزی مشارکت افزایش می‌یابد. در این شرایط لازم است برای تعیین وضعیت بهینه مشارکت واحدها (یا تعیین پیشنهاد بهینه به بازار برق) سود مجموعه بهینه شود. بنابراین، مسأله بهره‌برداری هماهنگ از مجموعه نیروگاه‌ها به یک مسأله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود. برنامه‌ریزی هماهنگی واحدهای تجدیدپذیر نیز به حل یک مسأله بهینه‌سازی منجر می‌شود. از آنجا که، برنامه‌ریزی تولید نیروگاه‌های بادی، تلمبه-ذخیره‌ای و فتوولتائیک تحت تاثیر عدم قطعیت قیمت بازار برق و تولید این واحدها است، این مسأله برنامه‌ریزی به یک مسأله بهینه‌سازی تصادفی تبدیل شود. به این منظور، در ابتدا مقادیر تولید واحد بادی، قیمت توان و رزرو پیش‌بینی می‌شود؛ سپس، عدم قطعیت شاخص‌ها توسط سناریوهای مختلف مدل می‌شود. در ادامه برخی دیگر از مزایای مسأله پیشنهادی در این مقاله بیان می‌شود تا ویژگی‌های برتر روش پیشنهادی بیش از پیش مشهود شود.

الف) برنامه‌ریزی هماهنگ ۳ نوع تولید کننده توان تجدیدپذیر در بازار برق برای ارایه مقادیر بهینه پیشنهادات تولید برای مشارکت در بازار انرژی و خدمات جانبی.

ب) در نظر گرفتن تابع جریمه غیرخطی: که موجب

جرایم منابع بادی که دارای تولید و عدم قطعیت تولید بالایی بودند، پوشش داده شود. این در شرایطی است که مسأله پیشنهادی در این مقاله، به جای تمرکز بر مزارع بادی با مقادیر بالای تولید و عدم قطعیت، بر روی منابع تولیدی با ابعاد کوچکتر مانند مزارع بادی کوچک و واحدهای فتوولتائیک تمرکز شده است. شایان ذکر است که اگر در مدل‌سازی مسأله برنامه‌ریزی هماهنگ تولید واحدها، مزارع بزرگ بادی وجود داشته باشند، میزان تولید واحدهای فتوولتائیک در برابر تولید واحدهای بادی ناچیز می‌شود. با توجه به این مسأله اهمیت مطالعه بر روی مزارع کوچکتر بادی به همراه واحدهای فتوولتائیک بیش از پیش مشخص می‌شود. از طرف دیگر، در هیچ یک از روش‌های مطرح شده پیشین، برنامه‌ریزی همزمان توان و ذخیره در بازار انرژی و خدمات جانبی برای مجموعه نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک و تلمبه-ذخیره‌ای با در نظر گرفتن هزینه عدم تعادل واحدها انجام نشده است. افزون بر این در برخی از این مراجع، پیش‌بینی توان تولیدی واحدها نیز انجام نشده است.

در این مقاله، مسأله بهره‌برداری هماهنگ مزارع بادی، واحدهای فتوولتائیک و واحدهای تلمبه-ذخیره‌ای در بازار برق به شکل یک مسأله برنامه‌ریزی تصادفی مدل‌سازی شده است. به این منظور، توان پیشنهادی مجموعه نیروگاه‌ها به بازارهای انرژی و خدمات جانبی به نحوی تعیین می‌شود که این مجموعه به حداکثر سود دست پیدا کند. در این مسأله، سه شاخص تصادفی قیمت بازار، توان تولیدی مزرعه بادی و توان تولیدی واحدهای فتوولتائیک با استفاده از درخت سناریو مدل‌سازی شده است. افزون بر این، در این مقاله، از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی تولید نیروگاه بادی استفاده شده است. در این شرایط، برنامه‌ریزی مجموعه به نحوی انجام می‌گیرد که، جریمه‌های ناشی از اختلاف سطح تعهدات ارایه شده به بازار و تولیدات واقعی حداقل شود. برای حل مسأله برنامه‌ریزی هماهنگ پیشنهادی، و تعیین نتایج شبیه‌سازی از نرم افزار GAMS^۴ و حلال Cplex

روش های تولید و کاهش سناریو استفاده می شود. در بخش سوم تابع هدف مسأله برنامه ریزی هماهنگ واحدها در بازار برق معرفی شده و این مسأله به یک مسأله بهینه سازی تصادفی تبدیل می شود. با حل این مسأله بهینه سازی تصادفی، مقادیر بهینه پیشنهادات هر مجموعه نیروگاهی به بازار برق تعیین می شود. در بخش چهارم روش پیشنهادی مقادیر بهینه امید ریاضی سود و پیشنهادات تولید واحدهای نیروگاهی محاسبه شده و نمایش داده می شود.

با توجه به این که فرمول مسأله پیشنهادی در این مقاله حداکثر سازی امید ریاضی سود به دست آمده از بازار برق است، و با توجه به اهمیت این مسأله، در ادامه سود شرکت کنندگان در بازار معرفی می شود (بخش ۳). پس از آن مسأله بهینه سازی پیشنهادی این مقاله برای عملکرد هماهنگ واحدها معرفی می شود (بخش ۴). نحوه پیش بینی متغیرها و ساختن سناریوها در (بخش ۵) معرفی می شود. در (بخش ۶) مسأله برنامه ریزی مستقل واحدها معرفی می شود. این مسأله برنامه ریزی برای تحلیل نتایج مسأله برنامه ریزی هماهنگ واحدها استفاده می شود. در (بخش ۷) نتایج شبیه سازی بیان می شود.

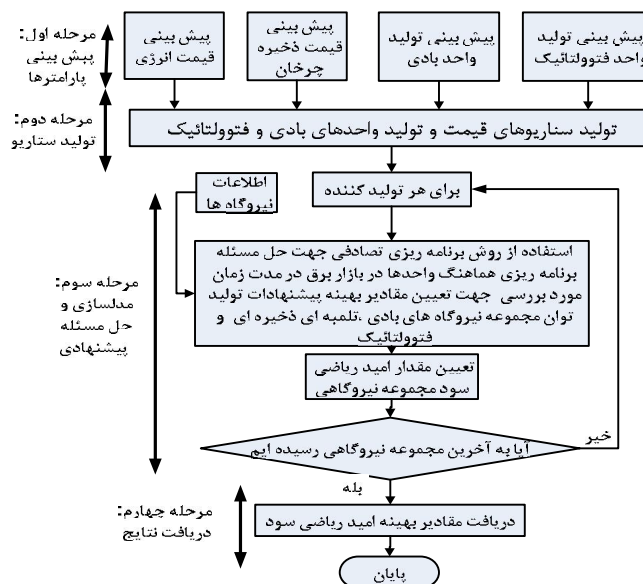
افزایش پیچیدگی مسأله تعیین مقادیر پیشنهاد بهینه می شود. (ج) استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی تولید واحد بادی و مدل سازی عدم قطعیت تولید واحدها با استفاده از روش درخت سناریو. (د) مدل سازی عدم قطعیت پیش بینی قیمت انرژی و ذخیره چرخان برای تعیین بهینه پیشنهاد تولید واحدهای تجدیدپذیر.

۲-۲- فلوچارت روش پیشنهادی

فلوچارت روش پیشنهادی برای برنامه ریزی هماهنگ مشارکت واحدهای تجدیدپذیر در بازار برق در شکل ۱ نمایش داده شده است. این فلوچارت از ۴ مرحله تشکیل شده است. در ادامه توضیحاتی در مورد بخش های روش پیشنهادی بیان می شود.

در بخش اول روش پیشنهادی، مقدار قیمت های انرژی و رزرو روز آینده، به همراه تولید واحدهای بادی و فتوولتائیک پیش بینی می شود. به این منظور در این پژوهش از شبکه های عصبی مصنوعی برای پیش بینی تولید توان واحدهای بادی استفاده شده است.

