





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه مهندسی برق قدرت

استفاده از نیروگاه بادی در سیستمهای قدرت با در نظر گرفتن معیار امنیت تصادفی

دانشجو:

امید قدس

استاد راهنما:

مهدی بانژاد

استاد مشاور:

محسن اصیلی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۹۰

ب

به نام او

به یاد او

برای او

که دوستش دارم.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم و همه آنهایی که در سایه مهربانی او

تلاش برای ایستادن بر اوج راه من آموختند.

قدردانی

قدردانی می‌کنم از والدینم، که سایه پر مهر پدرم و دعای خیر مادرم، آرام‌بخش لحظات نگرانی و سخت‌زندگی و مایه دلگرمی و قوت قلب من بوده است. خدای مهربان مرا از این نعمت محروم نسازد.

و همچنین در مراحل مختلف انجام این کار تحقیقاتی، از کمک‌های برادرانم، آقایان مهندس علی‌قدس و مهندس امیرقدس و دوستانم، آقایان مهندس علیرضا ذکریا زاده و مهندس پوریامحمدی مهربره‌بردم و کمال تشکر را از آنها دارم.

چکیده

در دهه‌های اخیر یکی از بزرگترین دغدغه‌های دولت‌ها محدود بودن ذخایر سوخت فسیلی و تجدید ناپذیر بودن آنها بوده است. لذا همه دولت‌ها سعی بر این دارند تا حد زیادی در مصرف سوخت‌های فسیلی صنایع خود صرفه‌جویی نموده و رو به استفاده از انرژی‌های پاک، رایگان و تجدیدپذیر بیاورند. انرژی باد یکی از این انرژی‌ها بوده که بسیار مورد توجه صنعت برق به منظور تولید توان الکتریکی در سطح بالا قرار گرفته است.

در این پایان‌نامه، از یک مدل بهینه‌سازی تصادفی برای برنامه‌ریزی مشارکت واحدها جهت تعیین زمانبندی تولید توان ساعتی هر واحد استفاده شده است. این برنامه‌ریزی با توجه به قیود واحدها و محدودیت توان عبوری خطوط انجام شده است. در این پروژه، احتمال میزان وزش باد به صورت تابع احتمال توزیع نرمال فرض شده و به صورت درخت سناریو مدل می‌شود. احتمال هر سناریو و ارزش بار از دست رفته نیز در تابع هدف وارد می‌شود. همچنین در این پروژه برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با توجه به عدم قطعیت تولید توان بادی و بار با استفاده از بهینه‌سازی فازی اجرا شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است. علاوه بر این در این پروژه به بررسی تاثیر حضور تولید توان بادی در میزان کاهش آلودگی نیروگاه‌های حرارتی پرداخته شده است. روش برنامه‌ریزی چندمنظوره برای در نظر گرفتن توابع هدف هزینه و انتشار آلاینده‌ها پیشنهاد شده است. برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با معیار امنیت تصادفی بر روی یک شبکه سه‌شینه و بر روی شبکه‌ی IEEE-RTS مورد آزمایش قرار گرفته است. برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با هدف کاهش همزمان هزینه‌ی بهره‌برداری و آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی بر روی شبکه‌ی ۳۰ شینه و شبکه IEEE-RTS اجرا شده است. همچنین نتایج برنامه‌ریزی با استفاده از بهینه‌سازی فازی نیز بر روی شبکه‌ی ۳۰ شینه‌ی IEEE اجرا و نتایج آن مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها بیانگر قابلیت بهتر روشهای ارائه شده در مقایسه با روشهای قبلی می‌باشد.

کلمات کلیدی: انتشار آلودگی ، برنامه‌ریزی خطی-عدد صحیح آمیخته، برنامه‌ریزی چندهدفه، بهینه‌سازی تصادفی، بهینه‌سازی فازی، ذخیره برنامه-ریزی مشارکت واحدها.

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- اهداف پروژه ۵

۲-۱- ساختار گزارش ۶

فصل دوم: بررسی روش‌های تعیین ذخیره موردنیاز سیستم با مشارکت تولید توان بادی ۸

۱-۲- مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها (UC) ۸

۲-۲- سهم انرژی‌های تجدید پذیر در تأمین انرژی جهان ۱۲

۱-۲-۲- انرژی خورشید ۱۳

۲-۲-۲- انرژی باد ۱۴

۳-۲- مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها (UC) با مشارکت نیروگاه‌های بادی در تولید توان ۱۶

۱-۳-۲- ارزش بار از دست رفته ۲۲

۲-۳-۲- انرژی باد ۲۳

۳-۳-۲- مدلسازی توان تولیدی باد ۲۵

۴-۲- انتشار آلاینده‌های واحدهای حرارتی و در نظر گرفتن آن در برنامه‌ریزی تولید واحدها ۲۹

۵-۲- بهینه‌سازی فازی و استفاده از آن در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با حضور نیروگاه‌های بادی ۳۱

۶-۲- جمع‌بندی ۳۳

فصل سوم: برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با حضور تولید توان بادی در سیستم قدرت .. ۳۶

۱-۳- برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن واحدها با مشارکت نیروگاه‌های بادی با استفاده معیار امنیت تصادفی ۳۶

۱-۱-۳- فرضیات ۳۷

۲-۱-۳- متغیرهای برنامه‌ریزی تصادفی ۳۷

۳۸	..... ۳-۱-۳- ساختار برنامه‌ریزی تصادفی
۳۹	..... ۴-۱-۳- روابط برنامه‌ریزی تصادفی
۴۶	..... ۲-۳- برنامه‌ریزی واحدهای حرارتی-بادی با در نظر گرفتن انتشار آلاینده‌ها در برنامه‌ریزی
	..... ۱-۲-۳- برنامه‌ریزی ذخیره‌ی سیستم در حضور نیروگاه‌های بادی و با لحاظ کردن محدودیت انتشار آلاینده‌ها
۴۷	.....
۴۸	..... ۲-۲-۳- برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با استفاده از روش بهینه‌سازی چندمنظوره-روش محدودیت E
۴۵	..... ۳-۳- خطی‌سازی بخش‌های غیرخطی تابع هدف
۵۶	..... ۴-۳- برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با حضور نیروگاه‌های بادی با استفاده از تئوری فازی
۵۷	..... ۱-۴-۳- مدل قطعی مسئله مشارکت واحدها
۵۹	..... ۲-۴-۳- مدل فازی مسئله مشارکت واحدها
۶۳	..... ۳-۴-۳- روش حل
۶۶	..... ۵-۳- جمع‌بندی
۶۹	..... فصل چهارم: شبیه‌سازی و نتایج
۷۱	..... ۱-۴- برنامه‌ریزی ذخیره موردنیاز سیستم با حضور نیروگاه‌های بادی
۷۲	..... ۱-۱-۴- برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه‌ی سه شینه با معیار امنیت تصادفی
۷۷	..... ۲-۱-۴- نتایج بهینه‌سازی با معیار امنیت و قطعی تصادفی بر روی شبکه‌ی IEEE-RTS
۸۴	..... ۲-۴- برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با هدف کمینه‌سازی همزمان هزینه و انتشار آلاینده‌ها
۹۱	..... ۳-۴- برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با توجه به عدم قطعیت باد و بار با استفاده از بهینه‌سازی فازی
۹۴	..... ۴-۴- جمع‌بندی
۹۶	..... فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۶	..... ۱-۵- نتیجه‌گیری
۹۷	..... ۲-۵- پیشنهادات

فهرست مراجع ۹۹

پیوست الف - فهرست نمادها ۱۰۵

پیوست ب - اطلاعات شبکه‌های نمونه ۱۰۸

فهرست اشکال:

صفحه

- شکل ۱-۲- منحنی توان خروجی توربین بادی بر حسب سرعت باد ۲۷
- شکل ۲-۲- تابع توزیع نرمال تولید توان بادی یک نیروگاه بادی ۲۸
- شکل ۳-۲- درخت سناریوی تولید توان بادی ۲۹
- شکل ۱-۳- روندنمای مدل برنامه‌ریزی تصادفی ۴۰
- شکل ۲-۳- روندنمای روش محدودیت E در برنامه‌ریزی واحدهای بادی- حرارتی ۵۴
- شکل ۳-۳- درجه‌ی عضویت مقدار بار پیش‌بینی شده ۵۹
- شکل ۴-۳- روندنمای مدل فازی در برنامه‌ریزی واحدهای بادی- حرارتی ۶۰
- شکل ۵-۳- درجه عضویت رابطه نابرابری فازی (ذخیره موردنیاز سیستم) ۶۱
- شکل ۶-۳- درجه عضویت میزان توان در دسترس نیروگاه بادی ۶۲
- شکل ۷-۳- تابع عضویت فازی هزینه‌ی کل ۶۳
- شکل ۸-۳- تقریب خطی یک منحنی غیرخطی ۶۵
- شکل ۱-۴- نمایش تک‌خطی شبکه‌ی نمونه‌ی سه‌شینه ۷۰
- شکل ۲-۴- منحنی پیش‌بینی بار ساعتی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعت ۷۴
- شکل ۳-۴- منحنی پیش‌بینی تولید توان بادی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعت ۷۵
- شکل ۴-۴- نمودار هفت تکه تقریبی تابع توزیع نرمال پیش‌بینی باد ۷۷
- شکل ۵-۴- نمایش تک‌خطی شبکه IEEE-RTS ۷۸
- شکل ۶-۴- منحنی پیش‌بینی باد در بازه‌ی برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت ۷۹
- شکل ۷-۴- میزان بار سیستم IEEE-RTS در بازه ۲۴ ساعته ۸۰
- شکل ۸-۴- ذخیره چرخان موردنیاز سیستم با استفاده از معیارهای امنیت قطعی و تصادفی در حالت الف) افزایشی و ب) کاهش ۸۲
- شکل ۹-۴- تاثیر افزایش میزان VOLL بر میزان ذخیره چرخان افزایشی ۸۳
- شکل ۱۰-۴- نمایش تک‌خطی شبکه نمونه‌ی ۳۰ شینه‌ی IEEE ۸۵

فهرست اشکال:

صفحه

شکل ۴-۱۱- منحنی‌های توان خروجی و آلودگی تولیدی واحدها ۸۶

شکل ۴-۱۲- تابع عضویت فازی هزینه‌ی کل ۹۲

فهرست جداول:

صفحه

جدول ۴-۱- اطلاعات ژنراتورها برای سیستم سه‌شینه	۷۰
جدول ۴-۲- بار ساعتی در شین ۳	۷۱
جدول ۴-۳- سناریوی توان باد	۷۱
جدول ۴-۴- نتایج برنامه‌ریزی برای سیستم سه‌شینه با استفاده از معیار امنیت تصادفی	۷۲
جدول ۴-۵- نتایج برنامه‌ریزی سیستم سه‌شینه با استفاده از معیار امنیت تصادفی با محدود کردن ظرفیت خط (۲-۳)	۷۴
جدول ۴-۶- نتایج برنامه‌ریزی توان با استفاده از معیار تصادفی شبکه‌ی سه‌شینه در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته (MW)	۷۵
جدول ۴-۷- نتایج برنامه‌ریزی ذخیره چرخان افزایشی با استفاده از معیار امنیت تصادفی شبکه‌ی سه‌شینه در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته (MW)	۷۵
جدول ۴-۸- نتایج برنامه‌ریزی ذخیره چرخان کاهش‌ی و غیر چرخان با معیار امنیت تصادفی شبکه‌ی سه‌شینه در بازه‌ی ۲۴ ساعته (MW)	۷۶
جدول ۴-۹- پیش‌بینی باد در بازه‌ی برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت	۷۹
جدول ۴-۱۰- میزان بار سیستم IEEE-RTS در بازه ۲۴ ساعته	۸۰
جدول ۴-۱۱- نتایج هزینه‌های بهره‌برداری حاصل از دو معیار برنامه‌ریزی تصادفی و قطعی	۸۱
جدول ۴-۱۲- اطلاعات ژنراتورهای شبکه‌ی ۳۰ شینه IEEE	۸۵
جدول ۴-۱۳- پیش‌بینی باد	۸۶
جدول ۴-۱۴- نتایج برنامه‌ریزی سیستم با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری	۸۷
شکل ۴-۱۵- نتایج برنامه‌ریزی اقتصادی بهره‌برداری سیستم با در نظر گرفتن محدودیت آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی ..	۸۷
جدول ۴-۱۶- نتایج برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم با هدف کاهش همزمان هزینه بهره‌برداری و آلودگی تولیدی	۸۸
جدول ۴-۱۷- مشخصه آلودگی واحدهای شبکه IEEE-RTS	۹۰
جدول ۴-۱۸- پیش‌بینی باد شبکه IEEE-RTS	۹۰
جدول ۴-۱۹- نتایج حاصل از بهینه‌سازی مستقل توابع هزینه و آلودگی	۹۱
جدول ۴-۲۰- نتایج کمینه‌سازی در k مرحله	۹۱
جدول ۴-۲۱- نتایج بهینه‌سازی فازی برای سه مقدار مختلف از مقدار آرمانی تابع هدف	۹۲

فهرست جداول:

صفحه

جدول ۴-۲۲- نتایج بهینه‌سازی فازی برای مقدار آرمانی \$ ۲۶۱۰ ۹۳

مقدمه

فصل اول

فصل اول: مقدمه

بطور کلی بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های قدرت مستلزم اجرای یک برنامه‌ریزی صحیح است که در سه

بخش عمده صورت می‌گیرد:

- برنامه‌ریزی بلند مدت
- برنامه‌ریزی میان مدت
- برنامه‌ریزی کوتاه مدت

برنامه‌ریزی بلند مدت به منظور برنامه‌ریزی نصب نیروگاه‌ها، خطوط انتقال و حتی توزیع اجرا می‌شود. بدلیل پیچیدگی و زمان‌بر بودن این بخش از برنامه‌ریزی باید در بازه‌ی زمانی چندین ساله صورت گیرد. برنامه‌ریزی میان‌مدت در بازه‌ی زمانی چندماه انجام می‌شود و هدف آن تعیین تولید کلی می‌باشد، به عنوان مثالی از این دست برنامه‌ریزی وضعیت روشن و خاموش بودن کلی واحدها در این بازه انجام می‌شود که به اعمال می‌شود. برنامه‌ریزی بهره‌برداری که هدف اصلی انجام این پروژه می‌باشد، در محدوده کاری برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت قرار می‌گیرد. برنامه‌ریزی کوتاه مدت (۱ روز تا چند هفته)، برنامه‌ریزی روزانه و هفتگی در مدار قرار گرفتن بهینه واحدها، برنامه‌ریزی ذخیره موردنیاز سیستم و سایر خدمات جانبی می‌باشد. پرواضح است که به منظور برنامه‌ریزی در سیستم‌های قدرت نیاز به پیش‌بینی بار داریم. چراکه تصمیمات با توجه به بار پیش‌بینی شده می‌باشد. همانطور که می‌دانیم، تغییرات مقدار بار مصرفی در طی شبانه‌روز زیاد می‌باشد. بنابراین برای بهره‌برداری صحیح و اقتصادی، لازم است تعدادی از واحدها در ساعاتی از شبانه‌روز روشن و در ساعاتی خاموش شوند.

مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها، عبارت است از برنامه‌ریزی تولید ساعت به ساعت واحدهای نیروگاهی، برای یک روز الی یک هفته آینده، بر اساس منحنی پیش‌بینی بار بنحوی که اولاً هزینه بهره‌برداری را حداقل نماید و ثانیاً قیود و محدودیت‌های واحدهای تولید و شبکه را برآورده سازد. با توجه به توزیع جغرافیایی تولید و ظرفیت‌های انتقال توان و خروج برخی از واحدها برای انجام عملیات تعمیرات، واحدهای آماده برای تامین انرژی مشخص شده و برنامه‌ریزی ضمن حداقل نمودن هزینه، باید تامین‌کننده نیاز مصرف و ذخیره مورد نیاز و قیده‌های دیگر نیز باشد.

امروزه به دلیل مسایل سیاسی و آلوده‌کنندگی هوای سوخت‌های فسیلی و متناهی بودن آنها توجه به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش یافته است. انرژی‌هایی چون خورشید، باد، جزرومد، بیوماس و ... از این دسته‌اند. این انرژی‌ها و تکنولوژی استفاده از آنها نوظاست. ولی به دلیل این که هیچکدام از مشکلات دیگر انواع انرژی را ندارند، بسیار مورد استقبال تمام کشورها در سطح جهان قرار گرفته‌اند. به طور قطع در آینده، درصد زیادی از انرژی جهان توسط این منابع تأمین خواهد شد. زیرا علاقه‌ی کشورها به استفاده از این منابع افزایش یافته است. البته هم اکنون درصد استفاده از این منابع به دلیل تکنولوژی بالا و هزینه ساخت زیاد آنها، در اغلب کشورها پایین است. اما با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از این منابع سیر صعودی خود را با شتاب بالایی طی خواهد کرد. با ورود هر تکنولوژی جدید به این مجموعه، ممکن است مزایا و مشکلات جدیدی در مجموعه ظاهر شود و مباحث جدیدی برای مطالعه و تحقیق مطرح گردد [۱]. یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد می‌باشد که امروزه بسیار مورد توجه کشورهای مختلف واقع شده است. باد نوع به نسبت ارزانی از انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، ولی از طرفی متغیر و دارای عدم قطعیت می‌باشد. بنابراین استفاده از آن چالش‌هایی را برای بهره‌بردار و برنامه‌ریز سیستم قدرت بوجود آورده است. بنابراین نحوه وارد شدن این منابع در سیستم قدرت و نحوه استفاده از این منابع به‌طوریکه بهره‌برداری از آنها در سیستم مناسب باشد، یکی از مسائل مهم تحقیقاتی در صنعت برق است.

با افزایش تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از توان بادی بسیار مورد توجه قرار گرفته و ضریب نفوذ توان بادی در مدار افزایش یافته است. یک وجه تمایز مهم و شاید اصلی‌ترین اختلاف نیروگاه‌های بادی با نیروگاه‌های فسیلی در انرژی ورودی آنها است. در نیروگاه‌های فسیلی به دلیل اینکه مقدار انرژی ورودی کاملاً مشخص و قابل کنترل است، توان خروجی نیروگاه نیز مشخص است. اما در نیروگاه‌های بادی بدلیل نامشخص بودن سرعت باد که به عنوان انرژی ورودی محسوب می‌شود، خروجی نیروگاه نیز مقدار ثابتی نخواهد داشت و برای داشتن یک مدل خروجی توان مناسب از نیروگاه بادی، لازم است تا یک مدل مناسب از سرعت باد در دسترس باشد. باد یک پدیده طبیعی و در نتیجه سرعت و جهت آن تصادفی است. بنابراین بدست آوردن مدلی از سرعت باد که بتواند در محاسبات تولید توان نیروگاه وارد شود و نتایج دقیقی را حاصل نماید، کار مشکلی به نظر می‌رسد. از آنجا که میزان توان خروجی این واحدها با دقت بالا قابل پیش‌بینی نیست، افزایش ضریب نفوذ توان تولیدی باد در سیستم قدرت اثر مهمی بر نحوه برنامه‌ریزی و توزیع توان دارا می‌باشد. در نتیجه با افزایش ضریب نفوذ توان بادی در سیستم، عدم قطعیت توان باد باید در برنامه‌ریزی بهره‌برداری و مشخص کردن ذخیره‌ی موردنیاز سیستم در نظر گرفته شود.

یکی از وظایف بهره‌بردار سیستم حفظ امنیت و قابلیت اطمینان سیستم به صورت به‌هنگام می‌باشد. بدین منظور، بهره‌بردار سیستم میزانی از ظرفیت برخی واحدها را به عنوان ذخیره بهره‌برداری سیستم در نظر گرفته و در صورت بهم خوردن تعادل بین تولید و مصرف، از این ذخیره برای ایجاد تعادل استفاده می‌کند. ذخیره‌ی بهره‌برداری شامل ذخیره چرخان و ذخیره‌ی غیرچرخان می‌باشد. برخلاف ذخیره‌های چرخان که توسط واحدهای در مدار تعیین می‌شوند، ذخیره غیرچرخان توسط واحدهای خاموش که بطور سریع در مدار قرار می‌گیرند تأمین می‌شوند. در سیستم‌های قدرت با بازارهای رقابتی، واگذاری ظرفیت ذخیره توسط واحدهای تولید، به طور معمول در طی روند بازار صورت می‌گیرد.

از دیگر مسائل مهم آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی در حین بهره‌برداری از آن می‌باشد. پرواضح است که به‌منظور دستیابی به یک برنامه‌ریزی بهره‌برداری صحیح میزان انتشار گازهای آلاینده‌ی هوا حاصل از کارکرد واحدهای حرارتی باید در طی این برنامه‌ریزی در نظر گرفته شوند. منحنی تولید توان واحدها به‌گونه‌ای می‌باشد که با تنظیم تولید توان هر واحد بر روی مقدار کمتر، میزان آلودگی تولیدی آن واحد افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده‌ی اهمیت در نظر گرفتن میزان آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی در زمانی که ضریب نفوذ نیروگاه‌های بادی در مدار بالا است می‌باشد.

در این پروژه مسئله‌ی مشارکت واحدها و یک روش مناسب برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید توان بادی بررسی شده است. همچنین آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در نظر گرفته شده است.

۱-۱- اهداف پروژه

در این پروژه روش بهینه‌سازی تصادفی به‌منظور برنامه‌ریزی یک سیستم قدرت با حضور نیروگاه بادی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی طبیعت اتفاقی تولید توان باد، از چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده شده است. در مرحله‌ی اول معاملات بازار در نظر گرفته می‌شود و در مرحله‌ی دوم بهره‌برداری واقعی از سیستم با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف باد مورد بررسی قرار می‌گیرد و یک روش تسویه بازار با در نظر گرفتن قیود شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از ساختار مسئله برنامه‌نویسی تصادفی در دو مرحله بدین دلیل است که بازارهای برق باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به توان باد تسویه شوند و میزان ذخیره موردنیاز سیستم با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف باد تعیین شود. در اکثر مقالات به جای استفاده از واژه بهینه‌سازی تصادفی^۱ در برنامه‌ریزی ذخیره، مفهوم معیار امنیت تصادفی^۱ بکار برده شده است. لذا در این پایان‌نامه از واژه معیار امنیت تصادفی نیز جهت نام بردن از مدل بهینه‌سازی تصادفی استفاده شده است.

در نهایت، نتیجه می‌شود که استفاده از معیار امنیت تصادفی علاوه بر بهره‌برداری سیستم با امنیت بالاتر، میزان هزینه پایین‌تری را برای فراهم کردن ذخیره نسبت به معیار قطعی نتیجه خواهد داد. علاوه بر آن برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم قدرت با هدف کمینه‌سازی همزمان هزینه‌ی بهره‌برداری از سیستم و انتشار آلاینده‌های هوای^۲ توسط واحدهای حرارتی نیز از نوآوری‌های این پایان‌نامه می‌باشد.

۱-۲- ساختار پایان‌نامه

در ادامه، در فصل دوم این گزارش به بیان تاریخچه‌ای از انواع روش‌های برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت سیستم‌های قدرت و تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است. همچنین برخی از این روش‌ها و عناصر تأثیرگذار بر آن‌ها توضیح داده شده‌اند. روابط حاکم بر برنامه‌ریزی تصادفی انرژی و ذخیره با حضور تولید توان بادی با جزئیات در فصل سوم آورده شده است. در ادامه فصل سوم مدلی به‌منظور برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم قدرت با هدف کمینه‌سازی همزمان هزینه‌ی بهره‌برداری از سیستم و کاهش آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی شرح داده شده است. در فصل چهارم نتایج شبیه‌سازی‌های مربوط به روش پیشنهادی برنامه‌ریزی ذخیره با حضور تولید توان بادی به‌همراه مقایسه و تحلیل نتایج آن آورده شده است. در پایان نتیجه‌گیری و پیشنهادات به‌دست آمده در طی این پایان‌نامه در فصل پنجم بیان شده است.

1-Stochastic Security Criterion

2-Air Pollutants Emission

مروری بر کارهای گذشته

فصل دوم

فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته

ورود و خروج واحدها با توجه به تغییرات بار شبکه یکی از راه‌های بهره‌برداری بهینه و صرفه‌جویی در هزینه تولید می‌باشد. چنانچه روشن و خاموش شدن واحدها و میزان تولید آنها بر مبنای هزینه‌های تولیدی هر واحد نیروگاه‌ای برنامه‌ریزی شود، تأمین توان موردنیاز بارها با کمترین هزینه انجام خواهد شد که این مهم سبب بالاتر رفتن رفاه اجتماعی می‌شود. این موضوع در سیستم قدرت با نام برنامه‌ریزی بهینه‌ی مشارکت واحدها شناخته می‌شود.

۱-۲ مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها (UC)

مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها^۱، عبارت است از برنامه‌ریزی تولید ساعت به ساعت واحدهای نیروگاهی، برای یک روز الی یک هفته آینده، بر اساس منحنی پیش‌بینی بار بنحوی که اولاً هزینه بهره‌برداری را حداقل نماید و ثانیاً قیود و محدودیت‌های واحدهای تولید و شبکه را برآورده سازد. با توجه به توزیع جغرافیایی تولید و ظرفیت‌های انتقال توان و خروج برخی از واحدها برای انجام عملیات تعمیرات، واحدهای آماده برای تأمین انرژی مشخص شده و برنامه‌ریزی برای تولید توان هر یک از آنها انجام

¹ Unit Commitment

می‌شود. این برنامه‌ریزی باید به‌گونه‌ای باشد که ضمن حداقل نمودن هزینه، تامین‌کننده نیاز مصرف و ذخیره مورد نیاز و همچنین برآورده کننده‌ی سایر محدودیت‌های سیستم نیز باشد.

مسئله UC، در مدار قرارگرفتن نیروگاه‌ها را مشخص نموده و پس از آن میزان تولید هر واحد در مدار قرار گرفته با «پخش بار اقتصادی»^۱ معین می‌شود. در اکثر موارد مدل بکار رفته شده میزان تولید توان واحدها را نیز می‌تواند معین کند. بطور کلی با توجه به تغییرات بار ساعتی در بازه‌ی برنامه‌ریزی وضعیت روشن و خاموش شدن هر واحد در هر ساعت و میزان تولید توان هر واحد و همچنین مقدار ذخیره‌ای که توسط آن واحد در مواقع لزوم تأمین خواهد شد، با توجه به هزینه راه‌اندازی، تأمین توان و تأمین ذخیره مشخص می‌شود. که این موضوع بسته به مدل مورد استفاده متفاوت می‌باشد. برای مدل‌سازی مسئله UC نیاز به اطلاع از وضعیت مصرف (بار) است. ساعات روز، اوضاع جوی، درجه حرارت محیط و مسائل اجتماعی و روزهای خاص نیز از عوامل تغییر میزان مصرف هستند. بنابر آنچه گفته شد، میزان بار ساعتی به‌عنوان اطلاعات ورودی مسئله‌ی UC می‌باشد.

هدف از مسئله UC کمینه کردن هزینه بهره‌برداری از سیستم است بطوریکه مشخص شود هنگامی که بار شبکه پایین است چه واحدهایی را می‌بایست از مدار خارج و با بالا رفتن بار شبکه چه واحدهایی را باید در مدار قرار دهیم. اطلاعات مورد نیاز جهت برنامه‌ریزی واحدها را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

۱. منحنی بار پیش‌بینی شده برای دوره زمانی مورد نظر

۲. هزینه‌ی راه‌اندازی هر واحد

۳. هزینه‌های تولید واحدهای آماده بهره‌برداری به ازای هر مگاوات

۴. هزینه ذخیره‌ی تأمین شده توسط هر واحد به ازای هر مگاوات

۵. میزان ذخیره‌ی موردنیاز (در روش معیار امنیت قطعی)

۶. محدودیت‌های واحدها و شبکه

¹ Economic Dispatch

همانطور که اشاره شد، کمینه شدن هزینه تأمین توان به عنوان هدف اصلی مطرح می‌شود که خود بطور عمده شامل هزینه‌های زیر می‌باشد.

- هزینه سوخت
- هزینه راه‌اندازی^۱
- هزینه تأمین ذخیره

هزینه سوخت به عنوان عمده‌ترین هزینه قابل کنترل تولید، یکی از اهداف اصلی مورد نظر است معمولاً بصورت یک تابع درجه دوم از توان تولیدی واحد می‌باشد و یا به‌منظور ساده‌سازی بصورت بلوک‌های انرژی در نظر گرفته می‌شود. این تابع با توجه به اندازه‌گیری‌ها و آزمایشاتی که روی هر واحد صورت می‌گیرد بدست می‌آید. هزینه راه‌اندازی واحد، هزینه مورد نیاز برای راه‌اندازی واحد از حالت خاموش است. ذخیره‌ها شامل میزان توانی از هر ژنراتوری می‌باشند که می‌توانند در صورت برهم خوردن تعادل بین توان تولیدی و مصرفی در هر ساعت بنا به درخواست بهره‌بردار سیستم قدرت توسط ژنراتور مربوطه به‌منظور برقراری مجدد تعادل، تولید شوند. ذخیره‌های سیستم معمولاً به دو صورت ذخیره چرخان و غیرچرخان در نظر گرفته می‌شوند. ذخیره چرخان به صورت مقدار ظرفیت آزاد واحدهای تولیدی روشن که بتواند در مدت ۵ دقیقه در دسترس باشد و یا ظرفیت آزاد یک واحد تولیدی روشن که آماده تغذیه بار اضافی باشد، تعریف می‌شود. همچنین ذخیره‌ی غیرچرخان به صورت میزان ظرفیت واحدهای خاموش که می‌تواند طی ۱۰ دقیقه با شبکه سنکرون شوند و بنا به خواسته بهره‌بردار سیستم قدرت شروع به تولید توان کنند تعریف می‌شود. شایان ذکر است که زمان‌بندی آمادگی تولید برای ذخیره‌ی چرخان و غیرچرخان می‌تواند بنا به خواسته بهره‌بردار سیستم قدرت تعریف گردد [۲-۳].

¹ Start up Cost

لازم به ذکر است که کمینه‌سازی تابع هدف فوق با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و قیدهایی است که در مطالعات UC باید رعایت شوند. این محدودیت‌ها شامل مواردی است که در بهره‌برداری از واحد و شبکه وجود دارند و عبارتند از:

- تامین بار درخواستی سیستم در هر ساعت
- تامین ذخیره چرخان^۱ و غیرچرخان^۲
- قیود ذخیره چرخان و غیرچرخان
- محدودیت تولید واحد
- در دسترس بودن واحد

و سایر محدودیت‌ها که در بهره‌برداری وجود دارد.

همانطور که تاکنون گفته شد، ذخیره‌ها وظیفه برقراری مجدد تعادل بین تولید و مصرف را به‌عهده دارند. عدم تعادل بین تولید و مصرف در صورت تغییر بار از مقدار پیش‌بینی شده‌اش و یا بروز پیشامدهای اتفاقی مانند خراب شدن واحدهای تولید، خطوط انتقال برق و... ایجاد می‌شود. در نظر گرفتن این اتفاقات در حین برنامه‌ریزی سبب دقیق‌تر شدن برنامه‌ریزی خواهد شد. در برخی مراجع، مقدار ذخیره برابر ظرفیت بزرگترین واحد در مدار قرار خواهد گرفت تا در صورت خرابی بزرگترین واحد در مدار، امنیت سیستم حفظ شود [۲].

پرواضح است که این روش سبب اختصاص بیش از نیاز ذخیره و در نتیجه هزینه بهره‌برداری خواهد شد. چراکه نیروگاه‌ها برای نگهداری ظرفیت خود بصورت ذخیره نیز مبلغی را دریافت می‌کنند. به این روش، برنامه‌ریزی با معیار امنیت قطعی گفته می‌شود. در مرجع [۳] برنامه‌ریزی با استفاده از الگوریتم SA انجام شده است. در مرجع [۴] برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. این مرجع از لحاظ نحوه مناسب بودن مدل و ایجاد جواب‌های ممکن مناسب به نظر می‌رسد. مدل ارائه شده در این مرجع بصورت برنامه‌ریزی

¹ Spinning reserve

² Non-Spinning reserve

قطعی می‌باشد و ماهیت احتمالی پدیده‌های در آن در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۵] نیز برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت پیش‌بینی بار با استفاده از نظریه‌ی فازی مدل کرده و برنامه‌ریزی مشارکت واحدها را با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داده است.

۲-۲ سهم انرژی‌های تجدید پذیر در تأمین انرژی جهان

عقیده غالب این است که در درازمدت (فراتر از قرن آینده) انواع انرژی‌های تجدیدپذیر پتانسیل فنی لازم برای بدست آوردن قسمت اعظم احتیاجات انرژی جهان را دارند. اما در کوتاه مدت سهم این انرژی‌ها در تأمین انرژی جهان کم خواهد بود.

کمیته منابع انرژی تجدیدپذیر شورای جهانی انرژی به کمیسیون "انرژی برای جهان فردا" برای بررسی‌های مربوط به منابع انرژی تجدیدپذیر کمک‌های زیادی کرده است.

انرژی حاصل از خورشید، در اثر فعل و انفعالات هسته‌ای که در داخل آن بوجود می‌آید، در داخل خورشید حرارتی در حدود ۱۰۰۰۰۰۰۰ درجه کلوین و روی سطح آن ۵۸۰۰ درجه کلوین ایجاد می‌کند. قسمت بسیار کمی از انرژی خورشید به سمت زمین می‌آید که مقدار آن در بیرون جو برابر ۱۳۰۰ وات بر متر مربع و مقدار متوسط آن در سطح زمین، یک کیلو وات بر متر مربع است. از این انرژی می‌توان به روش‌های مختلفی بهره برداری کرد.

منابع انرژی‌های نو در جهان متنوع‌اند، خورشید، باد، جزر و مد، گرمای زمین و ... از انواع این منابع‌اند که هر کشور با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خود از هر کدام از این منابع استفاده کمتر یا بیشتری می‌برد. در ایران نیز با توجه به شرایط اقلیمی انرژی خورشیدی و بادی مورد توجه قرار گرفته است [۴۹-۵۰].

۱-۲-۲- انرژی خورشید

خورشید عامل و منشاء انرژی‌های گوناگونی است که در طبیعت یافت می‌شوند که از جمله آنها می‌توان سوخت-های فسیلی، باد، امواج و جز و مد دریا را نام برد.

خورشید یکی از دو منبع مهم انرژی است که باید به آن رو آورد که در ضمن سادگی و ارزانی، خطرات و اثرات نامطلوب استفاده از انرژی هسته‌ای را نیز ندارد. در ایران علیرغم منابع عظیم نفتی و گازی، خوشبختانه به علت تابش خورشید در اکثر مناطق کشور اجرای طرح‌های خورشیدی میسر می‌باشد، چرا که استفاده از انرژی خورشید در شهرها و شصت هزار روستای پراکنده در سطح کشور می‌تواند صرفه جویی زیادی در مصرف سوخت‌های فسیلی را به همراه داشته باشد. روش‌های مختلفی را که برای استفاده از انرژی خورشیدی وجود دارد را می‌توان به چهار دسته کلی تقسیم کرد [۵۰-۵۱]:

۱- سیستم‌های خورشیدی پسیو^۱

۲- سیستم‌های خورشیدی اکتیو^۲

۳- سیستم‌های حرارت خورشیدی^۳

۴- سیستم‌های فتوولتائیک^۴

۱- سیستم‌های خورشیدی پسیو

شامل سیستم‌هایی هستند که انرژی خورشید را بطور مستقیم و بدون استفاده از سیستم‌های واسط جهت کاربردهای مختلف مانند گرما بکار می‌گیرند.

۲- سیستم‌های خورشیدی اکتیو

1 -Passive Solar System
2 -Active Solar System
3 -Solar Thermal System
4 -photovoltaic System

شامل سیستم‌هایی هستند که برای دریافت انرژی خورشید از کلکتورهای خورشیدی به عنوان جمع‌کننده انرژی خورشید استفاده می‌کنند و سپس آن را در کاربردهای مختلف بکار می‌برند.

۳- سیستم های حرارت خورشیدی

در این تکنولوژی از روش‌های مختلفی مانند استفاده از دیسک‌های سهمی شکل، دریافت کننده مرکزی و حوضچه‌های آفتابی برای دریافت و جمع‌آوری گرمای خورشید استفاده می‌شود.

۴- سیستم های فتوولتائیک

تبدیل مستقیم انرژی خورشید به انرژی الکتریکی را فتوولتائیک می‌گویند. در این روش با استفاده از خواص نیمه هادی‌ها و سری-موازی کردن تعداد زیادی از این سلولها ولتاژ و جریان دلخواه را بدست می‌آورند.

۲-۲-۲- انرژی باد

انرژی باد در حقیقت قسمتی از انرژی خورشید است که به زمین می‌رسد و به طور کلی عبارت از جریان هوایی است که به علت تغییر درجه حرارت بین دو نقطه از زمین به وجود می‌آید، ایجاد کننده این درجه حرارت عموماً خورشید است.

در حال حاضر انرژی باد سریع‌ترین انرژی از لحاظ گسترش روز افزون در جهان است. امروزه انرژی باد با رشد ۳۰٪ در جهان در حال گسترش است. در سال ۲۰۰۲ بیش از ۷۰۰۰MW ظرفیت جدید توسط انرژی باد به شبکه قدرت جهان اضافه شده است که ارزشی معادل ۷ میلیارد یورو دارد [۶-۷].

با شروع سال ۲۰۰۳ ظرفیت نیروگاه‌های بادی نصب شده به ۳۲۰۰۰MW رسید، که سهم اروپایی‌ها از این مقدار انرژی حدود ۳۴٪ بود، به این معنی که انرژی مورد نیاز ۱۶ میلیون مشترک یا به عبارتی ۴۰ میلیون شهروند اروپایی را تامین می‌کنند. در حال حاضر بیشتر از ۵۰ کشور در سطح دنیا از این انرژی استفاده می‌کنند.

از لحاظ زیست محیطی نیروگاه بادی نه تنها باعث تولید دی‌اکسیدکربن که مهمترین عامل در تولید گازهای گل‌خانه‌ای است، نمی‌شود، بلکه آلودگی‌های ناشی از استفاده انرژی‌های فسیلی و اتمی را نیز ندارد.