در بخش دوم روش پیشنهادی، سناریوهای تولید واحدها و قیمت انرژی ساخته می شود. به این منظور از



شکل (۱): روش پیشنهادی برای برنامه ریزی مشارکت نیروگاهها در شرایط بهره برداری هماهنگ نیروگاهها

۳- سود شرکت کنندگان در بازار برق

۳-۱- تعیین درآمد حاصل از شرکت در بازار

در بازار توان روزپیش، تولیدکنندگان و مصرف کنندگان، با توجه به قیمت‌های پیش‌بینی شده بازار، پیشنهادات تولید خود را ارایه می‌کنند. در این شرایط، سود هر نیروگاه با توجه به قیمت انرژی، هزینه عدم تعادل، مقادیر انرژی پیشنهادی و انرژی تحویلی به شکل زیر تعیین می‌شود:

$$PF(k,t) = RV(k,t) - TC(k,t) - IC(k,t) \quad (1)$$

در این رابطه $TC(k,t)$ ، $RV(k,t)$ ، $PF(k,t)$ و $IC(k,t)$ به ترتیب مقادیر سود، درآمد، هزینه بهره‌برداری و درآمد/ هزینه عدم تعادل، واحد k ام در ساعت t است. مقدار این شاخص‌ها با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شود.

$$RV(k,t) = P_C(k,t).epr(t) \quad (2)$$

$$TC(k,t) = (a_k + b_k \cdot \tilde{P}_D(k,t) + c_k \cdot \tilde{P}_D^2(k,t))U(k,t) + SU(k,t) \quad (3)$$

$$IC(k,t) = \tilde{C}_{imb}(k,t).f(P_C(k,t) - \tilde{P}_D(k,t)) \quad (4)$$

که رابطه (۲) بیانگر درآمد حاصل از فروش انرژی به مقدار $P_C(k,t)$ با قیمت $epr(t)$ است. رابطه (۳) نیز هزینه بهره‌برداری واحد را نمایش می‌دهد. این هزینه تابعی از توان تولیدی واحد $\tilde{P}_D(k,t)$ است. رابطه (۴) بیانگر درآمد/ هزینه عدم تعادل واحدها است. این درآمد/ هزینه تابعی از تفاوت انرژی فروخته شده و انرژی تولیدی $(P_C(k,t) - \tilde{P}_D(k,t))$ است. این درآمد/ هزینه با تفاوت توان تولیدی و پیشنهادی رابطه درجه ۲ دارد. رابطه زیر تابع درآمد/ هزینه پیشنهادی برای عدم تعادل واحد در بازار برق را نمایش می‌دهد.

$$IC(k,t) = \left(S_{CR}(t) + D_{CR}(t) \cdot \left(\frac{P_C(t)}{\tilde{P}_D(t)} \right)^2 \right) \times (P_C(t) - \tilde{P}_D(t)) \quad (5)$$

که مقادیر $S_{CR}(t)$ و $D_{CR}(t)$ به شکل ضریبی از قیمت لحظه‌ای انرژی بوده و به شکل زیر تعیین می‌شود.

$$\begin{cases} D_{CR}(t) = (1 + \beta).epr(t) \\ S_{CR}(t) = (1 - \beta).epr(t) \end{cases} \quad (6)$$

در این رابطه β عددی ما بین صفر تا یک است. همان گونه که در این روابط مشاهده می‌شود $\tilde{P}_D(t)$ ، $\tilde{C}_{imb}(t)$ و $epr(t)$ تا زمان تحویل انرژی نامعلوم‌اند. این β متغیر، عامل ایجاد عدم قطعیت و در نتیجه خطر کردن در برنامه‌ریزی هستند [۲۲].

۳-۲- تاثیر عدم قطعیت بر روی درآمد به دست

آمده از شرکت در بازار

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، سود مشارکت در بازار برق وابسته به سناریوی قیمت و سناریوی توان تولیدی واحدهاست. در صورت وجود عدم قطعیت، مجموعه‌های نیروگاهی به جای حداکثر کردن سود، تمایل به حداکثر کردن امید ریاضی سود خود خواهند داشت. بنابراین، پیشنهاد بهینه توان تولیدی مجموعه نیروگاهی با حل مسئله بهینه‌سازی زیر تعیین می‌شود.

$$Max \quad EPF = \sum_{s \in S} \rho(s).PF(s) \quad (7)$$

با در نظر گرفتن تاثیر عدم قطعیت شاخص‌ها، روابط (۲) تا (۴) به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$PF(s) = RV(s) - TC(s) - IC(s) \quad (8)$$

$$RV(s) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N \left[\begin{aligned} & epr(s,t).P_C(t) \\ & + srpr(s,t).R_C(t) \\ & + nsrpr(s,t).N_C(t) \end{aligned} \right] \quad (9)$$

$$TC(s) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N \left[\begin{aligned} & (a_k + b_k \cdot P_D(k,s,t) \\ & + c_k \cdot P_D^2(k,s,t)).U(k,s,t) \\ & + (SU_{cost}(k,s,t)) \end{aligned} \right] \quad (10)$$

$$IC(s) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N \left(\tilde{C}_{imb}(s,t).f(P_C(t) - \tilde{P}_D(s_{pv}, s_w, t)) \right) \quad (11)$$

واحدهاست. در این مقاله، درآمدها ناشی از فروش انرژی و زرو در آمد عدم تعادل توسط تمام نیروگاههاست. همچنین، هزینهها شامل هزینه راهاندازی نیروگاهها، هزینه خرید توان پمپاژ نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای، هزینه باتری واحد فتوولتائیک، هزینه راهاندازی واحدها و هزینه عدم تعادل مجموعه نیروگاههاست. مسأله بهینه‌سازی پیشنهادی به شکل زیر است:

۴- مدل‌سازی مسأله پیشنهادی برنامه‌ریزی هماهنگ واحدها

در این بخش مسأله تعیین پیشنهادات بهینه تولید واحدها (مرحله سوم فلوچارت شکل (۱)) به شکل یک مسأله بهینه‌سازی مدل‌سازی می‌شود. هدف مسأله بهینه‌سازی حداکثر شدن سود (تفاضل درآمدها و هزینه‌های) واحدها با در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری از

$$\max \quad EPF = \sum_{s=1}^{NS_p} \sum_{s_{pv}=1}^{NS_{PH}} \sum_{s_w=1}^{NS_W} \rho(s_p, s_{pv}, s_w) \left(\sum_{w=1}^{NW} \sum_{l=1}^{NPS} \sum_{pv=1}^{NPV} PF(s_w, s_p, s_{pv}, w, l, pv, t) \right) \quad (12)$$

Subject to:

$$P_C(t) \leq \sum_{w=1}^{NW} P^{\max}(w) + \sum_{pv=1}^{NPH} (P^{\max}(pv) + \alpha.P_{DeBatt}^{\max}(bt = pv)) + \sum_{l=1}^{NPS} P_{g \max}(l, t) \quad (13)$$

$$\tilde{P}_D(s_w, s_p, s_{pv}, t) = \sum_{l=1}^{NPS} P_D(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) + \sum_{w=1}^{NW} \tilde{P}_D(w, s_w, t) + \sum_{k=1}^{NPH} \tilde{P}_D(k, s_{pv}, t) \quad (14)$$

$$P_D(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) = \begin{cases} P_g(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) = a_l (qg(s_w, s_p, s_{pv}, l, t))^2 + b_l qg(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) + c_l & \text{if } qg(l, t) \neq 0 \\ -P_p(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) = -\left(a_l (qp(s_w, s_p, s_{pv}, l, t))^2 + b_l qp(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) + c_l\right) & \text{if } qp(l, t) \neq 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$v^u(l, t) = v^u(l, t-1) - qg(s_w, s_p, s_{pv}, l, t-1) + qp(s_w, s_p, s_{pv}, l, t-1) \quad (16)$$

$$v^l(l, t) = v^l(l, t-1) + qg(s_w, s_p, s_{pv}, l, t-1) - qp(s_w, s_p, s_{pv}, l, t-1) \quad (17)$$

$$v_{\min}^u(l) \leq v(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) \leq v_{\max}^u(l) \quad \text{و} \quad v_{\min}^l(l) \leq v(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) \leq v_{\max}^l(l) \quad (18)$$

$$v^u(l, t=1) = v^u(l, ini) \quad \text{و} \quad v^u(l, t=T) > v^u(l, end) \quad (19)$$

$$v^l(l, t=1) = v^l(l, ini) \quad \text{و} \quad v^l(l, t=T) = v^l(l, end) \quad (20)$$

$$qg_{\min}(l).I_g(l, t) \leq qg(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) \leq qg_{\max}(l).I_g(l, t) \quad (21)$$

$$qp_{\min}(l).I_g(l, t) \leq qp(s_w, s_p, s_{pv}, l, t) \leq qp_{\max}(l).I_g(l, t) \quad (22)$$

$$P_D(s_w, s_p, s_{pv}, l, t).I_g(l, t) + R_g(l, t) + N_u(l, t) \leq P_{\max}(l).I_g(l, t) \quad (23)$$

$$N_d(l, t) \leq QSC(l).(1 - I_g(l, t) - I_p(l, t)) \quad (24)$$

$$R_p(l, t) = P_p(l, t).I_p(l, t) \quad (25)$$

$$R_{C,PS}(l, t) = R_g(l, t) + R_p(l, t) \quad \text{و} \quad N_{C,PS}(l, t) = N_u(l, t) + N_d(l, t) \quad (26)$$