از لحاظ هزینه تولید توان بادی، این هزینه روز به روز در حال کاهش است به طوری که هزینه هر کیلووات ساعت توان تولیدی توسط توربین بادی در طی ۵ سال ۲۰٪ کاهش یافته است. نیروگاه بادی در بسیاری از مکان‌ها با نیروگاه فسیلی قابل رقابت است و حتی در بعضی مناطق با نیروگاه‌های گازی قابل رقابت است. از لحاظ ظرفیت نیز روز به روز توربین‌های با توان بالاتر به بازار می‌آید، به طوری که امروزه خروجی این توربین‌ها حتی به ۴/۵MW نیز رسیده است. اهمیت این تکنولوژی جدید را می‌توان در تجربیات کشورهایی مثل آلمان، اسپانیا، دانمارک، آمریکا و هند مشاهده کرد [۷].

۲-۲-۱- منابع باد و تقاضای برق

اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان دهنده این واقعیت است که منابع انرژی باد در جهان بسیار عظیم است و این منابع از توزیع خوبی در کشورهای مختلف برخوردارند. مقدار توان قابل دسترسی با توجه به تجهیزات موجود از انرژی باد حدود ۵۳۰۰۰ TWh/year تخمین زده شده است. این مقدار توان حدوداً بیش از دو برابر مقدار تقاضای جهان به انرژی برق در سال ۲۰۲۰ میلادی است که البته به دلیل محدودیت‌ها در تجهیزات و بهره‌برداری سبب می‌شود که کل این انرژی در دسترس نباشد.

البته اگر در بعضی کشورهای خاص این مطالعات دقیق‌تر باشد مشخص می‌شود که مقدار کل انرژی باد در این کشورها بسیار بیشتر از آن چیزی است که پیش‌بینی شده است. به طور مثال در آلمان، اندازه‌گیری دقیق نشان می‌دهد که کل انرژی باد این کشور، ۵ برابر بیشتر از مقدار تخمین زده شده در سال‌های قبل است.

پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۰ میلادی میزان تقاضای برق جهان به ۲۵۵۷۸ TWh برسد. برای این که بتوان با یک رشد مناسب ۱۲٪ این انرژی را توسط توربین‌های بادی تأمین کرد، لازم است تا سال ۲۰۲۰ میلادی تولید برق توسط این توربین‌ها به ۳۰۰۰ TWh برسد [۶-۷].

۲-۲-۲-۲- تولید ۱۲٪ برق جهان توسط انرژی باد

توجه به مطالعات سازمان آژانس انرژی باد نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۴ میلادی این رشد ۲۰٪ در سال خواهد بود که در نتیجه توان نصب شده به عدد ۴۶۲/۲۵۳ TWh خواهد رسید. بعد از سال ۲۰۱۴ این رشد به مقدار ۱۵٪ در سال و سپس به مقدار ۱۰٪ در سال نزول خواهد کرد. مطالعات نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۰ توان تولیدی توسط نیروگاه‌های بادی به مقدار ۱/۲ میلیون مگاوات خواهد رسید. در نتیجه با این برنامه ریزی هدف ۳۰۰۰ TWh در سال ۲۰۲۰ برآورده خواهد شد، که این مقدار معادل ۱۲٪ تقاضای جهانی برق است. هم‌چنین براساس این مطالعات مقدار تولید توان الکتریکی توسط نیروگاه‌های بادی در سال ۲۰۴۰ میلادی، مقدار ۳۱۰۰ GWh خواهد بود، که ۲۲٪ از کل تقاضای جهانی است. البته سهم کشورهای اروپایی، شمال آمریکا و چین از این مقدار تولید انرژی بادی بیشتر از سایر نقاط جهان خواهد بود.

۲-۲-۳- مزایای زیست محیطی

کاهش میزان دی‌اکسیدکربن در اتمسفر زمین که مهمترین عامل در تولید گازهای گل‌خانه‌ای است. مهمترین مزیت زیست محیطی استفاده از این انرژی است. میزان تولید دی‌اکسیدکربن توسط نیروگاه بادی (ناشی از سوئیچینگ) ۶۰۰ تن برای هر گیگاوات ساعت است. در نتیجه تا سال ۲۰۲۰ میلادی مقدار این آلودگی به ۱/۸۱۳ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال و تا سال ۲۰۴۰ به مقدار ۴/۸۶۰ تن در سال خواهد رسید این میزان آلودگی در مقایسه با آلودگی‌ای که دیگر نیروگاه‌های تولید برق تولید می‌کنند بسیار ناچیز است [۵۱].

۲-۳ مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها با مشارکت نیروگاه‌های بادی در تولید توان

با افزایش تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از توان بادی بسیار مورد توجه قرار گرفته و ضریب نفوذ توان بادی در مدار افزایش یافته است. یک وجه تمایز مهم و شاید اصلی‌ترین اختلاف نیروگاه‌های بادی با نیروگاه‌های فسیلی در انرژی ورودی آنها است. در نیروگاه‌های فسیلی به دلیل اینکه مقدار انرژی ورودی

کاملاً مشخص و قابل کنترل است، توان خروجی نیروگاه نیز مشخص است. اما در نیروگاه‌های بادی به دلیل نامشخص بودن سرعت باد که به‌عنوان انرژی ورودی محسوب می‌شود، خروجی نیروگاه نیز مقدار ثابتی نخواهد داشت و برای داشتن یک مدل خروجی توان مناسب از نیروگاه بادی، لازم است تا یک مدل مناسب از سرعت باد در دسترس باشد. باد یک پدیده طبیعی و در نتیجه سرعت و جهت آن تصادفی است. بنابراین بدست آوردن مدلی از سرعت باد که بتواند در محاسبات تولید توان نیروگاه وارد شود و نتایج دقیقی را حاصل نماید، کار مشکلی به نظر می‌رسد. از آنجا که میزان توان خروجی این واحدها با دقت بالا قابل پیش‌بینی نیست، افزایش ضریب نفوذ توان تولیدی باد در سیستم قدرت اثر مهمی بر نحوه‌ی برنامه‌ریزی و توزیع توان دارا می‌باشد. در نتیجه با افزایش ضریب نفوذ توان بادی در سیستم، عدم قطعیت توان باد باید در مشخص کردن ذخیره‌ی موردنیاز سیستم در نظر گرفته شود. در مرجع [۸] به لزوم افزایش ذخیره موردنیاز به دلیل عدم قطعیت باد اشاره شده است و در مرجع [۹] در سال ۱۹۸۳ راهکارهایی از جمله افزایش ذخیره‌ی چرخان موردنیاز برای پوشش عدم قطعیت باد ارائه شده است. در مرجع [۱۰] به منظور تخمین ذخیره موردنیاز با توجه تغییرات شرایط آب و هوایی و در نتیجه تغییرات میزان باد از یک روش احتمالی استفاده شده است. در مرجع [۱۱] در سال ۱۹۸۵ یک روش تحلیلی برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری و تعیین میزان ذخیره‌ی چرخان سیستم با حضور منابع تصادفی^۱ در شبکه، ارائه شده است. مرجع [۱۲] در سال ۱۹۹۱ از یک روش آماری برای تخمین میزان ذخیره چرخان موردنیاز سیستم با حضور منابع متغیر تولید توان، مانند باد و انرژی موج استفاده کرده است. همچنین در این مرجع اثرات ضریب نفوذ بالای منابع متغیر^۲ مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر منابع متغیر بر روی قابلیت اطمینان سیستم و کاهش هزینه‌های سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۱۳] روشی برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت سیستم و تعیین ذخیره موردنیاز در سیستم قدرت با واحدهای حرارتی، آبی و بادی ارائه داده است. مرجع [۱۴] در سال ۲۰۰۳ از مدل سری زمانی به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور

^۱-Stochastic

^۲-Variable Sources

نیروگاه بادی استفاده کرده است. مرجع [۱] در سال ۲۰۰۵ با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان به‌عنوان یک مقیاس، میزان ذخیره‌ی موردنیاز سیستم را با توجه به برون‌رفت واحدها و تغییرات مقدار باد و بار از میزان پیش‌بینی‌شده‌شان تخمین می‌زند. در این مرجع نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش ظرفیت توان بادی در مدار، باید میزان ذخیره سیستم افزایش یابد در غیر اینصورت قابلیت اطمینان سیستم کاهش خواهد یافت. مرجع [۱۵] استفاده از ذخیره‌کننده‌های انرژی از جمله واحدهای تلمبه ذخیره‌ای به‌منظور پوشش عدم قطعیت باد پیشنهاد داده است. مرجع [۱۶] یک روش شبیه‌سازی برای بررسی تأثیر تولید توان بادی با ضریب نفوذ بالا در سیستم قدرت بر هزینه، قابلیت اطمینان و مسایل محیط زیستی ارائه می‌دهد. در این مرجع یک روش برای برنامه‌ریزی در مدار قرارگیری واحدها و توزیع اقتصادی بار ارائه شده است که در آن برنامه‌ریزی واحدها با توجه به اطلاعات خروجی واحدهای حرارتی و پیش‌بینی‌های ۳۶ ساعت آینده، اصلاح می‌شود. مرجع [۱۷] استفاده از دیزل ژنراتورها را به‌عنوان برطرف کننده عدم تعادل ناشی از خطا در پیش‌بینی باد پیشنهاد می‌دهد. در مرجع [۱۸] از روش بهینه‌سازی EIPSO^۱ برای تعیین ذخیره چرخان موردنیاز سیستم با واحدهای حرارتی-بادی استفاده شده است. در این مرجع جواب بهینه از کمینه‌سازی هزینه‌ی کل بهره‌برداری و هزینه‌ی برون‌رفت واحدها^۲ حاصل می‌شود. مرجع [۱۹] از روش بهینه‌سازی فازی برای برنامه‌ریزی تولید نیروگاه‌ها با حضور واحدهای بادی و خورشیدی استفاده می‌کند.

در روش‌های سنتی میزان ذخیره موردنیاز سیستم بر مبنای معیار پیشامدهای احتمالی (N-1) تعیین می‌شود که در آن میزان ذخیره‌ی سیستم باید بزرگتر از ظرفیت بزرگترین واحد در مدار و یا درصدی از بار کل سیستم و یا ترکیبی از هر دو باشد. این معیار بر این مبنا می‌باشد که چنانچه بزرگترین واحد در مدار قطع شود، برای حفظ تعادل توان تولیدی و مصرفی نیاز به قطع کردن هیچ یک از بارها نباشد [۲]. در حضور تولیدات توان بادی، روش سنتی میزان ذخیره‌ی سیستم را بزرگتر و یا مساوی ظرفیت بزرگترین واحد در مدار یا درصدی از

^۱-Evolutionary Iteration Particle Swarm Optimization

^۲-Outage Cost

بار کل سیستم یا درصدی از توان تولیدی بادی و یا ترکیبی از این معیارها در نظر می‌گیرد [۲۰]. این روش ساده و به آسانی قابل پیاده‌سازی می‌باشد. اما در این روش احتمال پیش‌بینی باد و بار و همچنین احتمال برون رفت بزرگترین واحد در مدار در نظر گرفته نمی‌شود که در نظر نگرفتن این احتمال ممکن است منجر به تخصیص مقدار غیرضروری ذخیره و در نتیجه افزایش هزینه‌ی بهره‌برداری سیستم شود. از طرف دیگر، معیار امنیت (N-) از در نظر گرفتن همزمان برون‌رفت خطوط و واحدها به دلیل احتمال کم وقوع آنها صرف‌نظر می‌کند، این در حالی است که در بعضی از این موارد گرچه احتمال وقوع همزمان این برون‌رفت‌ها کم می‌باشد اما این همزمانی ممکن است منجر به خاموشی کلی^۱ گردد [۲۱].

در مرجع [۲۱] از روش شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور تخمین ذخیره‌ی چرخان موردنیاز سیستم استفاده شده است. در این مرجع با در نظر گرفتن اختلاف باد و بار به صورت بار خالص، یک تابع توزیع نرمال برای بار خالص محاسبه می‌شود. سپس با در نظر گرفتن این منحنی توزیع نرمال و همچنین میزان ذخیره محاسبه شده در حالت بدون در نظر گرفتن تولیدات توان بادی (مرجع [۲۲])، میزان ذخیره‌ی چرخان موردنیاز سیستم محاسبه می‌شود.

در مرجع [۲۳] در سال ۲۰۰۸ از یک روش بهینه‌سازی تصادفی برای برنامه‌ریزی واحدها استفاده شده است. در این مرجع عدم قطعیت پیش‌بینی باد و بار به صورت همزمان در نظر گرفته شده است و باد به صورت بار منفی مدل می‌شود. بدین معنی که اختلاف میزان باد و بار به صورت یک عنصر بار خالص تعریف می‌شود و باد به عنوان یک عامل رقابتی در بازار در نظر گرفته نمی‌شود. خطا در پیش‌بینی بار و باد و همچنین بار خالص به صورت یک تابع توزیع نرمال فرض می‌شود. به منظور مدل‌سازی، تابع توزیع نرمال به چندین بخش تقسیم شده و به صورت یک تابع چندتکه در نظر گرفته می‌شود. برای مدل کردن این عدم قطعیت در ساعت‌های مختلف از درخت سناریو استفاده می‌شود. اما در این مرجع عدم قطعیت‌ها تنها توسط ذخیره چرخان واحدهای تولیدی جبران شده و ذخیره‌ی غیرچرخان و نیز ذخیره‌ی آرایه شده توسط بارها در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین در این مرجع

^۱ -Black Out

پیشامدهای احتمالی در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۲۴] بیان شده است که استفاده از منابع ذخیره کننده انرژی، بهره‌برداری از سیستم قدرت با حضور واحدهای بادی را کارآمدتر می‌نماید. مرجع [۲۵] نیز از یک روش بهینه‌سازی تصادفی به منظور برنامه‌ریزی واحدها در یک سیستم قدرت استفاده کرده است. در این مرجع از یک برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای به منظور مدل کردن طبیعت تصادفی باد استفاده شده است. بدین صورت که در مرحله اول هزینه‌ها و مسایل مربوط به بازار مدل می‌شود و در مرحله دوم با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف از تولید توان بادی، شرایط بهره‌برداری واقعی از سیستم مدل می‌شود. بدین طریق میزان ذخیره موردنیاز سیستم با توجه به وقوع هر حالت محتمل از تولید توان بادی و احتمال وقوع هر حالت ارزیابی می‌شود. همچنین از یک روش تسویه بازار با در نظر گرفتن قیود شبکه استفاده شده است. روش مطرح شده در این پروژه بر مبنای این مدل می‌باشد.

عیب اساسی تعیین میزان ذخیره چرخان سیستم به روش معیار امنیت قطعی در نظر نگرفتن حذف بار اجباری و ثابت گرفتن مقدار ذخیره موردنیاز سیستم در تمامی دوره‌ها می‌باشد. حذف بار اجباری برخلاف حذف بار اختیاری سیستم می‌باشد، در حذف بار اختیاری بارها پیشنهاد کم کردن مصرفشان را ارائه می‌دهند که در واقع مانند ذخیره چرخان افزایشی عمل می‌کند. بهره‌بردار می‌تواند در برنامه‌ریزی برای پیشامدها با احتمال وقوع کم در عوض تخصیص ذخیره در این پیشامدها از حذف بار اجباری سیستم استفاده نماید. این بدین معنی می‌باشد که در صورت وقوع این پیشامد در زمان بهره‌برداری سیستم، بهره‌بردار بخشی از بار را برای برقرای تعادل مجدد بین تولید و مصرف قطع می‌کند. با در نظر نگرفتن حذف بار اجباری سیستم تمام پیشامدهای احتمالی مستقل از احتمال وقوع آنها در تعیین ذخیره سیستم در نظر گرفته می‌شود. این موضوع منجر به تخصیص هزینه بهره‌برداری اضافه به سیستم قدرت می‌شود. روش معیار امنیت قطعی به دلیل مدل نکردن پیشامدهای ممکن و احتمال وقوع آنها امکان در نظر گرفتن حذف بار اجباری سیستم را دارا نمی‌باشد و از وقوع بدترین پیشامد برای تعیین ذخیره موردنیاز سیستم استفاده می‌کند. در روش برنامه‌ریزی با معیار امنیت احتمالی حذف بار اجباری سیستم مدل می‌شود اما برنامه‌ریزی اقتصادی تنها برای حالت بدون خطا انجام

می‌شود و در صورت وقوع پیشامدها بهره‌برداری در حالت بهینه‌ی اقتصادی خود قرار ندارند. بنابراین استفاده از یک روش بهینه‌سازی تصادفی در برنامه‌ریزی تولید واحدها که احتمال وقوع حوادث و برنامه‌ریزی برای آن‌ها را در نظر می‌گیرد، ضروری به نظر می‌رسد. در روش معیار امنیت تصادفی هزینه بهره‌برداری در تمامی پیشامدهای محتمل همراه با احتمال وقوع‌شان در کنار هزینه‌های حالت بدون خطا سیستم در تابع هدف گنجانده می‌شود در نتیجه برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم علاوه بر حالت عادی، برای وقوع تمامی پیشامدهای ممکن نیز به صورت اقتصادی خواهد بود. از مزایای معیار امنیت تصادفی، اختصاص ذخیره به صورت مناسب خواهد بود. زیرا در این روش علاوه بر در نظر گرفتن محدودیت خطوط شبکه و جلوگیری از حبس ذخیره، ذخیره مورد استفاده در هر پیشامد نیز به اقتصادی‌ترین حالت ممکن اختصاص خواهد یافت. در روش تصادفی به منظور برقراری تعادل توان بین تولید و مصرف در برنامه‌ریزی برای پیشامدهای محتمل با احتمال کم، در صورتی که میزان هزینه ناشی از حذف بار اجباری کم می‌باشد، از حذف بار اجباری استفاده می‌شود.

حذف بار اجباری سیستم در این پروژه به صورت جریمه در تابع هدف در نظر گرفت. همانطور که دیدیم به منظور در نظر گرفتن حذف بار اجباری به صورت جریمه در تابع هدف، از معیار ارزش بار از دست رفته $VOLL^1$ استفاده می‌شود (که در ادامه توضیح داده شده است). با در نظر گرفتن احتمال وقوع هر حادثه، اهمیت آن حادثه در تعیین میزان ذخیره‌ی سیستم و یا در نظر گرفتن حذف بار اجباری سیستم برآورد می‌شود.

در نظر گرفتن حذف بار اجباری دارای دو مزیت اصلی می‌باشد:

❖ امکان پذیر بودن تمامی سناریوها را تضمین می‌کند.

❖ از اختصاص ذخیره برای سناریوها با احتمال کم و یا دوره‌های زمانی با $VOLL$ کم جلوگیری می‌کند.

¹-Value of Lost Load

❖ در نظر گرفتن حذف بار اجباری، هزینه‌ی بهره‌برداری سیستم را حتی در مواردی که بهره‌برداری از سیستم بدون نیاز به این حذف بار انجام می‌گیرد، کاهش می‌دهد (بدلیل نیاز به اختصاص ذخیره‌ی کمتر).

در ادامه به توضیح ارزش بار از دست رفته پرداخته شده است.

۲-۳-۱ ارزش بار از دست رفته

صنعت برق در واقع بنیان اقتصاد تمامی کشورها می‌باشد، بنابراین قطع برق توسعه صنعتی و اقتصادی کشورها را با مشکلاتی روبرو می‌کند. به‌عنوان مثال خاموشی کلی در شرق آمریکا در سال ۲۰۰۳ ضرر اقتصادی در حدود ۳۰ میلیارد دلار در برداشت. همچنین ضررهای ناشی از مصرف‌کنندگان خانگی در خاموشی کلی سال ۲۰۰۳ در ایتالیا در حدود ۳۰۰ میلیون یورو محاسبه شده است [۲۶].