$$0 \leq P_{ChBatt}(pv, s_{pv}, t) \leq P_{ChBatt}^{\max}(pv).U_{ChBatt}(pv, s_{pv}, t) \quad (27)$$

$$0 \leq P_{DeBatt}(pv, s_{PH}, t) \leq P_{DeBatt}^{\max}(pv).U_{DeBatt}(pv, s_{pv}, t) \quad (28)$$

$$U_{ChBatt}(pv, t) + U_{DeBatt}(pv, t) \leq 1 \quad (29)$$

$$E(bt, t=1) = E_{ini}(bt) \quad \text{و} \quad E(bt, s_{pv}, t=24) \geq E_{end}(bt) \quad (30)$$

$$E(bt, s_{pv}, t) = E(bt, s_{pv}, t-1) + P_{ChBatt}(bt, s_{pv}, t-1) - P_{DeBatt}(bt, s_{pv}, t-1) \quad (31)$$

$$\tilde{P}_D(k, s_{pv}, t) = P(k, s_{pv}, t) - P_{ChBatt}(k, s_{pv}, t) + \alpha.P_{DeBatt}(k, s_{pv}, t) \quad (32)$$

شده است. در رابطه (۳۲) توان تولیدی واحد فتوولتائیک PV ام به همراه باتری نمایش داده شده است. شایان ذکر است که توان تحویلی توسط واحد فتوولتائیک PV ام شامل توان تولیدی آن به همراه انرژی شارژ یا دشارژ شده باتری این واحد با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری α است. شایان ذکر است که قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده تابع هدف مسأله بهینه‌سازی رابطه (۱۲) توسط روابط زیر تعیین می‌شود.

$$PF(s_w, s_p, s_{pv}, w, l, pv, t) = \begin{pmatrix} RV(s_w, s_p, s_{pv}, w, l, pv, t) \\ -TC(s_w, s_p, s_{pv}, w, l, pv, t) \\ -IC(s_w, s_p, s_{pv}, w, l, pv, t) \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$RV(s_p, t) = \begin{pmatrix} epr(s_p, t).PC(t) \\ + srpr(s_p, t).RC(t) \\ + nsrpr(s_p, t).NC(t) \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$TC(s_w, s_p, s_{pv}, w, l, pv, t) = \begin{pmatrix} \sum_{w=1}^{NW} (a_w) + \sum_{l=1}^{NPS} (a_l + SU_{cost}(t)) \\ + \sum_{pv=1}^{NPV} (\cos t_{Batt}(bt = pv, t)) \end{pmatrix} \quad (35)$$

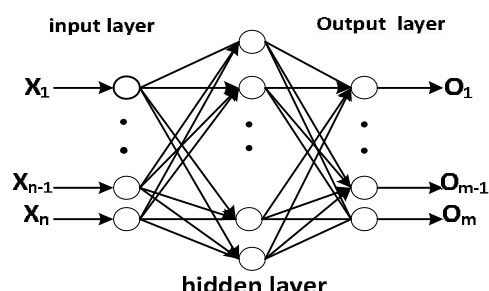
$$IC(s_w, s_p, s_{pv}, w, l, pv, t) = \tilde{C}_{imb}(s, t).f(PC(t) - \tilde{P}_D(s_w, s_p, s_{pv}, t)) \quad (36)$$

مقدار $Cost_{Batt}(t)$ مورد استفاده در رابطه (۳۵) توسط رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Cost_{Batt}(bt, t) = [A_{Ch}(bt).U_{Ch, Batt}(bt, t) + B_{Ch}(bt).P_{Ch, Batt}(bt, t)] + [A_{De}(bt).U_{De, Batt}(bt, t) + B_{De}(bt).P_{De, Batt}(bt, t)] + C(bt) \quad (37)$$

در این رابطه، ترم اول مربوط به هزینه شارژ، ترم دوم مربوط به هزینه دشارژ و ترم آخر $C(bt)$ مربوط به هزینه‌های ثابت باتری است.

که در این روابط، معادله (۱۲) تابع هدف مسأله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها را نمایش می‌دهد. رابطه (۱۳) قید حداکثر توان قابل عرضه در بازار توان را نمایش می‌دهد. رابطه (۱۴)، توان تولیدی مجموعه نیروگاهی را در ساعت t نمایش می‌دهد. شایان ذکر است که در شرایط بهره‌برداری هماهنگ از واحدها، مقدار توان تحویلی برابر با مجموع توان تولیدی توسط نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک و تلمبه-ذخیره‌ای است. رابطه بین میزان توان تولید (پمپاژ) شده یک واحد تلمبه-ذخیره‌ای و میزان تخلیه (پمپاژ) آب به شکل یک تابع درجه دوم مطابق رابطه (۱۵) تعریف می‌شود. برای مدل‌سازی این تابع می‌توان از یک تابع تکه‌ای خطی استفاده نمود. روابط (۱۶) و (۱۷) قید تعادل آب مخازن نیروگاه تلمبه-ذخیره‌ای در هر لحظه را بیان می‌کند. در رابطه (۱۸)، محدودیت حجم آب مخزن بالایی و پایینی نیروگاه‌های تلمبه-ذخیره‌ای در طول دوره پیشنهادی بیان شده است. قیود (۱۹-۲۰)، قید میزان حجم آب مخزن در لحظه ابتدایی و انتهایی را بیان می‌کند. مقادیر حداکثر و حداقل نرخ پمپاژ و تخلیه آب از مخازن توسط روابط (۲۱) و (۲۲) نمایش داده شده است. در رابطه (۲۳) قید حداکثر توان قابل عرضه به بازارهای انرژی و ذخیره نمایش داده شده است. در رابطه (۲۴) حداکثر توان ذخیره واحد تلمبه-ذخیره‌ای در حالت خاموش (حالتی که واحد در حالت پمپاژ و یا ژنراتوری نباشد) نمایش داده شده است. رابطه (۲۵) توان ذخیره قابل تولید واحد در شرایط پمپاژ را نشان می‌دهد. در رابطه (۲۶) مقدار ذخیره پیشنهادی واحد تلمبه-ذخیره‌ای به بازار برق نمایش داده شده است. روابط (۱۷) و (۲۸) قیود شارژ و دشارژ باتری مربوط به واحد فتوولتائیک PV ام را نمایش می‌دهند. رابطه (۲۹) نشان می‌دهد که باتری در لحظه t تنها در یکی از حالت‌های شارژ یا دشارژ می‌تواند قرار بگیرد. در رابطه (۳۰)، قیود مربوط به حجم اولیه و نهایی انرژی ذخیره شده در باتری واحد فتوولتائیک PV ام نشان داده شده است. در رابطه (۳۱) قید تعادل انرژی باتری مربوط به واحد فتوولتائیک PV ام در هر لحظه بیان



شکل (۲): مدل یک شبکه عصبی

در این مقاله، به منظور پیش‌بینی تولید واحدهای بادی از شبکه عصبی استفاده شده است. از آنجا که پیش‌بینی تولید واحد بادی در روزهایی که میزان باد در حال افزایش است، با روزهایی که میزان باد در حال کاهش است متفاوت است، در این مقاله از دو شبکه عصبی متفاوت برای پیش‌بینی تولید واحدهای بادی استفاده می‌شود. در این شرایط یک شبکه عصبی جداگانه برای پیش‌بینی تولید واحدهای بادی در شرایط افزایش باد آموزش داده می‌شود و یک شبکه عصبی دیگر برای پیش‌بینی تولید واحدهای بادی در شرایط کاهش باد آموزش داده می‌شود. در این صورت پس از پیش‌بینی افزایش یا کاهش تولید واحدهای بادی در روز آینده (با استفاده از داده‌های هواشناسی) شبکه عصبی مورد نظر انتخاب می‌شود.