ارزش بار از دست رفته (VOLL) بر مبنای ضرر اقتصادی کلی ناشی از قطعی برق محاسبه می‌شود. تعیین VOLL نقش مهمی در تصمیم‌گیری برای تعیین ذخیره‌ی موردنیاز سیستم و سطح قابلیت اطمینان سیستم دارد. در واقع نمی‌توان یک مقدار ثابت برای VOLL تعریف کرد، چراکه این مقدار به شرایط مختلفی بستگی دارد. این شرایط مختلف شامل موارد زیر می‌باشد:

- فعالیتی که از قطع شدن برق تحت تأثیر قرار گرفته است و در نتیجه زمان انجام آن فعالیت.
- وضعیت آب و هوایی و در نتیجه فصل سال.
- مدت زمان قطعی.

در واقع VOLL به‌عنوان یک معیار برای سنجش امنیت و قابلیت اطمینان کاربرد دارد. چنانچه بنا به‌دلیلی از جمله محاسبات ساده‌تر نیازمند تعیین یک مقدار ثابت برای VOLL باشیم، بهترین تقریب، مقدار میانگین در بین تمام مقادیر ممکن می‌باشد. در این پروژه، یک مقدار ثابت برای VOLL در نظر گرفته می‌شود. در روش ارائه شده در این پروژه VOLL دارای نقش مهمی در تعیین ذخیره‌ی موردنیاز سیستم می‌باشد. میزان VOLL

زیاد بدین معنی است که تأمین توان موردنیاز مصرف‌کننده بسیار مهم و به‌منظور فعالیت‌های اقتصادی مصرف‌کنندگان ضروری است. بنابراین میزان بالای VOLL در سیستم منجر به نیاز سیستم به میزان ذخیره بالاتر خواهد شد. ارزش انرژی برای مشتریان بسته به نوع مشتری و ساعات توزیع انرژی متفاوت می‌باشد.

۲-۳-۲ انرژی باد

به‌دلیل تصادفی بودن سرعت باد، در محاسبات مدل‌سازی آن نیاز به در نظر گرفتن ملاحظات احتمالاتی می‌باشد. بنابراین باد یک مجموعه برای سیستم قدرت الکتریکی می‌باشد که به‌دلیل طبیعت تصادفی‌اش چالش‌هایی را برای بهره‌بردار و برنامه‌ریز سیستم قدرت بوجود آورده است. به‌منظور تطبیق طبیعت غیرقابل پیش‌بینی توان باد، تولیدات و مصارف برنامه‌ریزی شده در بازار برق باید در طول دوره‌ی بهره‌برداری واقعی از سیستم قدرت اصلاح شوند. ذخیره‌ها خدماتی هستند که در بازارهای برق به‌منظور ایجاد تطابق‌های موردنیاز مبادله می‌شوند. وقتی تولید توان بادی افزایش می‌یابد، نیاز به ذخیره‌های چرخان و غیرچرخان نیز افزایش می‌یابد که این به معنای افزایش هزینه‌ی بهره‌برداری سیستم می‌باشد. در سیستم قدرت با ضریب نفوذ بالای توان بادی، وابستگی بین انرژی و ذخیره و برنامه‌ریزی آن‌ها بسیار مهم می‌شود. استفاده روند تسویه بازار ذخیره و انرژی به‌طور هم‌زمان، از بهره‌برداری نامناسب غیراقتصادی، شروع به کار واحدهای بیشتر و حذف بار غیرضروری جلوگیری می‌کند [۲۵].

در این پروژه ذخیره موردنیاز سیستم با استفاده از معیار امنیت تصادفی تعیین می‌شود. در برنامه‌ریزی با معیار امنیت تصادفی تمامی سناریوهای ممکن در تابع هدف لحاظ شده و برای آنها برنامه‌ریزی می‌شود (منحنی تولید توان بادی در هر ساعت بصورت تابع توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود و سپس بصورت سناریوهایی فرض می‌شود که در ادامه توضیح داده شده است). در این روش هر یک از سناریوها توسط میزان احتمال وقوع آن سناریو در تابع هدف وزندهی می‌شوند. بدین ترتیب تمامی سناریوها با توجه به احتمال وقوع‌شان در برنامه‌ریزی حالت عادی سیستم تأثیرگذار خواهند بود. از مزایای این روش می‌توان به این موضوع اشاره کرد که در

شبکه‌ای که برنامه‌ریزی بهره‌برداری آن به این روش انجام شده است، حتی در صورت بروز پیشامدهای احتمالی و تغییر میزان باد و بار از میزان پیش‌بینی شده‌ی آن، بهره‌برداری از سیستم به صورت اقتصادی انجام خواهد شد همچنین این نوع برنامه‌ریزی امکان در نظر گرفتن حذف بار اجباری سیستم را فراهم می‌کند. بدین معنی که در سناریوهایی از تولید توان باد که احتمال وقوع آن‌ها بسیار کم می‌باشد، می‌توان به جای اختصاص ذخیره اضافه، از حذف بارهایی که ارزش بار از دست رفته در آن‌ها کم است استفاده کرد.

در این پروژه روشی برای مشخص کردن سطح بهینه‌ای از ذخیره‌ها و مقدار تولید توان هر واحد معرفی شده است. این روش بر مبنای یک روند جدید و انعطاف‌پذیر از تسویه بازار می‌باشد و توانایی در نظر گرفتن سطح بالایی از عدم قطعیت را دارا می‌باشد (مانند مواردی که ضریب نفوذ توان بادی زیاد می‌باشد). اهداف این پروژه بر روی پوشش‌دهی مناسب عدم قطعیت تولید توان بادی متمرکز شده است. روش موردنظر به صورت مسئله برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای انجام شده است که مرحله‌ی اول بازار برق، قوانین و قیود آن را بیان می‌دارد و در مرحله‌ی دوم بهره‌برداری از سیستم قدرت و محدودیت‌های فیزیکی بیان شده است.

ویژگی‌های روش مورد بررسی در این پروژه به صورت زیر است:

- ۱- ارزیابی ذخیره بر مبنای روند تسویه بازار که عدم قطعیت مرتبط با توان باد را به صورت بهینه مدیریت کند.
- ۲- مشخص کردن میزان بهینه و اقتصادی از تولید توان هر واحد و سطح بهینه ذخیره‌ی چرخان و غیرچرخان موردنیاز سیستم قدرت با ضریب نفوذ بالای تولید توان بادی.
- ۳- تعیین هزینه تولید توان و ذخیره‌ها.

همچنین در این روش به منظور برنامه‌ریزی بهینه‌ی سیستم قدرت از ریزش باد^۱ به عنوان تنها عنصر کنترلی تولید توان بادی استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن عنصر کنترلی بر تولید توان بادی، میزان توان بادی برنامه‌ریزی شده می‌تواند کمتر از مقدار پیش‌بینی شده در نظر گرفته شود. بنابراین بهره‌بردار می‌تواند میزان تولید توان بادی را بر روی مقدار بهینه‌ی آن تنظیم کند. از طرفی ریزش باد به طور معمول باید در تابع هدف با ضریب جریمه در نظر

گرفته شود چراکه استفاده از باد به دلیل هزینه‌ی پایین تولید آن به صرفه می‌باشد و باید تا حد امکان در تأمین توان موردنیاز هر ساعت مشارکت داده شود. ریزش باد به‌طور معمول توسط تنظیم زاویه‌ی پره‌ی توربین صورت می‌گیرد.

۲-۳-۳- مدل‌سازی توان تولیدی باد

با افزایش توجه به حضور نیروگاه‌های بادی در سیستم، پیش‌بینی توان باد و همچنین در نظر گرفتن مدلی مناسب به منظور در نظر گرفتن این پیش‌بینی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم مهم به نظر می‌رسد. در این پروژه فرض می‌شود که یک ابزار پیش‌بینی ساعت به ساعت (و یا هر بازه‌ی زمانی دیگری برطبق نیاز برنامه‌ریزی بهره‌برداری) در دست است. مدل‌های آماری پیش‌بینی باد به‌صورت توزیع نرمال نمی‌باشد. همچنین منحنی توان تولیدی-سرعت باد نیز در توربین‌های بادی غیرخطی است. در نتیجه توزیع احتمال توان خروجی یک توربین بادی به‌صورت تنها را نمی‌توان به‌صورت تابع توزیع نرمال در نظر گرفت. با فرض اینکه تعداد توربین‌های نیروگاه بادی زیاد باشد و همچنین با توجه به پراکندگی جغرافیایی توربین‌ها و با استفاده از قضیه‌ی حد میانی^۱ می‌توان توان تولیدی نیروگاه بادی را به‌صورت توزیع نرمال در نظر گرفت [۲۳]. اگرچه در برخی از نیروگاه‌های بادی عدم توزیع مناسب جغرافیایی توربین‌های بادی مانع صحت این فرض می‌شود. این موارد در این پروژه در نظر گرفته نشده است. در ادامه نحوه در نظر گرفتن این تابع توزیع نرمال به شکل سناریوهای مختلف تولید توان بادی در مدل مدنظر در این پروژه- به‌منظور برنامه مشارکت واحدها- ارائه شده است.

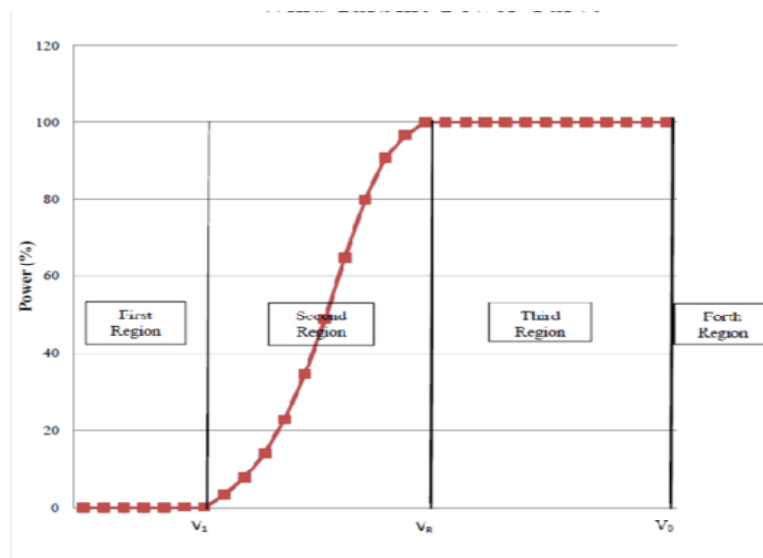
۲-۳-۳-۱ ساختار سناریوهای توان بادی

به‌منظور مهار انرژی باد و تبدیل آن به انرژی الکتریکی جهت مصرف در شبکه قدرت از نیروگاه‌های بادی استفاده می‌شود. نیروگاه بادی شامل مجموعه‌ای از چندین توربین بادی است که بسته به نوع طراحی، نوع توربین‌ها و ژنراتورها متفاوت خواهد بود. به نیروگاه بادی در اصطلاح مزرعه بادی نیز گفته می‌شود. توان خروجی

1-Central Limit Theorem

توربین متناسب با سرعت باد تغییر می‌کند. بنابراین هر توربین بادی یک مشخصه تولید توان دارد که به وسیله این منحنی می‌توان میزان تقریبی انرژی تولیدی را به دست آورد. منحنی خروجی یک توربین بادی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است [۲۷]. در این شکل، توان خروجی برحسب سرعت باد نمایش داده شده است. براساس این شکل، منحنی توان خروجی دارای چهار بخش اصلی است:

- محدوده‌ای که توربین بادی به علت سرعت کم باد، قادر به تولید نیست: در صورتیکه سرعت باد از حد مشخصی (Cut-in wind speed) کمتر باشد، توربین نمی‌تواند توانی تولید کند.
 - محدوده‌ای که توان خروجی توربین بادی با افزایش سرعت باد، افزایش می‌یابد: در صورتیکه سرعت باد از سرعت مشخصی (Cut-in) بیشتر باشد، با افزایش سرعت باد، تولید خروجی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تولید تا تولید نامی توربین بادی ادامه پیدا می‌کند (این بخش از منحنی، گاهی اوقات با منحنی خطی تقریب زده می‌شود).
 - محدوده‌ای که توان توربین بادی با افزایش سرعت باد، ثابت می‌ماند: در صورتیکه سرعت باد از سرعتی که در آن توان نامی تولید می‌شود، باز هم افزایش یابد، خروجی توربین در مقدار نامی ثابت می‌ماند. افزایش سرعت باد در این محدوده تا سرعت مشخصی می‌تواند ادامه پیدا کند (Shut-down wind speed). در این سرعت، تجهیزات حفاظتی توربین، تولید را متوقف خواهند کرد.
 - محدوده‌ای که توربین بادی به علت سرعت زیاد باد نمی‌تواند تولید کند: در صورتیکه سرعت باد از سرعت غیرمجاز مشخصه توربین فراتر رود، توربین بادی قادر به تولید نخواهد بود.
- پیش‌بینی باد که به دلیل شرایط آب و هوایی دارای عدم قطعیت قابل توجهی خواهد بود. به منظور بهره‌برداری از تولید توان باد نیاز به مدل‌سازی این عدم قطعیت می‌باشد. هرچه مدل‌سازی عدم قطعیت دقیق‌تر باشد، نیاز به در نظر گرفتن ذخیره کمتر برای پوشش خطای پیش‌بینی توان باد می‌باشد و در نتیجه هزینه بهره‌برداری سیستم کاهش می‌یابد. نیروگاه‌های بادی با در اختیار داشتن ابزارهای پیش‌بینی، می‌توانند برنامه‌ریزی تولید را در سیستم قدرت انجام دهند.

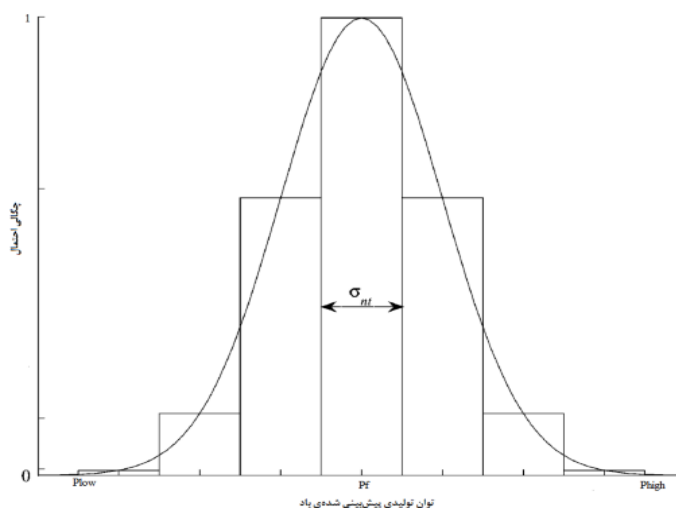


شکل ۲- ۱: منحنی توان خروجی توربین بادی بر حسب سرعت باد [۵۴]

هرچه صحت این ابزارها در پیش‌بینی تولید بیشتر باشد، این نیروگاه‌ها شرایط مناسب‌تری را جهت برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم فراهم می‌نمایند. در واقع عملکرد این ابزارها در پیش‌بینی تولید بادی در شرایط متفاوت آب و هوایی و مواقع مختلف سال، نشان‌دهنده‌ی عدم قطعیت همراه شده در مزارع بادی است. در این پروژه فرض شده است، ابزار پیش‌بینی باد موجود است و به صورت ساعتی باد را پیش‌بینی می‌نماید. توابع توزیع احتمال خطای پیش‌بینی، در کنار پیش‌بینی ساعتی انجام می‌گیرد و سناریوهای احتمالاتی تولید را ایجاد خواهند کرد. این سناریوها برای تعیین میزان بهینه ذخیره سیستم بکار گرفته می‌شوند. در واقع با انجام بهینه‌سازی احتمالاتی^۱ می‌توان برنامه‌ریزی تولید و ذخیره سیستم را انجام داد. همچنین توجه به تابع چگالی احتمال خطای پیش‌بینی باد، نشان می‌دهد که این تابع را برای یک توربین بادی به صورت تنها، نمی‌توان به صورت تابع نرمال در نظر گرفت. با فرض اینکه تعداد توربین‌های نیروگاه بادی زیاد باشد و همچنین با توجه به پراکندگی جغرافیایی توربین‌ها می‌توان توان تولیدی نیروگاه بادی را به صورت توزیع نرمال فرض نمود. مدل تسویه‌ی بازار موردنظر، در تابع هدف و همچنین قیود مسئله نیازمند در نظر گرفتن مقادیر ممکن تولید توان بادی در تمام ساعات می‌باشد و در نظر گرفتن توان تولیدی باد به صورت یک تابع توزیع نرمال پیوسته به-

^۱- Probabilistic Optimization

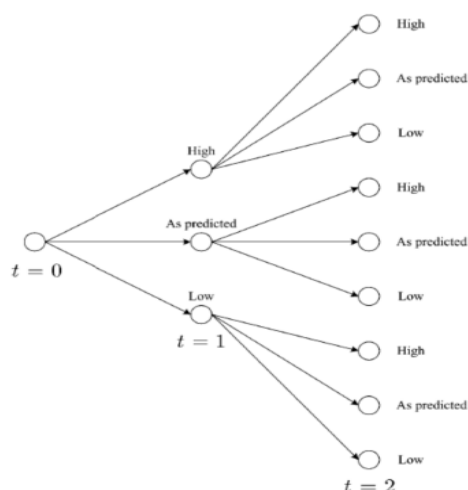
منظور محاسبات تسویه‌ی بازار برق ممکن نیست. بنابراین در نظر گرفتن توان تولیدی باد به صورت مقادیر مجزا و نمونه‌گیری شده از تابع توزیع نرمال موردنظر منطقی به نظر می‌رسد [۲۳]. در شکل ۲-۲ یک مدل از این نمونه‌گیری که در آن تابع توزیع نرمال پیوسته توان تولیدی باد به هفت قسمت تقسیم شده، نشان داده شده است. همچنین تعداد این قسمت‌ها می‌تواند کمتر و یا بیشتر باشد. متغیر بودن باد در روش ارایه شده در این پروژه به وسیله‌ی منحنی توزیع نرمال پیش‌بینی شده توان باد در هر ساعت و احتمال آن‌ها بر مبنای نمونه‌های گرفته شده از تابع توزیع نرمال، مدل می‌شود. به منظور تسویه بازار با در نظر گرفتن عدم قطعیت باد، استفاده از درخت سناریو^۱ با در نظر گرفتن مقادیر محتمل توان باد در تمامی دوره‌ی برنامه‌ریزی منطقی به نظر می‌رسد. به عنوان مثال می‌توان تابع توزیع نرمال را به صورت تابعی سه و یا هفت تکه‌ای در نظر گرفت. با در نظر گرفتن هفت تکه‌ای بودن تابع چگالی احتمال باد در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته، $10^{20} \times 1/9$ سناریو بدست خواهد آمد. به منظور برنامه‌ریزی با تعداد سناریوهای زیاد، می‌توان با یک تقریب خوب از روش‌های کاهش سناریو استفاده کرد. شکل ۲-۳ درخت سناریو برای بازه‌ی برنامه‌ریزی دو ساعته با در نظر گرفتن سه حالت مختلف برای باد را نشان می‌دهد [۲۳].



شکل ۲-۲ تابع توزیع نرمال تولید توان بادی یک نیروگاه بادی [۲۳]

¹-Scenario Tree

احتمال وقوع هر سناریو از ضرب احتمال حالت‌های توان بادی مرتبط با آن سناریو در تمامی ساعت‌ها از ابتدای بازه‌ی برنامه‌ریزی تا انتهای آن محاسبه می‌شود. به‌عنوان مثال احتمال سناریوی اول در شکل ۲-۳ از ضرب احتمال وزش مقدار بالای پیش‌بینی باد در ساعات ۱ و ۲ حاصل می‌شود.



شکل ۲-۳ درخت سناریوی تولید توان بادی [۲۳]

۲-۴ انتشار آلاینده‌های واحدهای حرارتی و در نظر گرفتن آن در برنامه‌ریزی تولید واحدها

گسترش روزافزون نیاز به انرژی و محدودیت منابع فسیلی، افزایش آلودگی محیط زیست ناشی از سوزاندن این منابع، بحث گرم شدن هوا و اثرات پدیده گلخانه‌ای، ریزش باران‌های اسیدی و ضرورت متعادل نمودن نشر CO₂ همگی لزوم صرفه جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی و توجه مضاعف به استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر را ایجاب می‌کند.

در بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های تولید برق است که آلودگی محیط زیست را در پی نداشته و پایان‌پذیر نیز نیست. طبق آمار موجود تولید هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی از باد می‌تواند از انتشار حدود یک کیلوگرم CO₂ در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت فسیلی جلوگیری نماید. به طور

کلی با جایگزینی انرژی برق بادی به جای انرژی برق تولیدی از نیروگاه سوخت فسیلی می‌توان از انتشار گازهای گلخانه‌ای کاست.

در زمانی که برق مورد نیاز شبکه توسط توربین‌های بادی تزریق می‌شود برق تولیدی سایر نیروگاه‌ها کاهش یافته از این رو در مصرف سوخت فسیلی این نیروگاه‌ها صرفه جویی می‌گردد که با توجه به میزان تزریق برق بادی به شبکه، از انتشار آلاینده‌های محیط زیست کاسته خواهد شد. از طرف دیگر می‌توان به جاذبه‌های طبیعی و چشم انداز سیستم های انرژی بادی که در معرض دید افراد قرار می‌گیرند اشاره کرد که نمایی از انرژی پاک برای مردم تلقی می‌شود. در ضمن از سطح زمینی که برای احداث مزرعه برق بادی اختصاص می‌یابد ۹۹٪ آن قابل استفاده می‌باشد. گرچه پره‌های توربین‌های بادی نوعاً بیشتر از ۱۰ متر قطر دارند اما از آنجا که در ارتفاع بالاتر از ۲۰ متری قرار دارند، اجازه فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری تا کنار برج توربین‌ها همچنان فراهم است و شواهد موید این است که حیوانات اهلی و وحشی اطراف مزارع بادی نیز متحمل اثر سوئی نمی‌گردند. هم چنین مطالعات در کشورهای پیشرو در این تکنولوژی نشان می‌دهد که تنها ۱٪ از کل سطح مزارع بادی توسط خود این توربین‌ها اشغال می‌شوند. در نتیجه با توجه به موارد فوق انرژی بادی در کاهش هزینه‌های اجتماعی در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت فسیلی که در برگیرنده اثرات برون زایی منفی می‌باشند توجیه پذیر می‌باشد و برق حاصل از آن می‌تواند به عنوان یک انرژی پایدار در توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی کشور مورد استفاده قرار گیرد.

پرواضح است که تولید توان با استفاده از انرژی باد هیچ‌گونه آلودگی مضرى به‌همراه نخواهد داشت. بنابراین معمولاً از این انرژی به‌عنوان یک سیاست کاهش آلودگی استفاده می‌شود. همچنین واحدهای حرارتی با تولید در میزان توان مشخصی آلودگی تولیدی‌شان کاهش می‌یابد. بنابراین در نظر گرفتن میزان آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی در برنامه‌ریزی تولید به کاهش این آلودگی کمک می‌کند. از طرفی دیگر با افزایش ضریب نفوذ تولید توان بادی اهمیت در نظر گرفتن آلودگی تولیدی واحدها در برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. چراکه منحنی آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی به‌گونه‌ای می‌باشد که با کاهش زیاد در میزان توان تولیدی‌شان میزان آلودگی

تولید شده‌ی آن‌ها افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش ضریب نفوذ تولید توان بادی و تأمین بار توسط آن، میزان تولید توان واحدهای حرارتی در برنامه‌ریزی کاهش می‌یابد (این موضوع در ساعت‌های کم‌باری و یا بار متوسط آشکارتر می‌باشد) که این می‌تواند به معنی افزایش میزان آلوده‌کننده‌های هوای تولیدی باشد. بنابراین یک چالش بین مزایای استفاده از توان بادی و افزایش احتمالی در میزان آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی به دلیل تولید در سطح پایین وجود دارد. به‌منظور غلبه بر این چالش در نظر گرفتن انتشار آلاینده‌های هوا در حین برنامه‌ریزی بهره‌برداری ضروری به‌نظر می‌رسد. همچنین به‌منظور کاهش همزمان هزینه‌ی بهره‌برداری و آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی، استفاده از یک روش برنامه‌ریزی چندمنظوره ضروری به‌نظر می‌رسد. چراکه برنامه‌ریزی با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و بدون در نظر گرفتن آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی منجر به افزایش سطح این آلودگی می‌شود [۷]-[۵۱]. در این پروژه از یک روش بهینه‌سازی چندمنظوره برای برنامه‌ریزی تولید با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی به‌طور همزمان، استفاده شده است که در فصل سوم به‌طور مفصل توضیح داده شده است.

۲-۵ بهینه‌سازی فازی و استفاده از آن در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با حضور نیروگاه‌های بادی

تئوری مجموعه‌های فازی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها بکار می‌رود. در این تئوری برای هر یک از اعضای یک مجموعه، درجه عضویتی تعیین می‌شود به این معنا که آن عنصر به اندازه آن درجه عضویت به مجموعه ذکر شده وابسته است. به‌عنوان مثالی بسیار ساده می‌توان میزان وابستگی ساعت ۱۱/۵ و ساعت ۱۲ به مجموعه-ی ظهر را مثال زد. می‌توان درجه عضویت ساعت ۱۲ در مجموعه ظهر را ۱ و درجه عضویت ساعت ۱۱/۵ را ۰/۷ در نظر گرفت. نمایش مجموعه‌های فازی بصورت زیر می‌باشد:

$$\tilde{A} = \{(y, \mu_{\tilde{A}}) | y \in Y\}, \quad 0 \leq \mu_{\tilde{A}} \leq 1 \quad (1-2)$$

که در آن $\mu_{\tilde{A}}$ درجه وابستگی y به مجموعه \tilde{A} است.

بهینه‌سازی فازی برای مدلسازی پارامترهای دارای عدم قطعیت در یک مسئله بهینه‌سازی بکار می‌رود. در برخی مسائل بهینه‌سازی مانند مدل مدنظر در این پروژه، پارامترهای متغیر سبب عدم قطعیت در قیود و تابع هدف می‌شوند. برای برآورده شدن مطلوبیت این روابط یک درجه عضویت تعیین می‌شود و هدف مسئله بهینه‌سازی به بیشینه کردن درجه عضویت مربوطه تبدیل می‌شود. شایان ذکر است که درجه عضویت ۱ معادل با مسئله قطعی می‌باشد.

در مرجع [۲۸] که در سال ۱۹۷۷ ارائه شد، کاربرد منطق فازی در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها مورد بررسی قرار گرفته است. مدل پیشنهاد شده در این مرجع یک توصیف جامع از رفتار سیستم قدرت، مشخصه‌های سیستم و پاسخ آن بدون نیاز به روابط دقیق ریاضی ارائه شده است. روش پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و مشاهده شده است که برنامه‌ریزی مشارکت واحدها بر مبنای منطق فازی یک جواب منطقی و ممکن ارائه داده است.

مدل فازی دیگری برای مسئله مشارکت واحدها در سال ۲۰۰۰ در مرجع [۲۹] ارائه شده است. در این مرجع عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی بار و قید ذخیره چرخان به صورت فازی در نظر گرفته شده است و از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله فازی مشارکت واحدها استفاده شده است.

در مرجع [۳۰] در سال ۲۰۰۲ مدل جدیدی از مسئله مشارکت واحدها به صورت فازی ارائه گردید که در این مرجع عدم قطعیت‌های قید ذخیره و پیش‌بینی بار سیستم به صورت فازی مدل شده است. الگوریتم ذوب فلزات (SA) برای حل مسئله مشارکت واحدها مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل برنامه‌ریزی پویا فازی در حل مسئله مشارکت واحدها در مرجع [۳۱] ارائه شده است. در مدل پیشنهادی این مقاله، خطای پیش‌بینی بار در چهارچوب مدل فازی در نظر گرفته شده است و سپس توسط روش برنامه‌ریزی پویا حل گردیده است.

در مرجع [۳۲] در سال ۲۰۰۴ یک روش بهینه‌سازی فازی برای حل مسئله مشارکت واحدهای حرارتی ارائه شده است. در این مقاله بار سیستم، نیازمندی به ذخیره و هزینه تولید بصورت مجموعه فازی در نظر گرفته شده است. روش حل مذکور در این مرجع با چندین روش دیگر مقایسه شده است.

در مرجع [۳۳] یک مدل فازی جامع برای حداکثر سازی یود شرکت‌های تولید در یک بازار رقابتی برق پیشنهاد شده است. عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده در این مرجع شامل بار، ذخیره چرخان و غیرچرخان، قیمت بازار و احتمال فراخوانی و تولید ذخیره‌ها می‌باشند. روش پیشنهاد شده در [۳۳] یک تابع هدف سود فازی را که منعکس کننده عدم قطعیت‌های بازار می‌باشد منعکس می‌کند.

بکارگیری الگوریتم ژنتیک و منطق فازی برای مدل‌سازی و حل مسئله مشارکت واحدهای حرارتی در مرجع [۳۵-۳۶] نیز یک مدل فازی برای مسئله مشارکت واحدها ارائه گردید که با استفاده از الگوریتم آهن گداخته به یافتن برنامه‌ریزی بهینه می‌پردازد.

یکی جامع‌ترین مراجع در زمینه مدل‌سازی فازی مسئله مشارکت واحدها مرجع [۳۷] می‌باشد. در این مرجع روابط فازی برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با استفاده از برنامه‌ریزی آمیخته خطی-عدد صحیح حل شده است. بکارگیری روابط فازی برای مفاهیم سیستم قدرت موجب انعطاف‌پذیر شدن مسئله و دست‌یابی به جواب‌های بهینه گشته است.

استفاده از مجموعه‌های فازی به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت بار و باد از نوآوری‌های این پروژه می‌باشد که بطور کامل در فصل ۳ توضیح داده شده است و نتایج شبیه‌سازی مربوطه نیز در فصل ۴ آورده شده است.

۲-۶- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا نحوه برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با حضور تولید توان بادی از گذشته تا به حال مورد بررسی قرار گرفت. بیان گردید روش‌های قطعی تعیین میزان ذخیره دارای معایبی نظیر افزایش هزینه بهره‌برداری و در نظر نگرفتن معیارهای قابلیت اطمینان سیستم می‌باشند. لذا امروزه در اکثر مقالات روش‌هایی که برمبنای

احتمال پیشامدها می‌باشد جهت تعیین میزان ذخیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مطالب بیان شده در این فصل، با افزایش مشارکت توان بادی در تأمین انرژی سیستم، نیاز بیشتری به فراهم کردن ذخیره جهت پوشش عدم قطعیت‌های نیروگاه بادی احساس می‌شود که استفاده از معیار امنیت تصادفی، ذخیره موردنیاز سیستم را به خوبی تخمین می‌زند. همچنین این روش علاوه بر برنامه‌ریزی اقتصادی بهره‌برداری از سیستم در حالت عادی، بهره‌برداری از سیستم در صورت وقوع سناریوهای محتمل را نیز از لحاظ اقتصادی بهینه می‌نماید. علاوه بر این، در این روش می‌توان حذف بار اجباری سیستم را نیز در برنامه‌ریزی در نظر گرفت. سپس اهمیت در نظر گرفتن انتشار آلاینده‌های تولیدی واحدهای حرارتی در حین برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم، به‌ویژه با حضور نیروگاه‌های بادی پرداخته شد. در انتهای فصل نیز توضیحاتی در مورد تئوری فازی، بهینه‌سازی فازی داده شد.

برنامه ریزی مشارکت واحدها با
مشارکت نیروگاه های بادی با معیار
امنیت تصادفی

فصل سوم: برنامه ریزی مشارکت واحدها با مشارکت نیروگاه های بادی با

معیار امنیت تصادفی

برنامه ریزی مشارکت واحدها با حضور نیروگاه های بادی با در نظر گرفتن تمامی قیود مربوط به واحدها و خطوط انتقال با معیار امنیت تصادفی در این فصل مورد بحث قرار گرفته است. در معیار ذخیره تصادفی تمامی حوادث ممکن و پیش رو در یک سیستم قدرت به همراه احتمال بروز آنها در تابع هدف گنجانده می شود. تغییرات غیرقابل پیش بینی در خروجی نیروگاه های بادی در اثر تغییرات ناگهانی باد نیز به عنوان نوعی از حوادث پیش بینی نشده سیستم در نظر گرفته می شود. مجموعه ای این تغییرات به صورت سناریوهای مختلف با میزان احتمال معین تعریف می شوند. میزان ذخیره مورد نیاز سیستم در طی برنامه ریزی و با توجه به این سناریوهای مختلف تولید توان بادی تعیین می شود.

۳-۱- برنامه ریزی در مدار قرار گرفتن واحدها با مشارکت نیروگاه های بادی با استفاده معیار امنیت

تصادفی

در این روش به منظور مدل سازی طبیعت اتفاقی تولید توان باد، از چارچوب برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای استفاده می شود و همچنین از یک روش تسویه بازار با در نظر گرفتن قیود شبکه استفاده شده است. ساختار مسئله برنامه نویسی تصادفی در دو مرحله بدین گونه توجیه می شود که بازارهای برق باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به توان باد تسویه شوند.

در این پروژه برای ارزیابی اثر رفتار اتفاقی توان باد، هیچ روند اتفاقی دیگر غیر از توان باد مانند عدم قطعیت پیش‌بینی بار و خراب شدن تجهیزات در نظر گرفته نمی‌شود. برای مدل کردن عدم قطعیت باد مجموعه‌ای از سناریوها که در آن حالت‌های محتمل وزش باد و در نتیجه مقادیر محتمل تولید توان بادی در هر ساعت لحاظ شده است، استفاده می‌شود. که نحوه مدلسازی این سناریوها در فصل دوم توضیح داده شده است. به‌منظور سادگی فرض می‌شود که نیروگاه بادی تنها در یک شین در شبکه قدرت مورد نظر قرار دارد. علاوه بر آن، تولید بادی به‌صورت یک فعالیت تنظیم شده در نظر گرفته شده است و تولیدکننده‌های بادی به‌عنوان یک عامل رقابتی در بازار در نظر گرفته نمی‌شود.

۳-۱-۲- متغیرهای برنامه‌ریزی تصادفی

متغیرهای این روش که باید در حین روند برنامه‌ریزی محاسبه شوند، به دو دسته تقسیم می‌شوند. متغیرهایی که به تحقق سناریو ویژه‌ای در هر دوره‌ی زمانی بستگی ندارند، به شرح زیر می‌باشد:

- (۱) برنامه راه‌اندازی و خاموشی هر یک از واحدهای تولیدی.
 - (۲) توان خروجی برنامه‌ریزی شده برای هر یک از واحدهای تولیدی.
 - (۳) ذخیره‌ی چرخان افزایشی و کاهشی برنامه‌ریزی شده برای هر واحد تولیدی.
 - (۴) ذخیره‌ی غیرچرخان برنامه‌ریزی شده برای ژنراتورهایی که در مدار نیستند.
- این متغیرها، متغیرهای مرحله‌ی اول نامیده می‌شوند و تصمیم‌گیری برای حالت عادی و اجرا^۱ را تشکیل می‌دهند، یعنی تصمیم‌گیری‌هایی که به روند تسویه بازار وابسته می‌باشند. این تصمیم‌ها قبل از تحقق سناریوها

^۱-Here-and-Now

گرفته می‌شوند. همچنین به این متغیرها، متغیرهای مرحله‌ی اول^۱ نیز گفته می‌شود. متغیرهای وابسته به هر سناریوها در هر دوره‌ی زمانی به صورت زیر می‌باشد:

(۱) تغییرات و تنظیمات در برنامه‌ریزی راه‌اندازی و خاموشی هر واحد تولیدی به منظور ممکن ساختن بکارگیری ذخیره‌ی غیرچرخان.

(۲) میزان استفاده از ذخیره‌ی چرخان افزایشی و کاهش‌ی در هر سناریو، مرتبط با هر واحد تولیدی که دارای ذخیره‌ی چرخان برنامه‌ریزی شده می‌باشد.

(۳) استفاده از ذخیره‌ی غیرچرخان واحدهای که دارای این نوع ذخیره‌ی برنامه‌ریزی شده می‌باشند.

(۴) حذف بار اجباری هر مصرف‌کننده.

(۵) ریزش توان باد.

(۶) متغیرهای مرتبط با شبکه مثل زاویه‌ی هر شین، تلفات در هر خط، توان عبوری در هر خط و تزریق توان در هر شین (مصارف و تولیدات توان حقیقی)

این متغیرها که به سناریوی خاصی بستگی دارند و به بهره‌برداری از سیستم قدرت مرتبط می‌باشند، متغیرهای مرحله دوم^۲ نامیده می‌شوند. هر یک از این متغیرهای مرحله‌ی دوم، برای هر سناریو در طی روند برنامه‌ریزی باید محاسبه شوند.

۳-۱-۳- ساختار برنامه‌ریزی تصادفی

در مدل ارائه شده برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای، ۴ بخش متمایز وجود دارد: کمینه‌سازی تابع هدف بخش (۳-۱-۴) که هزینه‌های وابسته به بازار برق و هزینه‌هایی که در حین بهره‌برداری واقعی از سیستم قدرت تحمیل می‌شود را به صورت دو گروه مجزا لحاظ می‌کند. همچنین سه مجموعه از قیود که شامل موارد زیر

^۱-First Stage Variables

^۲-Second Stage Variables

می‌باشد: قیودی که بازار و قواعد آنرا مدل می‌کند (بخش ۳-۴-۱-۲)، قیودی که بهره‌برداری واقعی از سیستم قدرت (روند تصادفی باد) را مدل می‌کند (بخش ۳-۴-۱-۳) و در نهایت، قیود مرتبط کننده (بخش ۳-۴-۱-۴)، که تصمیمات بازار برق را به بهره‌برداری واقعی از سیستم قدرت از طریق بکارگیری ذخیره‌های تأمین شده توسط واحدها، مرتبط می‌سازد. مدل بدست آمده به‌عنوان یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی آمیخته خطی و عدد صحیح فرمول‌نویسی شده است. روندنمای این برنامه‌ریزی در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.