۵-۲- تولید سناریوهای قیمت بازار و تولید

واحد فتوولتائیک و بادی

در این پژوهش، برای تولید سناریوهای هر شاخص دارای عدم قطعیت، در ابتدا مقدار شاخص با استفاده از روش‌های تخمین پیش‌بینی می‌شود. در ادامه احتمال وقوع هر یک از شاخص‌ها با استفاده از توزیع احتمال وقوع سناریوها و توسط اطلاعات آماری پراکندگی وقوع سناریوها ساخته می‌شود. پس از پیش‌بینی شاخص و تعیین شاخص‌های تابع توزیع، سناریوهای مربوط به متغیر پیش‌بینی شده و با استفاده از روش درخت سناریو مدل‌سازی می‌شود. در پایان از روش کاهش سناریو برای کاهش سناریوها استفاده می‌شود. برای روشن شدن بیشتر این مسأله، در ادامه توضیحات کافی در مورد روش تشکیل سناریو، روش درخت سناریو و روش کاهش سناریوی مورد

۵- مراحل اول و دوم فلوجارت پیشنهادی:

پیش‌بینی متغیرها و تولید سناریو

در این بخش در مورد مرحله اول و دوم فلوجارت روش پیشنهادی ارائه شده در شکل (۱) توضیح داده می‌شود. در این راستا فرض شده است که سازمان هواشناسی پیش‌بینی دما را با دقت بالا انجام می‌دهد. با استفاده از نتایج پیش‌بینی دما، پیش‌بینی بار توسط ISO^۶ انجام شده است. اکنون مجموعه نیروگاهی با استفاده از نتایج پیش‌بینی هواشناسی، تولید واحدهای بادی و فتوولتائیک را تعیین می‌کنند. افزون بر این، مجموعه نیروگاهی پیش‌بینی قیمت توان و ذخیره را با استفاده از پیش‌بینی بار ارائه شده توسط ISO انجام می‌دهد. در این راستا در ادامه روش مورد استفاده برای پیش‌بینی تولید واحدهای بادی ارائه می‌شود.

۵-۱- پیش‌بینی تولید واحدهای بادی با استفاده

از شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی از جمله روش‌های هوشمندی است که به شکل متداول برای پیش‌بینی تولید واحدهای بادی استفاده می‌شود. با توجه به این مسأله، در این مقاله شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی تولید واحد بادی استفاده شده‌اند. در این مقاله، برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم آموزش پس از انتشار استفاده شده است. با بررسی‌های انجام شده مشاهده شد، خطای شبکه عصبی آموزش داده شده توسط الگوریتم آموزش پس از انتشار در حد قابل قبولی قرار دارد. که این امر تایید کننده استفاده از این الگوریتم برای آموزش شبکه عصبی است.

به طور معمول شبکه عصبی ترکیبی از لایه‌های ورودی، خروجی و مخفی هستند که نمونه‌ای از این شبکه‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل، یک شبکه پرسپترون با n ورودی و m خروجی نشان داده است که هر دایره، بیان کننده یک نرون عصبی است. برای آموزش شبکه عصبی به الگوهای ورودی و خروجی اولیه‌ای به نام داده‌های آموزشی نیاز است.

استفاده بیان می‌شود.

تک تک حالات برای متغیرها به دست می‌آید.

۵-۲-۱- تشکیل سناریو

مرحله اول: گسسته‌سازی توابع توزیع پیوسته و تعیین احتمال رخداد هر یک از قسمت‌های گسسته شده.

در این مرحله، تابع توزیع احتمال وقوع هر متغیر به چند قسمت با پهنای σ تقسیم می‌شود. در این شرایط، هر قسمت دارای یک احتمال رخداد و درصد خطای مشخصی است.

مرحله دوم: محاسبه تابع توزیع تجمعی مربوط به تابع به دست آمده در مرحله اول.

در این مرحله، میانگین مقدار تابع توزیع برای هر یک از قسمت‌های گسسته مشخص شده متناظر با احتمال رخدادی است که به هر یک از قسمت‌های گسسته‌سازی شده اختصاص داده شده است. این مرحله برای تمام متغیرهای همراه با عدم قطعیت مانند تولید واحد بادی، تولید واحد فتوولتائیک، قیمت انرژی و قیمت ذخیره چرخان و غیرچرخان انجام می‌گیرد.

مرحله سوم: استفاده از روش چرخ گردان رولت برای تولید سناریو

در این مرحله، متناظر با هر یک از شاخص‌های نامعین موجود در مسأله، عددی تصادفی ایجاد می‌شود. مجموعه اعداد خود یک سناریو تشکیل می‌دهند.

مرحله چهارم: محاسبه مقادیر هر سناریو

در این مرحله مقادیر جدید برای هر یک از متغیرهای همراه با عدم قطعیت محاسبه می‌شود. به این منظور میزان خطای هر یک از متغیرها با مقدار پیش‌بینی شده آن‌ها جمع شده و مقدار متغیر مورد نظر مربوط به سناریوی مورد بحث را مطابق رابطه زیر مشخص می‌کند.

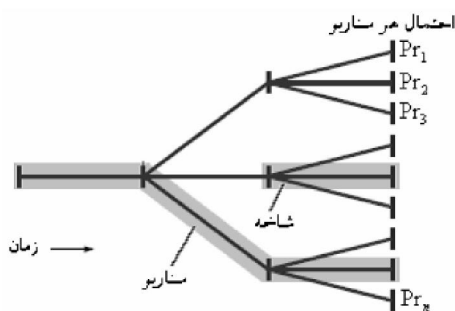
$$Par(s,t) = Par_j(t) + \Delta Par(s) \quad t=1, \dots, T, s=1, \dots, NS \quad (38)$$

با توجه به وجود تعداد زیاد شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش، احتمال هر سناریو از ضرب احتمال وقوع

۵-۲-۲- مدل سازی عدم قطعیتها به کمک درخت

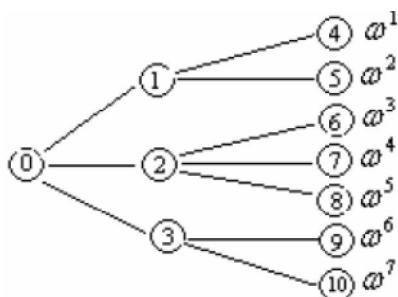
سناریو [۲۳]

یک از راههای مدل کردن عدم قطعیتها استفاده از روش درخت سناریو است. هر شاخه درخت نشانگر آینده احتمالی است که برای عدم قطعیتها با یک احتمال خاص به وجود می‌آید. هر شاخه ممکن است بخشی از سناریوهای مختلف باشد. شکل (۳) توصیفی از درخت سناریو است.



شکل (۳): تعریف سناریو و شاخه در درخت سناریو

احتمال هر سناریو برابر با حاصل ضرب احتمال شاخه‌های آن سناریو است. افزون بر این، حاصل جمع احتمال سناریوها باید مساوی یک باشد. برای توضیح بیشتر درخت سناریو شکل (۴) را در نظر بگیرید.



شکل (۴): درخت سناریو

این درخت دارای ۷ سناریو ($s=7$) و ۱۱ گره است

r بیانگر شماره سناریویی است که کمترین فاصله را با سناریوی S دارد.

مرحله سوم- در این مرحله حاصل ضرب احتمال هر سناریو در کمترین فاصله سناریوی یاد شده با سایر سناریوها محاسبه می شود.

$$PD_{k,r} = \rho(k) \cdot DT_{k,r} \quad k \in S \quad (41)$$

بنابراین، شاخصه d به شکلی انتخاب می شود که در رابطه زیر صدق کند:

$$PD_d = \min PD_k \quad k \in S \quad (42)$$

مرحله چهارم- در این مرحله d امین سناریو از مجموعه سناریوها حذف می شود.

$$S = S - \{d\}, DS = DS + \{d\}, \rho(r) = \rho(r) + \rho(d) \quad (43)$$

مرحله پنجم- مراحل ۲ تا ۴ به تعدادی تکرار می شود که تعداد سناریوهای مجموعه S به تعداد دلخواه برسد.

پس از این که روش کاهش سناریو بر روی سناریوهای اولیه پیاده سازی شد، سناریوهای به دست آمده برای حل مسأله همراه با عدم قطعیت استفاده می شود.

۶- برنامه ریزی مستقل واحدهای تجدید پذیر

در این پژوهش، برای تبیین مزایای روش برنامه ریزی هماهنگ پیشنهادی، نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از بهره برداری مستقل نیروگاهها مقایسه می شود. در شرایط عملکرد مستقل نیروگاهها لازم است امید ریاضی درآمد هر نیروگاه با در نظر گرفتن همراه قیود متناظر آن نیروگاه بهینه (حداکثر) شود. در این شرایط مسأله های بهینه سازی زیر برای برنامه ریزی مشارکت نیروگاههای تلمبه-ذخیره ای، فتوولتائیک و بادی استفاده می شود.

۷- نتایج شبیه سازی

در این بخش عملکرد مدل پیشنهادی برای برنامه ریزی هماهنگ تولید واحدهای تجدیدپذیر سیستم ارتقا یافته ۱۱۸

$N = \{0, 1, \dots, 10\}$ هر گره دارای یک مرحله زمانی خاص نیز می باشد که آن را به شکل $t(n)$ نمایش می دهیم برای مثال $t(3) = 2$. همچنین، هر گره شامل مجموعه ای از سناریوهاست که از آن عبور می کنند و این مجموعه را دسته می نامیم و با β نمایش می دهیم برای مثال در $\beta_2 = \{3, 4, 5\}$ سناریوهای $\{\omega^3, \omega^4, \omega^5\}$ از گره ۲ عبور می کند. $Son(n)$ را مجموعه پسران گره n می نامند و $F(n)$ نشان دهنده پدر گره n است. در شکل ۴ رابطه زیر برقرار است.

$$F(6) = F(7) = F(8) = 2, Son(1) = \{4, 5\} \quad (41)$$

بردار متغیرهای تصمیم گیری را در روی درخت سناریو با $\{X_S\}_{S \in S}$ نمایش می دهیم. متغیرهای تصمیم گیری $\{X_S^t\}_{S \in S}$ خود به زیر بردارهای $\{X_S^t\}_{t=1}^T$ تقسیم می شوند که T انتهای دوره برنامه ریزی است.

۵-۲-۳- کاهش تعداد سناریوها به روش بازگشتی

در این پژوهش، از روش بازگشتی همزمان برای کاهش سناریو استفاده شده است. در ادامه توضیحات کلی در مورد این روش ارائه می شود. فرض کنید $\zeta_s (s = 1, 2, \dots, NS)$ یک مجموعه NS تایی از سناریوهای موجود با احتمالهای $\rho(s) (s = 1, 2, \dots, NS)$ و $DT_{s,s'}$ نشان دهنده فاصله بین دو سناریوی (s, s') است. برای کاهش سناریو با استفاده از روش بازگشتی همزمان لازم است مراحل زیر اعمال شود: مرحله اول- مجموعه S شامل تمامی سناریوهای موجود و مجموعه DS شامل سناریوهایی که باید حذف شوند را در نظر بگیرید. در ابتدا مجموعه DS تهی است. فاصله بین هر دو سناریوی موجود در مجموعه S به شکل زیر محاسبه می شود:

$$DT_{s,s'} = DT(\zeta_s, \zeta_{s'}) = \sqrt{\sum_{i=1}^d (x_i^s - x_i^{s'})^2} \quad s, s' \in S \quad (39)$$

مرحله دوم- برای هر سناریو k ، کمترین فاصله را با سایر سناریوها مشخص می کنیم.

$$DT_{k,r} = \min DT_{k,s'} \quad k, s' \in S; s' \neq k \quad (40)$$

باس IEEE مطالعه می‌شود. به این منظور، برای شبیه‌سازی، منابع تولیدی با ابعاد کوچک مانند مزارع بادی کوچک و واحدهای فتوولتائیک استفاده شده‌اند. واحدهای تجدیدپذیر مورد مطالعه در این سیستم شامل ۳ واحد تلمبه-ذخیره‌ای، یک مزرعه بادی و یک نیروگاه فتوولتائیک است. این مجموعه نیروگاهی با توجه به سناریوهای پیش‌بینی تولید توان بادی، فتوولتائیک، پیش‌بینی قیمت انرژی و ذخیره در هر ساعت بازار روز پیش پیشنهادات خود را به بازار برق ارائه می‌دهند. این پیشنهادات به گونه‌ای ارائه می‌شود که تابع هدف مسأله‌ی بهینه‌سازی ماکزیمم شود. برای حل مسأله بهینه‌سازی از نرم افزار GAMS استفاده شده است. نتایج با استفاده از یک کامپیوتر شخصی با پردازنده دو هسته ای و فرکانس ۲/۴ گیگا هرتز و دو گیگا بایت RAM به دست آمده است. شایان ذکر است با توجه به این که مسأله پیشنهادی در این مقاله پیش از این بررسی نشده است، پژوهشی برای مقایسه نتایج وجود ندارد.

۷-۱- داده‌های اولیه

جدول ۱ اطلاعات مربوط به مزرعه بادی و نیروگاه فتوولتائیک سیستم ۱۱۸ باس IEEE را نشان می‌دهد. در این جدول، مقادیر مینیمم و ماکزیمم مقدار توان تولیدی هر نیروگاه مشخص شده است [۲۴]. همچنین، برای تعیین مقدار توان تولیدی زمان‌های گذشته واحد بادی مورد استفاده برای پیش‌بینی تولید واحد بادی از مرجع [۲۵] استفاده شده است [۲۶]. اطلاعات مربوط به سه واحد تلمبه-ذخیره‌ای سیستم مورد مطالعه در [۲۷]. وجود دارد. شایان به ذکر است که حداقل زمان روشن و خاموش بودن هر یک از واحدها ۶۰ دقیقه است.

از آنجا که سطح توان تقاضا (بار) با تغییر زمان تغییر می‌کند و این سطح توان دارای عدم قطعیت است، بنابراین،

لازم است تغییرات تقاضا (بار) و عدم قطعیت آن توسط یک ظرفیت تولید (ذخیره) مناسب پوشش داده شود. سهمی از تقاضا که قابل پیش‌بینی است، با خرید انرژی در بازار روز پیش تأمین می‌شود. تغییرات و عدم قطعیت در سطح تقاضا، توسط ذخیره تولید شده از واحدهای خاموش و یا روشن با یک نرخ شیب مجاز، پوشش داده می‌شود. در بازار برق، خدمات رزرو (ذخیره) برای مدیریت کردن تغییرات و عدم قطعیت در سطح تقاضا طراحی شده و در بازار خدمات جانبی معامله می‌شوند. این خدمت شامل هر ۲ نوع رزرو است. در حالت کلی میزان ذخیره مورد نیاز سیستم به شکل مستقیم بر نحوه پیشنهاد توان نیروگاه‌ها به بازار تأثیر نمی‌گذارد بلکه این مسأله به شکل غیر مستقیم بر عملکرد واحدها تأثیرگذار است. در این شرایط، با افزایش میزان ذخیره مورد نیاز سیستم قدرت، قیمت این خدمت جانبی نیز افزایش می‌یابد که این مسأله در پیش‌بینی قیمت ذخیره چرخان سیستم قدرت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این مطلب، در جدول ۲ مقادیر پیش‌بینی قیمت انرژی، ذخیره چرخان و ذخیره غیرچرخان سیستم مورد مطالعه نمایش داده شده است. افزون بر این در این جدول مقادیر انحراف معیار این پیش‌بینی‌ها نیز نمایش داده شده است. توضیحات کامل‌تر در مورد اطلاعات قیمت در [۲۸] بیان شده است. شایان ذکر است که از روش درخت سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت شاخص‌ها استفاده شده است.

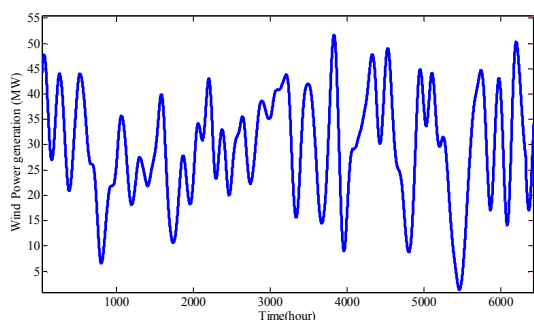
جدول (۱): اطلاعات مزرعه بادی و فتوولتائیک سیستم ۱۱۸

باس IEEE

واحد بادی	مینیم توان (MW)	ماکزیمم توان (MW)
بادی	۰/۰	۱۰۰
فتوولتائیک	۰/۰	۴/۶۸

جدول (۲): مقادیر پیش‌بینی قیمت انرژی، ذخیره چرخان و غیر چرخان و واریانس تغییرات آن‌ها