۳-۱-۴- روابط برنامه‌ریزی تصادفی

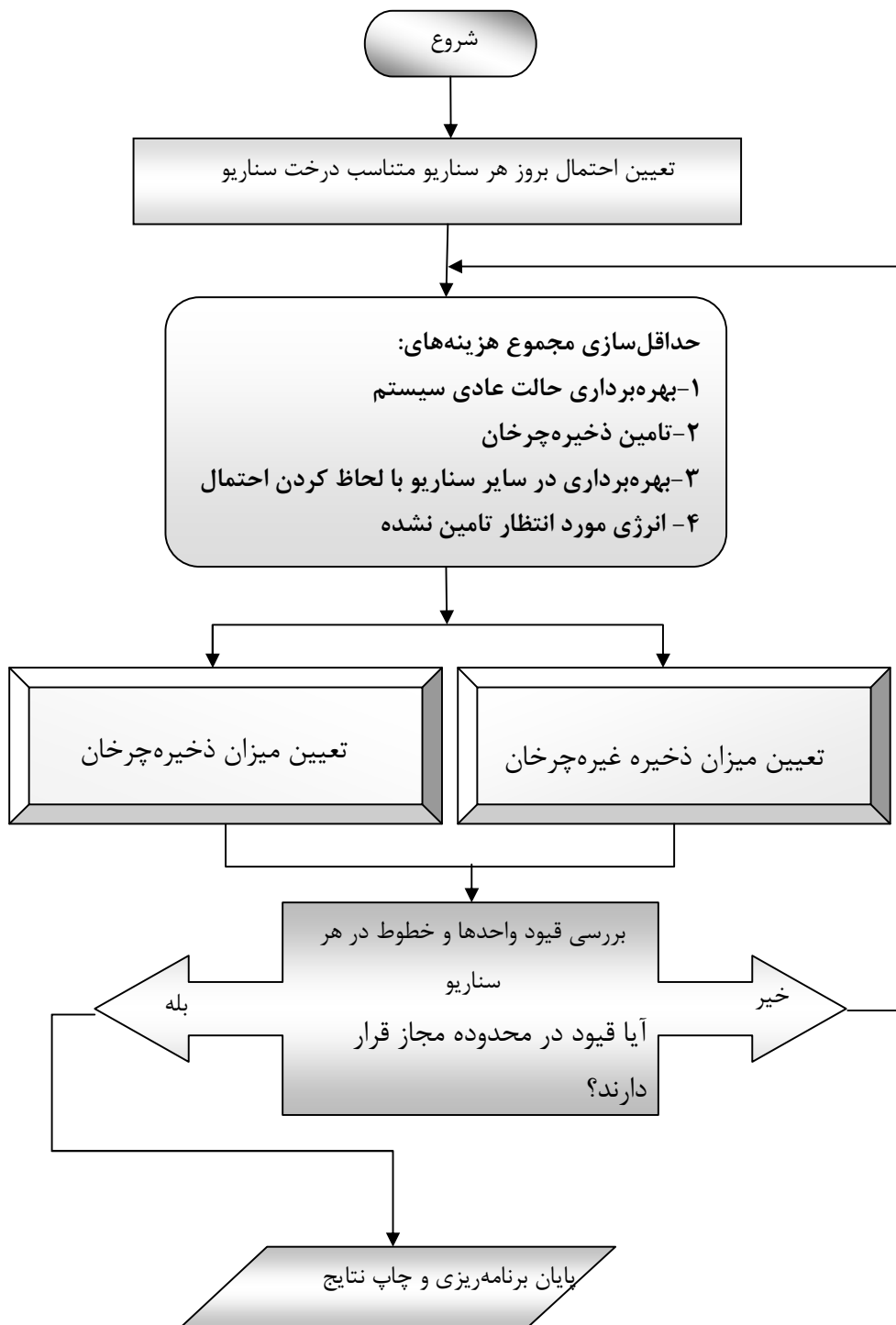
در این بخش ابتدا به تعریف تابع هدف و سپس قیودهای برنامه‌ریزی تصادفی می‌پردازیم.

۳-۱-۴-۱- تابع هدف

تابع هدف زیر هزینه مورد انتظار^۱ (EC) می‌باشد که باید در طی برنامه‌ریزی کمینه شود:

که EC_t هزینه‌ی موردانتظار سیستم در دوره‌ی t می‌باشد و $C_{it}^{R^U}$ و $C_{it}^{R^D}$ و $C_{it}^{R^{NS}}$ به ترتیب قیمت پیشنهادی ذخیره‌ی چرخان افزایشی، کاهش‌ی و غیرچرخان واحد i در دوره‌ی زمانی t می‌باشند. همچنین π_ω احتمال بروز سناریو ω و d_t طول هر دوره‌ی زمانی t در محدوده‌ی برنامه‌ریزی می‌باشد. تابع هدف بالا شامل ۷ عامل زیر می‌باشد: [از خط ۲ تا خط ۷ معادله (۳-۱)]

^۱- Expected Cost



شکل ۳-۱- روندنمای مدل برنامه ریزی تصادفی

(۱) هزینه‌ی راه‌اندازی واحدهای تولیدی؛

(۲) هزینه‌ی تولید توان واحدهای تولیدی منهای پرداختی بارها؛

(۳) هزینه‌ی ذخیره‌ی چرخان افزایشی و کاهشی و ذخیره‌ی غیرچرخان واحدهای تولیدی؛

(۴) هزینه‌ی پیشنهادی تولید بادی، در صورت نظر گرفته شدن؛

(۵) هزینه‌ی ناشی از تغییرات در برنامه راه‌اندازی و خاموشی واحدهای تولیدی در سناریوها؛

(۶) هزینه‌ی مرتبط با استفاده واقعی ذخیره‌ی چرخان افزایشی و کاهشی و ذخیره‌ی غیرچرخان واحدهای

تولیدی در سناریوها؛

(۷) هزینه حذف بار اجباری و ریزش باد؛

$$\begin{aligned}
 EC &= \sum_{t=1}^{N_T} EC_t \\
 &= \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} C_{it}^{SU} \\
 &+ \sum_{t=1}^{N_T} d_t \left[\sum_{i=1}^{N_G} \sum_{m=1}^{NO_{it}} \lambda_{G_{it}}(m) p_{G_{it}}(m) - \sum_{j=1}^{N_L} \lambda_{L_{jt}} L_{jt}^S \right. \\
 &+ \sum_{i=1}^{N_G} \left(C_{it}^{RU} R_{it}^U + C_{it}^{RD} R_{it}^D + C_{it}^{RNS} R_{it}^{NS} \right) \\
 &+ \left. \lambda_t^{WP} P_t^{WP,S} \right] \\
 &+ \sum_{\omega=1}^{N_W} \pi_{\omega} \left\{ \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} C_{it\omega}^A \right. \\
 &+ \sum_{t=1}^{N_T} d_t \left[\sum_{i=1}^{N_G} \sum_{m=1}^{NO_{it}} \lambda_{G_{it}}(m) r_{G_{it\omega}}(m) \right. \\
 &+ \left. \left. \sum_{j=1}^{N_L} V_{jt}^{LOL} L_{jt\omega}^{shed} + V_t^S S_{t\omega} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{۱-۳}$$

همانطور که تاکنون بیان شد، فرض می‌کنیم که تولیدکننده‌های بادی عناصر رقابتی نمی‌باشند، در نتیجه

پیشنهاد قیمتی در بازار ارائه نمی‌دهند ($\lambda_t^{WP} = 0$).

(۱) توازن توان:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{it}^S + P_t^{WP,S} = \sum_{j=1}^{N_L} L_{jt}^S, \forall t. \quad (۲-۳)$$

رابطه (۲-۳) بیانگر قید تعادل توان در سطح شبکه می‌باشد. قیود شبکه در مرحله‌ی اول (بیان بازار) مدنظر قرار نگرفته‌اند. بنابراین مدل بازار تا حد ممکن ساده می‌باشد. هر مدل دیگری از بازار نیز می‌تواند در این چارچوب بکار رود. در نتیجه قیود شبکه (و تقریب خطی از تلفات) تنها بر مرحله‌ی دوم که بهره‌برداری واقعی از سیستم قدرت می‌باشد، در نظر گرفته می‌شوند.

(۲) محدودیت‌های تولید:

$$P_i^{\min} u_{it} \leq P_{it}^S \leq P_i^{\max} u_{it}, \forall i, \forall t. \quad (۳-۳)$$

$$0 \leq P_{G_{it}}(m) \leq P_{G_{it}}^{\max}(m), \forall m, \forall i, \forall t. \quad (۴-۳)$$

$$P_{it}^S = \sum_{m=1}^{N_{G_{it}}} P_{G_{it}}(m), \forall i, \forall t. \quad (۵-۳)$$

معادله‌ی (۵-۳) تابع قیمت پیشنهادی انرژی واحدهای تولیدی را توسط بلوک‌های انرژی تقریب می‌زند. در این روش تابع هزینه‌ی تولید انرژی ارائه شده از طرف ژنراتورها به صورت بلوک‌های انرژی فرض شده‌اند. شایان ذکر است صورت‌های دیگر تابع هزینه تولید انرژی ژنراتورها مانند (تابع هزینه‌ی درجه‌ی دوم) به سادگی در روش موردنظر قابل پیاده‌سازی می‌باشد.

(۳) محدودیت‌های تولید باد:

$$P_t^{WP,\min} \leq P_t^{WP,S} \leq P_t^{WP,\max}, \forall t. \quad (۶-۳)$$

که پارامترهای ارائه شده به عنوان بخشی از پیشنهاد انرژی تولیدکننده بادی می‌باشند. که

در این روش به صورت $P_t^{WP,\min} = 0$ و $P_t^{WP,\max} \rightarrow \infty$ در نظر گرفته شده‌اند.

(۴) محدودیت‌های بار:

$$L_{jt}^{S,\min} \leq L_{jt}^S \leq L_{jt}^{S,\max}, \forall j, \forall t. \quad (۷-۳)$$

بار ثابت (غیر قابل تغییر) دو قید برابر می‌باشند، $L_{jt}^{S,\min} = L_{jt}^S = L_{jt}^{S,\max}$ پارامترهایی هستند که به‌عنوان بخشی از پیشنهاد خرید سمت بار ارائه می‌شوند. در موارد

$$.L_{jt}^{S,\min} = L_{jt}^S = L_{jt}^{S,\max}.$$

(۵) قیود تعیین ذخیره‌ی برنامه‌ریزی شده:

چرخان:

$$0 \leq R_{it}^U \leq R_{it}^{U,\max} u_{it}, \forall i, \forall t. \quad (۸-۳)$$

$$0 \leq R_{it}^D \leq R_{it}^{D,\max} u_{it}, \forall i, \forall t. \quad (۹-۳)$$

رابطه (۸-۳) و (۹-۳) به ترتیب بیانگر حد بالا و پایین ذخیره‌های چرخان افزایشی و کاهش می‌باشد.

غیر چرخان:

$$0 \leq R_{it}^{NS} \leq R_{it}^{NS,\max} (1 - u_{it}), \forall i, \forall t. \quad (۱۰-۳)$$

رابطه (۱۰-۳) نشان دهنده محدودده مجاز برای ذخیره غیر چرخان هر واحد می‌باشد. این مقادیر بیشینه، از

سمت واحدهای تولیدی ارایه می‌شود.

(۶) هزینه‌ی راه‌اندازی:

$$C_{it}^{SU} \geq \lambda_{it}^{SU} (u_{it} - u_{i,t-1}), \forall i, \forall t. \quad (۱۱-۳)$$

$$C_{it}^{SU} \geq 0, \forall i, \forall t \quad (۱۲-۳)$$

قیود (۱۱-۳) و (۱۲-۳) نشان دهنده اعمال هزینه راه‌اندازی در هر ساعت می‌باشند.

۳-۴-۱-۳- قیدهای بهره‌برداری مرتبط با برنامه‌ریزی در هر سناریو

این بخش از روابط شامل بهره‌برداری واقعی از سیستم (متغیرهای مرحله دوم) می‌باشد. متغیر باینری $v_{it\omega}$

حالت روشن و خاموش بودن واحدها در هر سناریو را بیان می‌کند.

(۱) قیود تعادل توان:

الف) تعادل توان در هر گره n (به غیر از گره n' که در آن توان بادی تزریق می‌شود):

$$\sum_{i:(i,n) \in M_G} P_{it\omega}^G - \sum_{j:(j,n) \in M_L} (L_{jt}^S - L_{jt\omega}^{shed}) - \sum_{r:(n,r) \in \Lambda} f_{t\omega}(n,r) = 0, \forall n \neq n', \forall t, \forall \omega. \quad (13-3)$$

که M_L و M_G به ترتیب مجموعه‌ی ژنراتورها و بارهای واقع در شین n می‌باشد.

ب) تعادل توان در گره n' که در آن توان بادی تزریق می‌شود:

$$\sum_{i:(i,n) \in M_G} P_{it\omega}^G - \sum_{j:(j,n) \in M_L} (L_{jt}^S - L_{jt\omega}^{shed}) + P_{it\omega}^{WP} - S_{t\omega} - \sum_{r:(n,r) \in \Lambda} f_{t\omega}(n,r) = 0, n = n', \forall t, \forall \omega. \quad (14-3)$$

که M_L و M_G به ترتیب مجموعه‌ی ژنراتورها و بارهای واقع در شین n' می‌باشد.

ج) توان عبوری از خط (n,r) ، از گره n به گره r :

$$f_{t\omega}(n,r) = \frac{P_{t\omega}^{loss}(n,r)}{2} + B(n,r)(\delta_{n\omega} - \delta_{r\omega}), \forall (n,r) \in \Lambda, \forall t, \forall \omega. \quad (15-3)$$

(۲) محدودیت‌های تولید:

$$P_{it\omega}^G \geq P_i^{\min} v_{it\omega}, \forall i, \forall t, \forall \omega. \quad (16-3)$$

$$P_{it\omega}^G \leq P_i^{\max} v_{it\omega}, \forall i, \forall t, \forall \omega. \quad (17-3)$$

(۳) قید ظرفیت خطوط انتقال:

$$-f^{\max}(n,r) \leq f_{t\omega}(n,r) \leq f^{\max}(n,r), \forall (n,r) \in \Lambda, \forall t, \forall \omega. \quad (18-3)$$

مثبت و منفی بودن توان عبوری از خطوط به جهت‌های مختلف توان عبوری از یک خط و مرتبط می‌باشد.

(۴) قید حذف بار اجباری:

$$0 \leq L_{jt\omega}^{shed} \leq L_{jt}^S, \forall j, \forall t, \forall \omega. \quad (19-3)$$

(۵) محدودیت‌های ریزش تولید توان باد:

$$0 \leq S_{it\omega} \leq P_{it\omega}^{WP}, \forall t, \forall \omega. \quad (20-3)$$

۳-۱-۴-۴- قیدهای ارتباطی بین برنامه‌ریزی سناریوها و حالت عادی

(۱) جداسازی خروجی‌های توان ژنراتورها :

$$P_{it\omega}^G = P_{it}^S + r_{it\omega}^U + r_{it\omega}^{NS} - r_{it\omega}^D, \forall i, \forall t, \forall \omega. \quad (21-3)$$

(۲) قیدهای ذخیره بکار رفته :

چرخان:

$$0 \leq r_{it\omega}^U \leq R_{it}^U, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (22-3)$$

$$0 \leq r_{it\omega}^D \leq R_{it}^D, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (23-3)$$

غیر چرخان:

$$0 \leq r_{it\omega}^{NS} \leq R_{it}^{NS}, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (24-3)$$

رابطه‌های (۲۲-۳) تا (۲۴-۳) بیان می‌دارند که در هر سناریو، مقدار ذخیره مورد استفاده از هر ژنراتور باید

کمتر از مقدار ذخیره‌ی برنامه‌ریزی شده برای آن ژنراتور در بازار باشد.

(۳) تجزیه‌ی ذخیره‌های بکار رفته سمت ژنراتورها در بلوک‌ها:

$$r_{it\omega}^U + r_{it\omega}^{NS} - r_{it\omega}^D = \sum_{m=1}^{N_{Oit}} r_{Git\omega}(m), \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (25-3)$$

$$r_{Git\omega}(m) \leq P_{Git}^{\max}(m) - P_{Git}(m), \forall m, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (26-3)$$

$$r_{Git\omega}(m) \geq -P_{Git}(m), \forall m, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (27-3)$$

رابطه‌ی (۲۵-۳) همانند رابطه‌ی (۲۱-۳) می‌باشد و جداسازی ذخیره‌های چرخان کاهش، افزایشی و غیر

چرخان را بیان می‌دارد. بنابراین، هزینه‌ی بکارگیری ذخیره هر واحد برای هر دوره‌ی زمانی t و سناریو ω برابر با

$$\sum_{m=1}^{N_{Oit}} \lambda_{Git}(m) r_{Git\omega}(m) \quad (\text{که در تابع هدف بیان شده می‌باشد}).$$

(۵) تنظیمات هزینه‌ی راه‌اندازی مرحله دوم:

$$C_{it\omega}^A = C_{it\omega}^{SU} - C_{it}^{SU}, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (28-3)$$

$$C_{it\omega}^{SU} \geq \lambda_{it}^{SU} (v_{it\omega} - v_{i,t-1,\omega}), \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (29-3)$$

$$C_{it\omega}^{SU} \geq 0, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (30-3)$$

شایان ذکر است که متغیر $C_{it\omega}^{SU}$ هزینه‌ی راه‌اندازی واحد تولیدی i که در طول بهره‌برداری واقعی از سیستم قدرت در دوره‌ی زمانی t و وقوع سناریو ω به سیستم تحمیل می‌شود، می‌باشد. بنابراین چنانچه وضعیت در مدار بودن واحد i در دوره‌ی زمانی t همانند وضعیت برنامه‌ریزی شده در بازار باشد، $C_{it\omega}^A$ صفر خواهد بود. اگر واحد i بر خلاف آنچه در بازار تنظیم شده، به اجبار شروع به کار کند، مقدار $C_{it\omega}^A$ مثبت خواهد بود. از مزایای مهم روش برنامه‌ریزی با معیار امنیت تصادفی، برنامه‌ریزی با هدف کمینه کردن هزینه‌ی بهره‌برداری در حالت عادی و تمامی سناریوها می‌باشد. بنابراین چنانچه هر یک از حالت‌های محتمل باد رخ دهد، تولید واحدها و ذخیره‌ی مورد استفاده در این حالت نیز به‌صورت اقتصادی‌ترین حالت ممکن خواهد بود [۲۵].

۳-۲- برنامه‌ریزی واحدهای حرارتی-بادی با در نظر گرفتن انتشار آلاینده‌ها در برنامه‌ریزی

گرمتر شدن کره زمین توسط خود بشر یک حقیقت نامطلوب برای همه جوامع بشری محسوب می‌شود. چرخ‌های صنعت امروزی بر پایه انرژی‌هایی می‌گردند که از سوزاندن سوخت‌های فسیلی ایجاد می‌شود و منجر به انتشار آلاینده‌ها (دی اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن) در اتمسفر می‌شود. این عوامل منجر به تغییر وضعیت آب و هوایی و گرمتر شدن غیر عادی جو شده است. برای پیشگیری از این فاجعه خطرناک برای کره زمین و نژاد بشر باید برنامه کاهش انتشار آلاینده‌های جو را به طور جدی هر چه زودتر آغاز نمود. در این میان تولید انرژی الکتریکی مسبب ایجاد در حدود ۲۴٪ از گازهای گلخانه‌ای آلاینده می‌باشد.

پیش‌بینی می‌شود که مصرف انرژی الکتریکی از ۱۸ تریلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۰۶ به ۳۲ تریلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید، یعنی ۷۷٪ رشد در مصرف انرژی الکتریکی [۳۸]. این بدان معناست

که ۴۸۰۰ GW ظرفیت جدید نیروگاهی باید احداث گردد. کاهش مؤثر در انتشار آلاینده‌های کربنی بدون مشارکت بخش الکتریکی امکان پذیر نخواهد بود. لذا یک تغییر اساسی در شیوه فعلی تولید، انتقال و مصرف انرژی الکتریکی باید صورت پذیرد تا صنعت تولید برق کربن زدایی گردد. تولید توان الکتریکی نیازمند یک جهش بزرگ از دو سمت فن‌آوری و سوخت مصرفی می‌باشد. برای مثال باید نیروگاه‌های مصرف کننده سوخت-های فسیلی کاهش داده شوند و از سوی دیگر مشارکت نیروگاه‌های هسته‌ای و انرژی‌های تجدید پذیر افزایش یابد.

در سال‌های اخیر توجه و علاقه به کاهش انتشار آلاینده‌های هوای واحدهای صنعتی شامل نیروگاه‌ها رو به افزایش است. بنابراین در نظر گرفتن کاهش میزان تولید آلوده‌کننده‌های هوای واحدهای حرارتی در طی برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم، باعث کارآمدتر شدن برنامه‌ریزی خواهد شد. در این پروژه دو مدل به‌منظور در نظر گرفتن انتشار آلاینده‌های هوای واحدهای حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل اول در نظر گرفتن میزان آلوده‌کننده‌ها به‌صورت محدودیت بیشینه میزان آلودگی مجاز می‌باشد. در روش دوم که روشی کارآمد می‌باشد و به‌عنوان نوآوری این پروژه انجام شده است، بر مبنای در نظر گرفتن دو تابع هدف هزینه و انتشار آلاینده‌های هوا به‌طور همزمان و استفاده از یک روش بهینه‌سازی چندمنظوره^۱ با هدف کمینه‌سازی دو تابع هدف می‌باشد. در ادامه‌ی این فصل به توضیح این چند روش پرداخته شده است.

۱-۲-۳- برنامه‌ریزی ذخیره‌ی سیستم در حضور نیروگاه‌های بادی و با لحاظ کردن محدودیت انتشار آلاینده‌ها

این مدل همانند مدل ارایه شده در بخش ۱-۳ که همان برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن آلودگی می‌باشد، است. با این تفاوت که قید بیشینه انتشار آلاینده‌های مجاز واحدها نیز در برنامه‌ریزی لحاظ شده است. تابع هدف در این مدل همان تابع هدف بخش ۱-۳-۱-۴ می‌باشد. از مهمترین آلوده‌کننده‌های هوای تولید شده

^۱-Multiobjective Optimization Approach

توسط واحدهای حرارتی SO_x و NO_x می‌باشند. به‌منظور تخمین این آلوده‌کننده‌های هوای تولید شده توسط واحد i در بازه‌ی زمانی t از رابطه‌ی (۳۱-۳) استفاده می‌شود.

$$E_{i,t}(P_{it}^S) = d_i[\alpha_i + \beta_i P_{it}^S + \gamma_i P_{it}^{S^2} + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{it}^S)]u_{it} \quad (31-3)$$

$E_{i,t}(P_{it}^S)$ میزان آلوده‌کننده هوا تولیدی توسط واحد i در بازه‌ی زمانی t می‌باشد. همچنین α_i ، β_i ، γ_i ، ζ_i و λ_i ضرایب تابع آلوده‌کنندگی هوا توسط واحد i و d_i طول بازه‌ی زمانی t می‌باشد. در این مدل قید زیر به برنامه‌ریزی واحدها با معیار امنیت تصادفی بادر نظر گرفتن آلاینده‌ی اضافه خواهد شد [۳۹].

$$\sum_{t=1}^T E_{i,t}(P_{it}^S) \leq E_i^{target}, \forall i. \quad (32-3)$$

که در آن E_i^{target} حد مجاز آلودگی تولیدی واحد i در طی بازه‌ی موردنظر می‌باشد. بازه‌ی در نظر گرفتن قید آلودگی در عمل به‌صورت هفتگی و یا ماهانه می‌باشد. سایر قیود همانند مدل بخش ۱-۳ خواهد بود و همچنین فرضیات مطرح شده در بخش ۱-۳، در اینجا نیز برقرار می‌باشد.

۳-۲-۲- برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با استفاده از روش بهینه‌سازی چندمنظوره

برنامه‌ریزی سیستم در این مدل شامل کمینه کردن دو تابع هدف، هزینه‌ی بهره‌برداری سیستم و انتشار آلاینده‌های هوا تولیدی واحدها در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی، می‌باشد. تابع هدف اول همان تابع هدف بخش ۱-۳ می‌باشد که شامل هزینه‌های بهره‌برداری سیستم است. تابع هدف دوم شامل میزان انتشار آلاینده‌ها توسط واحدهای تولیدی در طی بازه‌ی برنامه‌ریزی می‌باشد. این آلودگی شامل اکسید نیتروژن و اکسید سولفوری است که از بهره‌برداری واحدهای حرارتی با سوخت فسیلی ایجاد می‌شود. بنابراین تابع‌های هدف در این روش به‌صورت زیر خواهند بود:

الف) تابع هدف اول: هزینه‌های بهره‌برداری سیستم در بازه‌ی زمانی برنامه‌ریزی

همانطور که در رابطه (۳۴-۳) دیده می‌شود، در این تابع هدف هزینه‌ی پیشنهادی انرژی از سمت ژنراتورها به‌صورت تابع درجه‌ی دوم در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن تابع هزینه‌ی پیشنهاد انرژی به‌صورت تابع

درجه‌ی دوم، اندکی در مدل تغییر ایجاد خواهد کرد. از جمله‌ی این تغییرات که در تابع هدف لحاظ می‌شود، تغییر در نحوه‌ی محاسبه‌ی هزینه‌ی تولید در هر سناریو می‌باشد. در این مدل برخلاف روش ارایه شده در بخش ۱-۳ هزینه‌ی تولید توان هر واحد در هر سناریو در تابع هدف لحاظ می‌شود. این در حالی است که در مدل بخش ۱-۳ تنها هزینه‌ی ذخیره‌ی مورد استفاده در هر سناریو در تابع هدف لحاظ می‌شد که این امر به‌خاطر نحوه‌ی در نظر گرفتن تابع پیشنهاد هزینه‌ی انرژی واحدها می‌باشد. در واقع در نظر گرفتن تابع هزینه‌ی پیشنهاد انرژی به‌صورت بلوک انرژی امکان این نحوه در نظر گرفتن را فراهم کرده است. مدل ارایه شده در مرجع [۲۳] نیز هزینه‌ی تأمین انرژی در هر سناریو را در برنامه‌ریزی تصادفی در نظر می‌گیرد. همچنین با در نظر این مدل تغییراتی در قیدها مسئله حاصل خواهد شد که به نوبه‌ی خود در این بخش مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

$$\begin{aligned}
 EC &= \sum_{t=1}^{N_T} EC_t \\
 &= \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} C_{it}^{SU} \\
 &+ \sum_{t=1}^{N_T} d_t \left[\sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{it}^{S^2} + b_i P_{it}^S + c_i) - \sum_{j=1}^{N_L} \lambda_{Ljt} L_{jt}^S \right. \\
 &+ \sum_{i=1}^{N_G} (C_{it}^{RU} R_{it}^U + C_{it}^{RD} R_{it}^D + C_{it}^{RNS} R_{it}^{NS}) \\
 &+ \lambda_t^{WP} P_t^{WP,S} \left. \right] \\
 &+ \sum_{\omega=1}^{N_W} \pi_{\omega} \left\{ \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} C_{it\omega}^A \right. \\
 &+ \sum_{t=1}^{N_T} d_t \left[\sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{Git\omega}^2 + b_i P_{Git\omega} + c_i) \right. \\
 &+ \left. \left. \sum_{j=1}^{N_L} V_{jt}^{LOL} L_{jt\omega}^{shed} + V_t^S S_{t\omega} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{۳۳-۳}$$

تابع هزینه ژنراتورها در رابطه (۳۳-۳) به صورت تابع درجه دو می‌باشد. لذا برای استفاده از برنامه‌ریزی خطی-عدد صحیح (MILP) می‌بایست این توابع غیر خطی را با تقریب مناسبی به صورت خطی مدل کرد. در این پایان‌نامه از روش تکه‌ای-خطی برای مدل کردن توابع هزینه درجه دو ژنراتورها استفاده شده است. نتایج

خطی سازی نشان با تقریب ۱۰ تکه‌ای از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. جزئیات روش خطی‌سازی استفاده شده در این پروژه در پیوست مرجع [۵۳] آورده شده است.

(ب) تابع هدف دوم: آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی در بازه‌ی زمانی برنامه‌ریزی [۳۶]

$$F^{Emission} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NG} E_{i,t}(P_{it}^S) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NG} d_t [\alpha_i + \beta_i P_{it}^S + \gamma_i P_{it}^{S^2} + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{it}^S)] u_{it} \quad (۳۴-۳)$$

قیدها و فرض‌های این مدل نیز همانند قیدها و فرض‌های مطرح شده در بخش ۱-۳ می‌باشد.

(ج) قیدهای مدل پیشنهادی

در این مدل تمامی قیدهای بخش ۱-۳-۴-۲ که قیدهای وابسته به بازار برق و شامل متغیرهای مرحله‌ی اول می‌باشند، بجز قیدهای (۳-۴) و (۳-۵) بدون تغییر باقی می‌ماند. با توجه به نحوه در نظر گرفتن تابع پیشنهاد هزینه‌ی انرژی درجه‌ی دوم، در نظر گرفتن این دو قید ضروری به نظر نمی‌رسد چرا که این قیود مرتبط با تابع پیشنهاد هزینه‌ی انرژی به صورت بلوک‌های انرژی می‌باشند. قیدهای بخش ۱-۳-۴-۳ که قیدهای وابسته به بهره‌برداری از سیستم و شامل متغیرهای مرحله‌ی دوم (وابسته به سناریو ω) هستند، در این مدل بدون تغییر در نظر گرفته می‌شوند.

قیدهای بخش ۱-۳-۴-۴ که قیدهای هستند که بازار و بهره‌برداری از سیستم را به هم مربوط می‌سازد، به صورت زیر تغییر خواهند کرد:

(۱) قیدهای مشخص کننده‌ی میزان ذخیره‌های مورد نیاز سیستم:

$$R_{it}^U + R_{it}^{NS} \geq P_{it}^S - P_{Git\omega}, \quad \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (۳۵-۳)$$

$$R_{it}^D \geq P_{Git\omega} - P_{it}^S, \quad \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (۳۶-۳)$$

روابط (۳۵-۳) و (۳۶-۳) از لحاظ مفهوم مشابه رابطه (۳-۲۱) و (۳-۲۵) می‌باشند با این تفاوت که این روابط مطابق معادلات مرجع [۲۳] که توسط آقای Bouffard ارائه شده می‌باشند. تفسیر این روابط بدین شرح می‌باشد: میزان ذخیره چرخان افزایشی سیستم که باید توسط هر واحد تامین شود برابر با میزان افزایش تولید آن

واحد در سناریوهای تغییر باد می‌باشد. همچنین میزان مطلوب ذخیره چرخان کاهشی هر واحد برابر با کاهش توان خروجی هر واحد نسبت به حالت معمول سیستم خواهد بود. علت تغییر در روابط ذخیره نسبت به روابط مقاله مرجع را می‌توان به کارایی بهتر روش مقاله [۲۳] در حضور انتشار آلاینده‌ها دانست.

(۲) قیدهای مرتبط با هزینه‌ی راه‌اندازی:

$$C_{it\omega}^A = C_{it\omega}^{SU} - C_{it}^{SU}, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (37-3)$$

$$C_{it\omega}^{SU} \geq \lambda_{it}^{SU} (v_{it\omega} - v_{i,t-1,\omega}), \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (38-3)$$

$$C_{it\omega}^{SU} \geq 0, \forall i, \forall t, \forall \omega \quad (39-3)$$

سه رابطه‌ی (۳۷-۳)-(۳۹-۳) همانند رابطه‌های (۲۸-۳)-(۳۰-۳) می‌باشد.

۳-۲-۱-مدل بهینه‌سازی چندمنظوره

پرواضح است که در برنامه‌ریزی چندمنظوره، بیشتر از یک تابع هدف در برنامه‌ریزی مدنظر می‌باشد. همچنین نمی‌توان یک جواب بهینه‌ی یکتا که همه‌ی تابع هدف‌ها را به‌طور هم‌زمان بهینه می‌کند، بدست آورد. بلکه یک دسته جواب در نتیجه حل حاصل خواهد شد. بنابراین در روش بهینه‌سازی چندمنظوره به‌دنبال بهترین جواب در بین دسته جواب‌های حاصل می‌باشیم. روش بهینه‌سازی چندمنظوره‌ای که در این پروژه برای کمینه کردن دو تابع هدف موردنظر استفاده می‌شود، روش محدودیت ϵ ^۱ نامیده می‌شود [۵۱]. در اینجا در ابتدا به توضیح این روش می‌پردازیم و سپس کاربرد این روش در مسئله‌ی برنامه‌ریزی واحدها با دو تابع هدف مطرح شده موردبررسی قرار خواهد گرفت.

الف) روش محدودیت ϵ

به منظور استفاده از این روش، باید محدوده‌ی تغییرات حداقل $p-1$ تابع هدف مشخص باشد (با این فرض که برنامه‌ریزی شامل p تابع هدف است). محاسبه این محدوده، کار به نسبت سختی می‌باشد، زیرا محاسبه

^۱- ϵ -Constraint Method

مقدار بهترین به سادگی از روی مقدار بهینه‌ی هر تابع هدف قابل محاسبه می‌باشد، اما بدترین مقدار هر تابع هدف به راحتی قابل محاسبه نیست. معمول‌ترین روش برای محاسبه‌ی این محدوده استفاده از جدول نتایج^۱ می‌باشد. این جدول از محاسبه‌ی مقادیر بهینه‌ی تنهای p تابع هدف حاصل می‌شود. بدترین مقدار هر تابع هدف از بیشترین مقدار هر ستون جدول نتایج تخمین زده می‌شود.

برای محاسبه‌ی جدول نتایج بهینه‌سازی با p تابع هدف، ابتدا مقدار بهینه هر تابع هدف محاسبه شده و سپس با استفاده از جواب بهینه‌ی تابع هدف F_i (F_i^* بیانگر جواب بهینه‌ی منفرد تابع هدف F_i می‌باشد)، مقدار سایر تابع هدفها $(F_1, \dots, F_{i-1}, F_{i+1}, \dots, F_p)$ محاسبه می‌شود $(F_1^i, \dots, F_{i-1}^i, F_{i+1}^i, \dots, F_p^i)$. بنابراین سطر i ام جدول نتایج به صورت $(F_1^i, \dots, F_{i-1}^i, F_i^*, F_{i+1}^i, \dots, F_p^i)$ خواهد بود. بدین ترتیب تمامی سطرهای جدول نتایج تکمیل خواهند شد. در نتیجه ستون j ام جدول نتایج شامل مقادیر حاصله برای تابع هدف F_j می‌باشد، که در بین آنها بیشترین و کمترین مقادیر بیانگر حدهای بالا و پائین تابع هدف F_j در روش محدودیت ε می‌باشد [۳۹-۴۰]. پس از محاسبه‌ی محدوده‌ی هر تابع هدف، در روش بهینه‌سازی چندمنظوره به صورت زیر عمل خواهد شد (در اینجا فرض شده است که هدف کمینه‌سازی تابع هدفها می‌باشد):

$$\text{Min}(F_1(x) - \delta \times (\frac{S_2}{r_2} + \frac{S_3}{r_3} + \dots + \frac{S_p}{r_p}))$$

St.

$$F_2(x) + S_2 = \varepsilon_2$$

$$F_3(x) + S_3 = \varepsilon_3$$

...

$$F_p(x) + S_p = \varepsilon_p$$

(۴۰-۳)

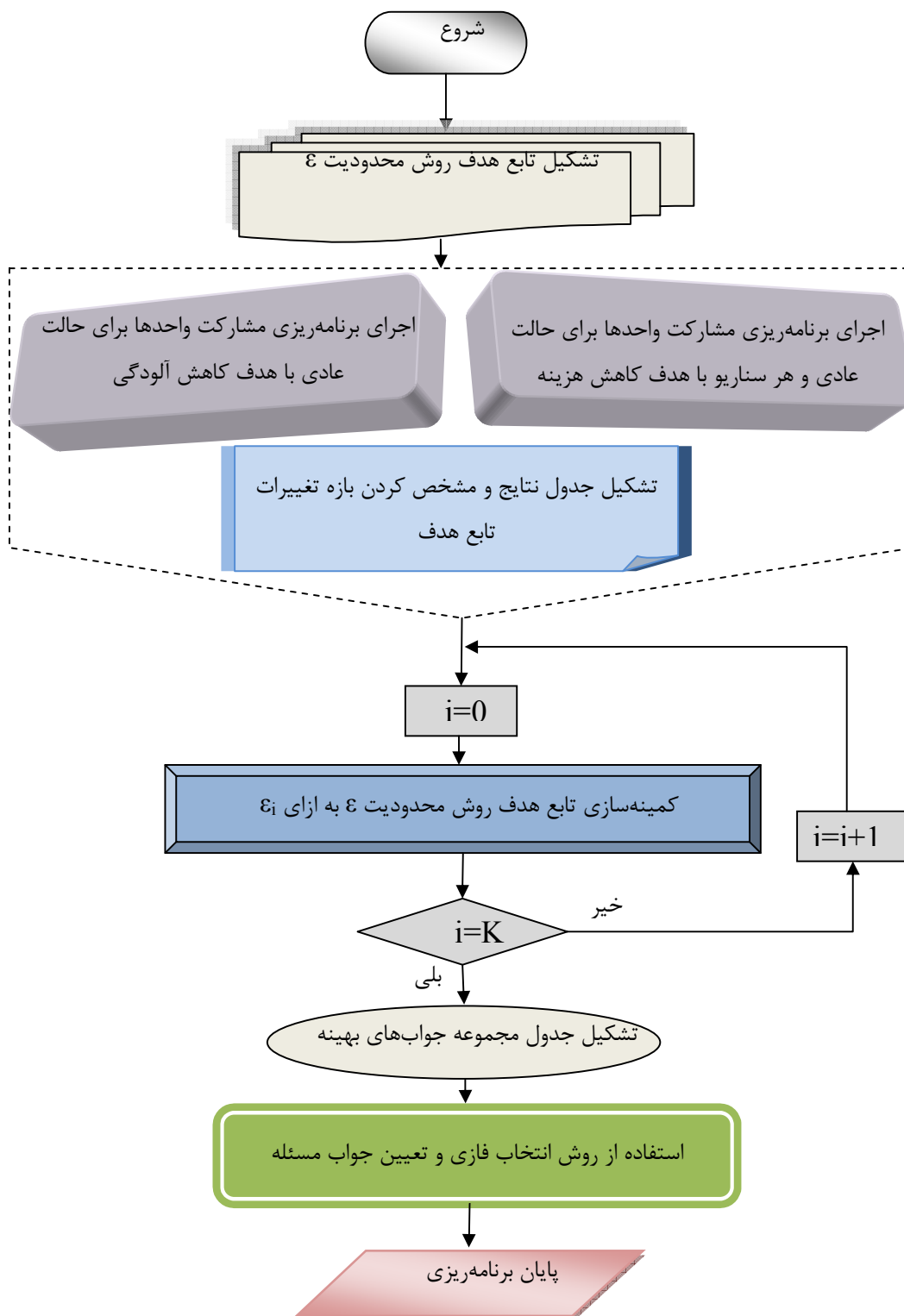
که در آن δ مقداری کوچک بین 10^{-3} و 10^{-6} می‌باشد.