ساعت	قیمت انرژی (USD/ MWh)	واریانس قیمت انرژی	قیمت ذخیره چرخان (USD/ MWh)	واریانس ذخیره غیر چرخان	قیمت ذخیره غیر چرخان (USD/ MWh)	واریانس ذخیره غیر چرخان
۱	۲۱/۷۱	۱۰/۸۶	۲	۰/۳	۱/۲	۰/۱۸
۲	۱۷/۵	۸/۷۵	۱/۷	۰/۲۶	۰/۹	۰/۱۴
۳	۱۳/۰۵	۶/۵۳	۱/۲۷	۰/۱۹	۰/۴۷	۰/۰۷
۴	۱۲/۱۵	۶/۰۸	۱/۱۲	۰/۱۷	۰/۳۲	۰/۰۵
۵	۱۳/۷۷	۶/۸۹	۱/۳۵	۰/۲	۰/۵۵	۰/۰۸
۶	۱۵/۹۹	۸	۲/۱۸	۰/۳۳	۱/۳۸	۰/۳۱
۷	۲۰/۹۹	۱۰/۵	۲/۱۷	۰/۳۳	۱/۳۷	۰/۳۱
۸	۲۳/۰۱	۱۱/۵۱	۲/۳۴	۰/۳۵	۱/۵۴	۰/۳۳
۹	۲۳/۸۵	۱۱/۹۳	۲/۵۱	۰/۳۸	۱/۷۱	۰/۳۶
۱۰	۲۶/۱۱	۱۳/۰۵	۲/۶۹	۰/۴	۱/۸۹	۰/۳۸
۱۱	۲۷/۲۳	۱۳/۶۲	۲/۹۴	۰/۴۴	۲/۱۴	۰/۳۲
۱۲	۲۷/۹۹	۱۴	۲/۹۵	۰/۴۴	۲/۱۵	۰/۳۲
۱۳	۲۸/۷	۱۴/۳۵	۲/۷۷	۰/۴۲	۱/۹۷	۰/۳
۱۴	۲۷/۹	۱۳/۹۵	۲/۸۷	۰/۴۳	۲/۰۷	۰/۳۱
۱۵	۲۷/۵۵	۱۳/۷۷	۲/۹۲	۰/۴۴	۲/۱۲	۰/۳۲
۱۶	۲۷/۷۳	۱۳/۸۶	۳/۳۲	۰/۵	۲/۵۲	۰/۳۸
۱۷	۲۸/۱۳	۱۴/۰۶	۳/۲۳	۰/۴۸	۲/۴۳	۰/۳۶
۱۸	۲۸/۵۶	۱۴/۲۸	۲/۹۷	۰/۴۵	۲/۱۷	۰/۳۳
۱۹	۲۸/۸	۱۴/۴	۲/۹۶	۰/۴۴	۲/۱۶	۰/۳۲
۲۰	۳۰/۸۳	۱۵/۴۱	۲/۷۳	۰/۴۱	۱/۹۳	۰/۲۹
۲۱	۳۰/۸۱	۱۵/۴	۲/۳۵	۰/۳۵	۱/۵۵	۰/۳۳
۲۲	۲۹/۳۴	۱۴/۶۷	۱/۷۶	۰/۲۶	۰/۹۶	۰/۱۴
۲۳	۲۶/۵۶	۱۳/۲۸	۱/۵۷	۰/۲۴	۰/۷۷	۰/۱۲
۲۴	۲۵/۱۵	۱۰/۵۸	۱/۱۶	۰/۱۷	۰/۳۶	۰/۰۵



شکل (۵): داده‌های آماری باد مورد استفاده برای پیش‌بینی

تولید توان مجموعه بادی

۲-۷- پیش‌بینی تولید واحد بادی

در این بخش پیش‌بینی تولید واحدهای بادی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شده است. در این راستا مقادیر تولید واحدهای بادی در طول یک سال گذشته که برای آموزش شبکه عصبی استفاده شده است در شکل (۳) نمایش داده شده است. مقدار توان پیش‌بینی شده مجموعه نیروگاه‌های بادی برای ۲۴ ساعت آینده در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول (۳): پیش‌بینی توان تولیدی مزرعه بادی در بازار برق

زمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶
توان (MW)	۳۸/۲	۳۸/۵	۳۸/۸	۳۹/۱	۳۹/۴	۳۹/۷
زمان	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
توان (MW)	۳۹/۹	۴۰/۲	۴۰/۵	۴۰/۷	۴۰/۹	۴۱/۱
زمان	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
توان (MW)	۴۱/۳	۴۱/۵	۴۱/۷	۴۱/۹	۴۲/۱	۴۲/۳
زمان	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
توان (MW)	۴۲/۴	۴۲/۵	۴۲/۶	۴۲/۷	۴۲/۸	۴۲/۹

می‌گیرد. تمام سناریوهای تولید شده و سناریوهای کاهش یافته مربوط به قیمت ذخیره چرخان در شکل (۶-ه) و (۶-و) نمایش داده شده است. شایان ذکر است سناریوهای سایر شاخص‌های دارای عدم قطعیت را نیز می‌توان به همین روش نمایش داد.

۷-۴- بهینه‌سازی مسأله پیشنهادی

در این پژوهش، به منظور حل مسأله برنامه‌ریزی بهینه واحدها از روش برنامه‌ریزی اعداد صحیح استفاده شده است. به این منظور این مسأله توسط نرم افزار GAMS مدل‌سازی شده و با حلال CPLEX حل شده است. فرض شده است که مقدار β در معادله (۶) برابر $0/9$ است [۲۹]. از آنجا که تابع هدف مسأله بهینه‌سازی پیشنهادی شامل توابع غیر خطی و کسری است، بنابراین، از این حلال برای حل مسأله بهینه‌سازی استفاده شده است. از طرف دیگر، احتمال صفر شدن توان تولیدی واحدها در برنامه‌ریزی مستقل واحدهای فتوولتائیک و تلمبه-ذخیره ای وجود دارد، که در نتیجه آن تابع هدف مسأله بهینه‌سازی بی نهایت شده و حل مسأله بهینه‌سازی واگرا می‌شود. برای جلوگیری از این امر، از ترم کسری تابع هدف در برنامه‌ریزی مستقل این واحدها صرف نظر شده است.

۷-۵- تحلیل نتایج

بررسی وضعیت امید ریاضی سود: با حل مسأله برنامه‌ریزی تولید واحدها ارایه شده در بخش (۴) مقدار پیشنهادی تولید مجموعه نیروگاهی به بازار برق تعیین می‌شود. این مقادیر در جدول (۴) نمایش داده شده است. در این جدول، مقدار توان پیشنهادی هر ساعت مجموعه تولیدی (متشکل از نیروگاه بادی، فتوولتائیک و تلمبه-ذخیره‌ای) در حالت عملکرد هماهنگ و مستقل نمایش داده شده است.

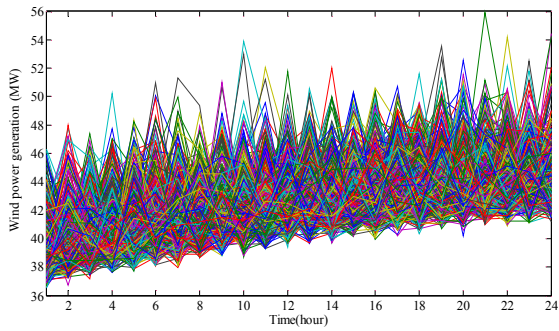
۷-۳- تولید و کاهش سناریو

در این بخش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی معرفی شده در بخش (۵-۱) توان تولیدی واحدهای بادی پیش‌بینی می‌شود. در ادامه، با استفاده از روش مطرح شده در بخش (۵-۲) سناریوهای تولید واحدهای بادی تولید می‌شود. شایان ذکر است در این پژوهش فرض شده است که تولید واحدهای بادی دارای توزیع ویبال است. بنابراین، مقادیر shape parameter و scale parameter این توزیع به ترتیب برابر $3/7$ و $1/6$ فرض شده است. در این شرایط با استفاده از روش بخش (۵-۲) سناریوهای تولید واحد بادی تعیین می‌شود. این سناریوها در شکل (۶-الف) نمایش داده شده است. با استفاده از روش کاهش سناریوی معرفی شده در بخش (۵-۲) سناریوهای کاهش یافته و احتمال وقوع آن‌ها را می‌توان تعیین کرد. سناریوهای کاهش یافته در شکل (۶-ب) نمایش داده شده است.

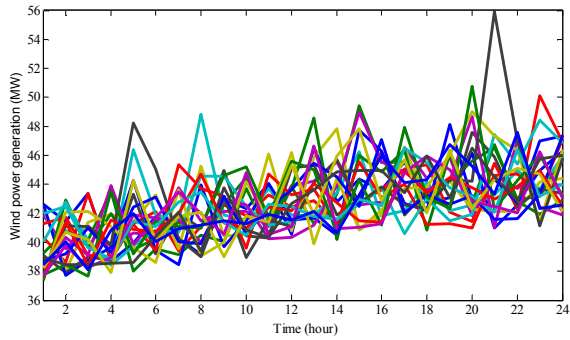
افزون بر این، سناریوهای قیمت انرژی، ذخیره چرخان، ذخیره غیر چرخان و تولید واحد فتوولتائیک با استفاده از روش تولید و کاهش سناریوی معرفی شده در بخش (۴-۲)، ساخته شده است. در شکل (۶-ج) مجموعه سناریوهای قیمت انرژی نمایش داده شده است. با استفاده از روش کاهش سناریو، ۱۵ سناریوی قیمت انرژی نمایش داده شده در شکل (۶-د)، تعیین می‌شود. این سناریوها برای تعیین مقادیر بهینه پیشنهاد تولید نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار

جدول (۴): مقدار توان پیشنهادی نیروگاه‌ها به بازار برق در حالت بهره‌برداری مستقل (UO) و هماهنگ (JO)

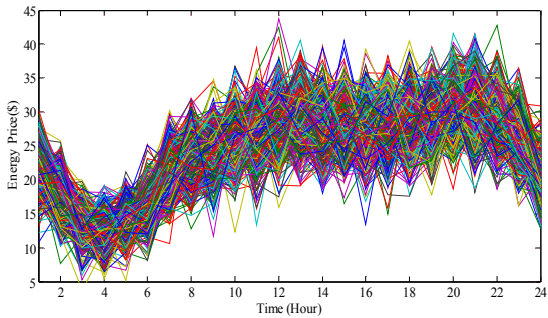
	زمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶
JO		۱۰	۱۰	۱۰	۱۱	۰/۰	۱۱
UO	تلمبه - ذخیره ای	-۳۶	-۹۸	-۹۸	-۹۸	-۹۸	-۹۸
UO	فتوولتائیک	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱/۰۰۷
UO	بادی	۳۴	۳۴	۳۴	۳۵	۳۴	۳۴
	زمان	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
JO		۹	۳۷	۸۶	۸۸	۱۰	۸۸
UO	تلمبه - ذخیره ای	۱۲	-۸۹	۴۴	۵۸	۵۸	۵۸
UO	فتوولتائیک	۱/۵۴۷	۱/۹	۲	۲/۵	۳/۲	۴
UO	بادی	۳۵	۳۶	۳۵	۳۶	۳۶	۳۶
	زمان	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
JO		۱۰۲	۹۳	۵۰	۸۹	۱۰۱	۸۹
UO	تلمبه - ذخیره ای	۵۸	۵۸	۵۸	۵۸	۵۸	۵۸
UO	فتوولتائیک	۴/۷	۴/۵	۴	۳/۵	۳	۲/۱
UO	بادی	۳۶	۳۷	۳۷	۳۷	۳۶	۳۸
	زمان	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
JO		۴۷	۱۰۰	۱۰۰	۹۹	۸۸	۱۲۲
UO	تلمبه - ذخیره ای	-۳۶	۵۸	۵۸	۶۲	-۴	۹۸
UO	فتوولتائیک	۱/۲۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
UO	بادی	۳۷	۳۸	۳۸	۳۷	۳۸	۳۹



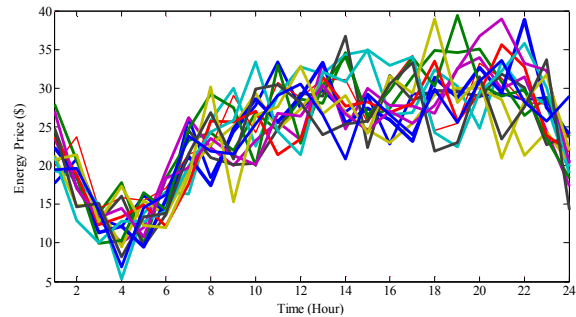
(ب)



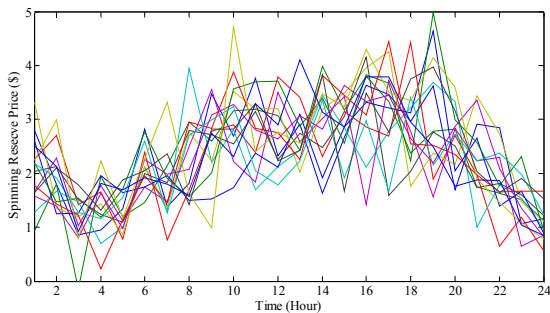
(الف)



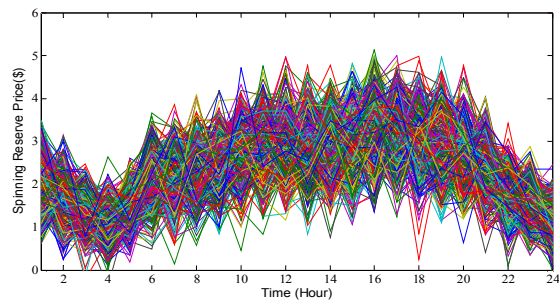
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل (۴): سناریوهای تولید مزرعه بادی، قیمت انرژی و قیمت ذخیره چرخان.

الف) سناریوهای بادی تولید شده. ب) سناریوهای تولید واحد بادی کاهش یافته با روش بخش (۵-۲) ج) سناریوهای قیمت انرژی تولید شده. د) سناریوهای قیمت انرژی کاهش یافته با روش بخش (۵-۲) ه) سناریوهای قیمت ذخیره چرخان تولید شده. و) سناریوهای قیمت ذخیره چرخان کاهش یافته با روش بخش (۵-۲)

تعیین مقادیر بهینه پیشنهادت تولید توان به بازار برق، و زمان شبیه‌سازی روش برنامه‌ریزی مستقل واحدها در جدول (۵) ارائه شده است. همان گونه که در این جدول نمایش داده شده است، زمان شبیه‌سازی مسأله برنامه‌ریزی هماهنگ از واحدها ۴۵۸ ثانیه است، این در شرایطی است که زمان شبیه‌سازی مسأله برنامه‌ریزی مستقل واحدها ۸۱ ثانیه می‌باشد. بالاتر بودن زمان اجرای مسأله برنامه‌ریزی هماهنگ واحدها نشانگر آن است که مسأله برنامه‌ریزی هماهنگ واحدها دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به مسأله برنامه‌ریزی مستقل آن‌هاست.

جدول (۵): امید ریاضی سود نیروگاه بادی، فتوولتائیک و

تلمبه- ذخیره‌ای در حالت کاری مستقل و هماهنگ

نیروگاه	عملکرد مستقل نیروگاه‌ها	عملکرد هماهنگ نیروگاه‌ها
بادی	۲۶۷۷۶/۸۵۴	-
فتوولتائیک	۵۴۱/۰۷۹	-
تلمبه- ذخیره‌ای	۱۳۸۷۶/۵۷۴	-
مجموع	۴۱۱۹۴/۵۱	۵۰۳۸۰/۱۸۰
زمان شبیه‌سازی	$= ۵۳/۲۰۳ + ۹ + ۱۸/۷۹۶$ ۸۰/۹۹۹	۴۵۸/ ۴۸۴

وضعیت خطر پذیری: افزون بر ارزیابی امید ریاضی

سود می‌توان به بررسی وضعیت خطر پذیری در حالت‌های

همان گونه که می‌توان از جدول (۴) و (۲) نتیجه گرفت با افزایش قیمت، پیشنهاد تولید واحدهای تلمبه- ذخیره‌ای و واحدهای هماهنگ افزایش می‌یابد. افزون بر این، هنگامی که قیمت انرژی پایین است، اکثر توان مزرعه بادی به جای ارائه به بازار صرف پمپاژ آب در نیروگاه‌های تلمبه- ذخیره‌ای می‌شود. در این شرایط ابراز مجموعه تولیدی کمتر از حداقل توان قابل تولید واحد بادی است. برخلاف این شرایط، هنگامی که قیمت انرژی بالا است، توان ابراز شده به بازار بیش از شرایط بهره‌برداری مستقل از واحدهاست.

جدول (۵) میزان امید ریاضی سود مجموعه نیروگاه‌های مورد مطالعه را در ۲ حالت عملکرد مستقل و هماهنگ نشان می‌دهد. با مقایسه مقدار امید ریاضی سود به دست آمده از بهینه‌سازی تابع مشاهده می‌شود در صورتی که نیروگاه‌ها به شکل مستقل در بازار انرژی شرکت کنند، امید ریاضی سود به دست آمده برابر با ۴۱۱۹۴/۵۱ دلار است؛ این در حالی است که اگر نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک با پشتیبانی نیروگاه‌های تلمبه- ذخیره‌ای در این بازار شرکت کنند به سودی بیشتر و معادل ۵۰۳۸۰/۱۸۰ دلار دست پیدا می‌کنند. افزایش امید ریاضی سود مجموعه نیروگاهی به میزان ۹۱۸/۵۶۷ دلار تایید کننده برتری بهره‌برداری هماهنگ واحدها نسبت به بهره‌برداری مستقل آن‌هاست.

از طرف دیگر زمان شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای

افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Galloway. S., Bell. G., Burt. G., McDonald. J., Siewierski. T., "Short term trading for a wind power producer", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol.153, No. 1, pp.554-564, January 2006.
- [2] Dukpa. A., Duggal I., Venkatesh. B., Chang. L., "Optimal participation and risk mitigation of wind generators in an electricity market", IET Renew. Power Gener., Vol. 4, No. 2, pp. 165-175, 2010.
- [3] Ackermann. T., "Impact of high wind penetration on balancing and frequency control in Europe", IEEE Power & Energy Mag., Vol. 5, No. 6, pp. 91-103, 2007.
- [4] Angarita. J. M, Usaola. J.G, "Combining hydro-generation and wind energy Bidding and operation on electricity markets", Electric Power Systems Research Vol. 77, pp. 393-400, 2007.
- [5] Pappala. V.S., Erlich. I., Singh. S.N., "Unit commitment under wind power and demand uncertainties", International Conference on POWERCON 2008. New Delhi, pp. 1-5, 2008.
- [6] Tuohy. A., Meibom. P., Denny. E., O'Malley. M., "Unit commitment for systems with significant wind penetration", IEEE Trans. Power Syst. Vol.24, No. 2, pp. 592-601, 2009.
- [7] Yang. H., Zhou. W., Lou. C., "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system" Appl. Energy, Vol. 86, No. 2, pp.163-169, 2009.
- [8] Borowy. B.S., Salameh. Z.M., "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system", IEEE Trans. Energy. Conv. Vol.11, No. 2, pp.367-373, 1996.
- [9] Tina. G., Gagliano. S., Raiti. S., "Hybrid solar/wind power system probabilistic modeling for long-term performance assessment", Solar Energy Vol.80, pp. 578-588, 2006.
- [10] Yang. H.X., Lu. L., Zhou. W., "A novel optimization sizing model for hybrid solar wind power generation system", Solar Energy, Vol.81, No. 1, pp.76-84, 2007.
- [11] Duque. Á. J., Castronuovo. E. D., Sánchez. I., Usaola J., "Optimal operation of a pumped-storage hydro plant that compensates the imbalances of a wind power producer". Electric Power Systems Research, Vol. 81, No 9, pp: 1767-1777. 2011.
- [12] Morales. J.M., Minguez. R., Conejo. A.J., "A methodology to generate statistically dependent wind speed scenarios". Energy, Vol. 87, pp: 843-855. 2010.
- [13] Pousinho. H.M.I., Mendes. V.M.F., Catalão. J.P.S., A hybrid PSO-ANFIS approach for short-term wind power prediction in Portugal, Energy Conversion and Management, Vol. 52, Issue 1, January 2011, pp. 397-402.
- [14] Mohandes. M., Rehman. S., Rahman. S.M., Estimation of wind speed profile using adaptive

مختلف بهره‌برداری از واحدها پرداخت. به این منظور برای شرایط کاری مختلف (بهره‌برداری هماهنگ و مستقل واحدها) درآمد/ هزینه عدم تعادل، (که در مدل پیشنهادی عامل ایجاد خطر است) با یکدیگر مقایسه می‌شود. نتایج مربوط به این قسمت در جدول (۶) نمایش داده شده است. در این شرایط، امید ریاضی درآمد عدم تعادل در شرایط بهره‌برداری مستقل از واحدها برابر با ۵۴۶۹/۲۲۶ دلار است. این در حالی است که در حالت کاری هماهنگ، این درآمد به میزان ۲۹۸۴/۶۸۵ دلار افزایش پیدا کرده و به ۸۴۵۳/۹۱۱ دلار رسیده است. این نتیجه تایید کننده برتری بهره‌برداری هماهنگ واحدها نسبت به بهره‌برداری مستقل آن‌هاست.

جدول (۶): مقدار امید ریاضی هزینه عدم تعادل بر اساس

حالت‌های مختلف

	عملکرد مستقل نیروگاه‌ها	عملکرد هماهنگ نیروگاه‌ها
هزینه عدم تعادل (دلار)	۵۴۶۹/۲۲۶	۸۴۵۳/۹۱۱

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور بهره‌برداری هماهنگ مزرعه بادی، نیروگاه فتوولتائیک و واحدهای تلمبه-ذخیره‌ای در بازارهای توان و خدمات جانبی، مدل جدیدی ارائه شده است. در این مدل، برنامه‌ریزی هماهنگ واحدهای تلمبه-ذخیره‌ای با منابع تولیدی با ابعاد کوچک مانند مزارع بادی کوچک و واحدهای فتوولتائیک استفاده شده است. در این مدل، تولید واحدهای بادی با استفاده از شبکه‌های عصبی پیش‌بینی شده و سناریوهای مختلف تولید واحد بادی با استفاده از توزیع ویبال ساخته شده است. افزون بر این، برای سایر شاخص‌های دارای عدم قطعیت از روش تولید و کاهش سناریو استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها بر روی سیستم ۱۱۸ باس IEEE نشان می‌دهد که عملکرد هماهنگ این نوع نیروگاه موجب افزایش سود، نسبت به عملکرد مستقل آن‌ها می‌شود. افزون بر این، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که میزان خطرپذیری مجموعه نیروگاهی در شرایط بهره‌برداری هماهنگ کاهش و امید ریاضی سود مجموعه

- stand-alone hybrid solar-wind power generation systems”, *Energy*, Vol.87, pp.380–389, 2010.
- [22] Shahidehpour. M., Yamin. H., Li. Z., *Market operations in electric power systems*, first ed., John Wiley, New York, 2002.
- [23] Eichhorn, A., H. Heitsch, and W. Römisch, *Stochastic Optimization of Electricity Portfolios: Scenario Tree Modeling and Risk Management*, in *Handbook of Power Systems II*, S. Rebennack, et al., Editors. 2010, Springer Berlin Heidelberg. p. 405-432.
- [24] Shahidehpour. M.; Yong. F.; Wiedman. T., "Impact of Natural Gas Infrastructure on Electric Power Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol.93, no.5, pp.1042–1056, 2005.
- [25] motor.ece.iit.edu/Data/WindBCPBUC/
- [26] Wang. J., Shahidehpour. M., Li. Z.,” Security-Constrained unit Commitment with Volatile Wind Power Generation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol: 23, No: 3. pp: 1319 – 1327. 2008.
- [27] Parastegari. M., Hooshmand. R-A, Khodabakhshian. A., and Forghani Z., “Joint operation of wind farms and pump-storage units in the electricity markets: Modeling, simulation and evaluation, *Simulat. Modell. Pract. Theory*, Vol.37, No. 11, pp 56-69. 2013.
- [28] Li. T., Shahidehpour. M., Li. Z., “Risk-Constrained Bidding Strategy With Stochastic Unit Commitment”, *Power Systems*, *IEEE Transactions on* Vol. 22, Issue: 1, Feb. 2007, Page(s): 449 – 458.
- [29] Liang. J., Grijalva S., Harley R. G., “Increased Wind Revenue and System Security by Trading Wind Power in Energy and Regulation Reserve Markets,” *IEEE Trans. Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 3, pp. 340-347, 2011.
- neuro-fuzzy inference system (ANFIS), *Applied Energy*, Volume 88, Issue 11, 2011, pp. 4024-4032.
- [15] Niknam. T., Golestaneh. F., Malekpour. A., “Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm”. *Energy*, Vol. 43, No. 1, pp. 427-437. 2012.
- [16] Liu. Y., Zhang. X., An. Y., “Risk Assessment and Empirical Analysis of Grid connected Distributed Photovoltaic Power”. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2010 Asia-Pacific, 28-31 2010, pp: 1-4.
- [17] García-González. J., Moraga. R., de-la-Muela R., Santos. L. M., González. A. M., “Stochastic joint optimization of wind generation and pumped-storage units in an electricity market”, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 23, No. 2, pp. 460-468, 2008.
- [18] Reuter. W.H., Fuss. S., Szolgayová. J., Obersteiner M., “Investment in wind power and pumped storage in a real options model”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16. No.4. pp. 2242– 2248. 2012.
- [19] Kaviani. A.K, Riahy. G.H., Kouhsari. S.H.M., “Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages”, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 11, Pages 2380-2390. 2009.
- [20] Ding. H., Hu. Z., Song. Y., “Stochastic optimization of the daily operation of wind farm and pumped-hydro-storage plant”, *Renewable Energy*, Vol. 48, Pages 571–578. 2012.
- [21] Zhou. W., Lou. Ch., Li. Zh., Lu. L., Yang. H., “Current status of research on optimum sizing of

¹ Autoregressive–moving-average model (ARMA)

² Adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS)

³ Particle swarm optimization (PSO)

⁴ General Algebraic Modeling System (GAMS)

⁵ Institute of Electrical and Electronics Engineers

⁶ Independent System Operator (ISO)