^۱-Pay-off Table

در روش محدودیت ε یکی از تابع‌های هدف $(F_1(x))$ به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شوند. سپس از تشکیل جدول نتایج، محدوده‌ی $p-1$ تابع هدف دیگر مشخص می‌شود که به‌عنوان قید مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از آن محدوده‌ی تابع هدف i ام به $q_i - 1$ فاصله‌ی مساوی تقسیم می‌شود. بنابراین در مجموع $(q_i + 1)$ نقطه حاصل می‌شود (با احتساب نقاط ابتدایی و انتهایی)، که ε_i به‌صورت وابسته به این نقاط تغییر خواهد کرد. در واقع با تغییر مقادیر ε_i برای هر یک از تابع‌های هدف، یک بار مدل مطرح شده در (۳-۴۰) باید حل شود و در نتیجه‌ی این حل یک جواب حاصل خواهد شد. بنابراین در مجموع نیاز به حل $(q_2 + 1) \times \dots \times (q_p + 1)$ می‌باشد، و در نتیجه به‌همین تعداد جواب حاصل خواهد شد. یکی از ویژگی‌های این روش این می‌باشد که تعداد جواب‌های حاصله با تغییر q_i ها قابل کنترل می‌باشند. بیشتر بودن تعداد نقاط، بر تعداد جواب‌های مسئله می‌افزاید، اما تعداد نقاط بیشتر به‌معنی زمان محاسبه‌ی بیشتر می‌باشد. بنابراین برقراری تعادلی بین تعداد جواب‌ها و زمان محاسبه‌ی کمتر ضروری به‌نظر می‌رسد.

(ب) استفاده از روش محدودیت ε در برنامه‌ریزی واحدهای بادی-حرارتی

روندنامای روش محدودیت ε در برنامه‌ریزی واحدهای بادی-حرارتی به‌طور ساده در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. در این مدل در روش محدودیت ε ، تنها نیاز به محاسبه‌ی محدوده‌ی تابع هدف $F^{Emission}$ می‌باشد. زیرا تابع هدف F^{Cost} به‌عنوان تابع هدف اصلی مسئله در نظر گرفته می‌شود. سپس محدوده‌ی تابع هدف $F^{Emission}$ به $k-1$ فاصله‌ی مساوی تقسیم می‌شود. بنابراین $k+1$ نقطه برای تابع هدف $F^{Emission}$ حاصل خواهد شد. بنابراین نیاز به حل $k+1$ مسئله‌ی فرعی می‌باشد که به‌صورت زیر خواهند بود:



شکل ۳-۲- روندنمای روش محدودیت ϵ در برنامه‌ریزی واحدهای بادی- حرارتی

$$\text{Min}(F^{\text{Cost}} - \delta \times (\frac{S_2}{r_2})) \quad (41-3)$$

با شرط:

$$F^{\text{Emission}} + S_2 = \varepsilon_i \quad (42-3)$$

که در آن،

$$\varepsilon_i = F_{\text{max}}^{\text{Emission}} - \left(\frac{F_{\text{max}}^{\text{Emission}} - F_{\text{min}}^{\text{Emission}}}{k} \right) \times i, i = 0, 1, \dots, k. \quad (43-3)$$

$F_{\text{min}}^{\text{Emission}}$ و $F_{\text{max}}^{\text{Emission}}$ بترتیب بیان گر مقادیر بیشینه و کمینه‌ی تابع هدف آلودگی تولیدی واحدها، بر مبنای

جدول نتایج می‌باشد. همچنین r_2 محدوده‌ی تابع هدف آلودگی تولیدی می‌باشد ($F_{\text{max}}^{\text{Emission}} - F_{\text{min}}^{\text{Emission}}$).

در حین حل هر یک از این مسئله‌های فرعی رابطه‌ی ۴۳-۳ قیود ۴۱-۳ و ۴۲-۳ نیز باید در نظر گرفته شوند.

همانطور که گفته شد برقراری تعادلی بین تعداد جواب‌ها و زمان انجام محاسبات ضروری می‌باشد. در این پروژه

تعداد جواب‌ها برابر ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند.

ج) محاسبه‌ی جواب بهینه‌ی توافقی در بین جواب‌های ممکن

پس از اینکه دسته جواب‌های ممکن از حل حاصل شده‌اند، باید یکی از جواب‌ها به‌عنوان جواب بهینه انتخاب

شود. در اینجا از روش تصمیم‌گیری فازی^۱ به منظور انتخاب جواب بهینه‌ی توافقی استفاده می‌شود. یک پارامتر

عضویت μ_i^k برای هر یک از تابع‌های هدف در هر یک از جواب‌ها تعریف می‌شود [۳۶]:

$$\mu_{i=1,2}^k = \begin{cases} 1, & F_i^k \leq F_i^{\text{min}} \\ \left[\frac{F_i^{\text{max}} - F_i^k}{F_i^{\text{max}} - F_i^{\text{min}}} \right], & F_i^{\text{min}} \leq F_i^k \leq F_i^{\text{max}} \\ 0, & F_i^k \geq F_i^{\text{max}} \end{cases} \quad (44-3)$$

که در آن F_i^k و μ_i^k به ترتیب مقدار i امین تابع هدف در k امین جواب و پارامتر عضویت مربوط به آن می‌باشند. برای هر یک از جواب‌ها، پارامتر عضویت مربوط با توابع به صورت زیر نرمالیزه می‌شود:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^p \omega_i \mu_i^k}{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^p \omega_i \mu_i^k} \quad (3-45)$$

که ω_i وزن تابع هدف i ام در مسئله‌ی بهینه‌سازی چندمنظوره و m تعداد کل جواب‌های حاصل از حل مسئله-ی فرعی می‌باشد. میزان وزن ω_i توسط بهره‌بردار برطبق اهمیت مسئله اقتصادی و شرایط مسایل محیط‌زیستی انتخاب می‌شود. جوابی که میزان پارامتر عضویت μ^k در آن بیشترین باشد، به‌عنوان جواب بهینه‌ی توافقی انتخاب می‌شود. پرواضح است که ω_i بر پارامتر عضویت تأثیرگذار می‌باشد [41-42].

۳-۳ برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با حضور نیروگاه‌های بادی با استفاده از تئوری فازی

از آنجاکه تئوری مجموعه‌های فازی برای مدل کردن عدم قطعیت‌ها بسیار پرکاربرد می‌باشد در این پروژه نیز به‌عنوان نوآوری از این تئوری برای مدل کردن عدم قطعیت قیود و توابع هدف مسئله‌ی مشارکت واحدها با حضور نیروگاه‌های بادی استفاده شده است. این عدم قطعیت‌ها ناشی از تغییر در تولید توان بادی از مقدار پیش‌بینی شده آن، ناشی از طبیعت متغیر باد و خطا در پیش‌بینی میزان بار سیستم می‌باشد. در این مدل به‌منظور دستیابی به برنامه تولید بهینه، هزینه‌ی تولید، قید تعادل توان، نامعادله‌ی ذخیره و میزان تولید توان بادی در دسترس بصورت روابط فازی در نظر گرفته شده است. قید قطعی در این مدل محدودیت توان خروجی واحدهای حرارتی می‌باشد.

دلیل فازی در نظر گرفتن محدودیت تعادل توان به دلیل دارای عدم قطعیت بودن مقدار توان مصرفی پیش‌بینی شده‌ی بارها می‌باشد (مقدار دقیق توان مصرفی در زمان مصرف مشخص می‌شود). نامعادله‌ی ذخیره نیز به دلیل یکسانی یعنی عدم قطعیت در مقدار توان مصرفی (ذخیره بصورت درصدی از بار و تولید باد می‌باشد)، فازی در نظر گرفته شده است.

در اینجا ابتدا مدل قطعی روش مورد نظر ارائه شده و سپس درجه عضویت‌های مرتبط با عدم قطعیت معرفی و مدل فازی مرتبط ارائه شده است.

۳-۴-۱ مدل قطعی مسئله مشارکت واحدها

مسئله مورد نظر به صورت یک مسئله خطی-عدد صحیح مدل شده است.

تابع هدف: هزینه تولید توان

$$\begin{aligned}
 J = EC &= \sum_{t=1}^{N_T} EC_t \\
 &= \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} C_{it}^{SU} \\
 &+ \sum_{t=1}^{N_T} d_t \left[\sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{it}^{S\gamma} + b_i P_{it}^S + c_i) - \sum_{j=1}^{N_L} \lambda_{Ljt} L_{jt}^S \right. \\
 &\left. + \sum_{i=1}^{N_G} (C_{it}^{RU} R_{it}^U + C_{it}^{RD} R_{it}^D) \right] \quad (46-3)
 \end{aligned}$$

قیود مسئله:

- قید تأمین بار سیستم

$$\sum_{i=1}^{N_G} p_{it}^S . u(i,t) + P_t^{WP,S} = \sum_{j=1}^{N_L} L_{jt}^S = P_d(t) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (47-3)$$

که در آن $P_d(t)$ میزان بار کل پیش‌بینی شده ساعتی را نشان می‌دهد.

- تأمین ذخیره موردنیاز

ذخیره چرخان کاهش و افزایشی موردنیاز شامل دو بخش در نظر گرفته شده است. درصدی از کل بار سیستم (که بطور معمول معادل با ۰.۵٪ در نظر گرفته می‌شود)، بخش دوم شامل ذخیره‌ای است که خطا در پیش‌بینی تولید نیروگاه بادی (به دلیل عدم قطعیت باد) را تخمین می‌زند. درصد ذخیره پوشش دهنده‌ی خطای پیش‌بینی باد با استفاده از اطلاعات قبلی سیستم تخمین زده می‌شود که معادل با ۰.۱٪ تولید توان بادی در نظر گرفته شده است.

$$\sum_{i=1}^{N_G} R_{it}^U \geq P_{R^v}(t) + RESW * P_t^{WP,S} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (48-3)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} R_{it}^D \geq P_{R^D}(t) + RESW * P_t^{WP,S} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (49-3)$$

که در آن $P_{R^v}(t)$ و $P_{R^D}(t)$ میزان ذخیره چرخان افزایشی و کاهش‌ی موردنیاز برای پوشش خطای پیش‌بینی بار ساعتی می‌باشد.

-قیود واحدهای تولید توان

-توان باد: توان باد ممکن بین مقدار بیشینه و کمینه‌ای قرار داشته باشد.

$$P_t^{WP,min} \leq P_t^{WP,S} \leq P_t^{WP,max} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (50-3)$$

- محدودیت حداقل و حداکثر تولید توان واحدهای حرارتی: واحدهای حرارتی نیز در بازه‌ای بین مقدار بیشینه و کمینه قابل برنامه‌ریزی می‌باشند.

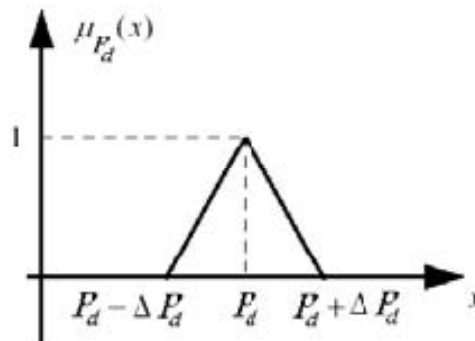
$$P_i^{min} u_{it} \leq P_{it}^S \leq P_i^{max} u_{it}, \forall i, \forall t. \quad (51-3)$$

۲-۴-۳ مدل فازی مسئله مشارکت واحدها

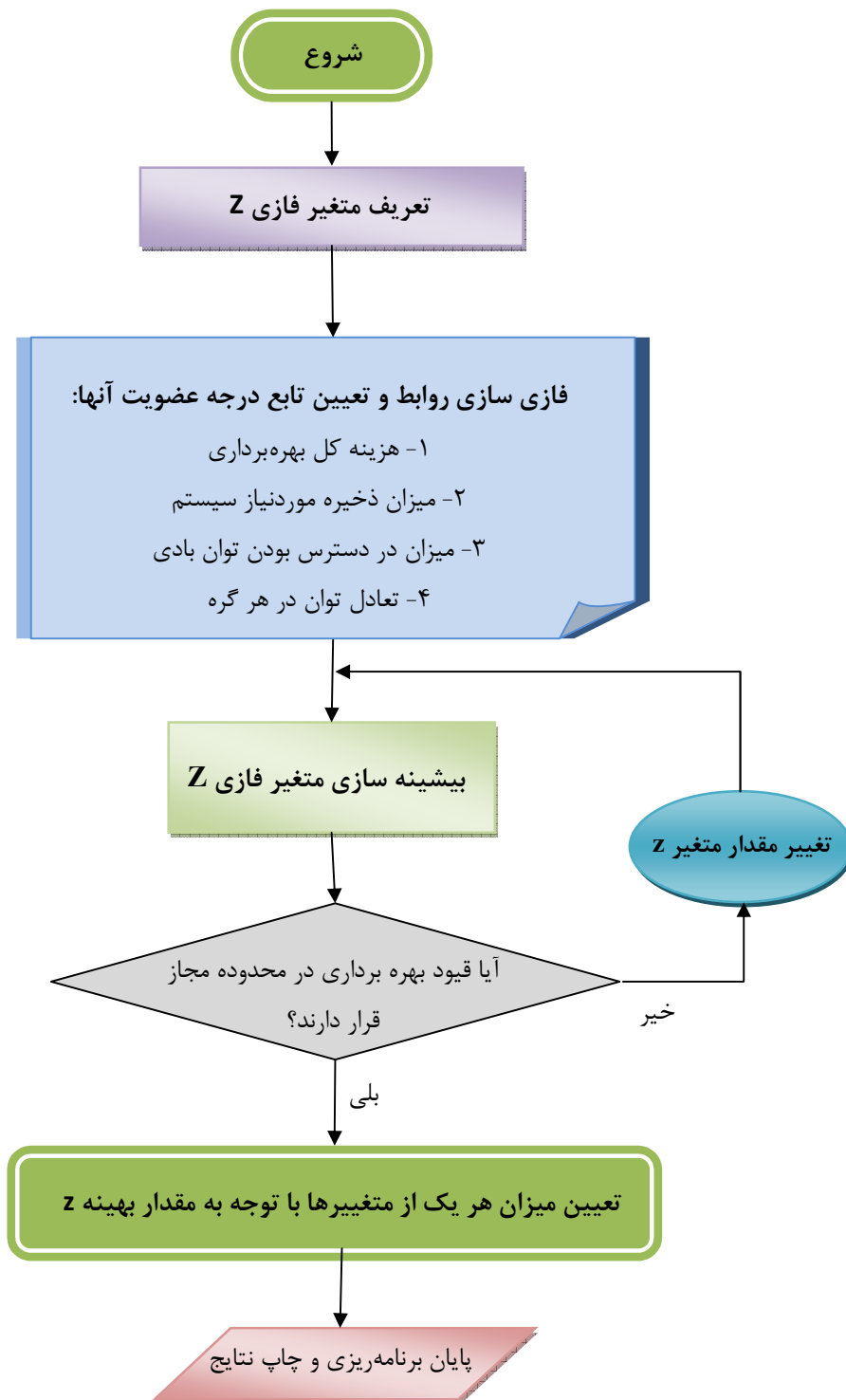
در این بخش از بهینه‌سازی فازی به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت روابط برنامه‌ریزی ناشی از خطای پیش‌بینی استفاده شده است. شکل (۳-۴) روندنمای مدل فازی برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با حضور نیروگاه-های بادی را نشان می‌دهد.

درجه عضویت رابطه‌ی تعادل توان: نایقینی در پیش‌بینی بار بطور معمول معادل $\pm 2\%$ و یا $\pm 5\%$ می‌باشد [۴۸]. در این پروژه حداکثر مقدار تغییرات مقدار بار $\pm 5\%$ در نظر گرفته شده است. مقدار تابع عضویت پیش‌بینی بار بصورت (۳-۵۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$\mu_{P_d}(x) = \begin{cases} 1 & x = P_d \\ \frac{x - P_d + \Delta P_d}{\Delta P_d} & P_d - \Delta P_d \leq x \leq P_d \\ \frac{P_d + \Delta P_d - x}{\Delta P_d} & P_d \leq x \leq P_d + \Delta P_d \\ \cdot & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (۳-۵۲)$$



شکل ۳-۳- درجه‌ی عضویت مقدار بار پیش‌بینی شده

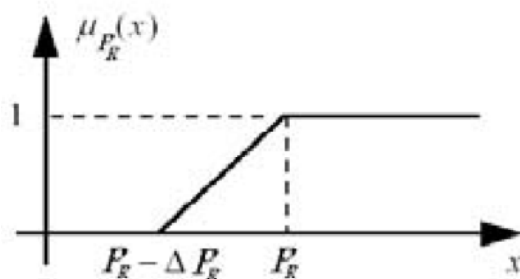


شکل ۳-۴- روندنمای مدل فازی در برنامه ریزی واحدهای بادی- حرارتی

درجه‌ی عضویت ذخیره موردنیاز سیستم: از آنجاکه مقدار ذخیره‌ی چرخان افزایشی و کاهش‌ی موردنیاز سیستم یک مقدار قطعی نمی‌باشد، می‌توان آنرا با مقادیر فازی نشان داد. بنابراین رابطه‌ی نابرابری ذخیره موردنیاز سیستم بصورت یک رابطه‌ی چند ضابطه‌ای فازی می‌باشد. در این مدل به دلیل مشابه بودن روابط درجه عضویت ذخیره چرخان افزایشی و کاهش‌ی، تنها رابطه ذخیره چرخان افزایشی در نظر گرفته شده است. مقدار درجه عضویت میزان ذخیره چرخان افزایشی بصورت رابطه (۵۳-۳) می‌باشد.

$$\mu_{P_{R^U}}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq P_{R^U} \\ \frac{x - P_{R^U} + \Delta P_{R^U}}{\Delta P_{R^U}} & P_{R^U} - \Delta P_{R^U} \leq x \leq P_{R^U} \\ \cdot & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (53-3)$$

که در آن $P_R - \Delta P_R$ حداقل ذخیره موردنیاز قابل قبول می‌باشد. در این پروژه مقدار ذخیره‌ی موردنیاز معادل ۵٪ بار ساعتی در نظر گرفته شده است و ΔP_R نیز ۵٪ می‌باشد. این تابع عضویت در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.

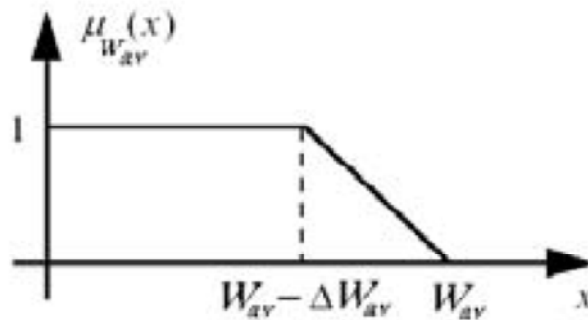


شکل ۳-۵ درجه عضویت رابطه نابرابری فازی (ذخیره موردنیاز سیستم)

درجه عضویت در دسترس بودن قدرت باد: از آنجاکه مقدار تولید نیروگاه بادی به دلیل طبیعت تصادفی وزش باد دارای عدم قطعیت می‌باشد، رابطه‌ی در دسترس بودن مقدار توان بادی نیز باید بصورت یک رابطه‌ی

نابرابری فازی در نظر گرفته شود. شکل ۳-۶ درجه‌ی عضویت این رابطه‌ی نابرابری را نشان می‌دهد. در این پروژه حداکثر تغییرات ممکن برای تولید توان بادی در دسترس برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است. مقدار این درجه‌ی عضویت بصورت رابطه‌ی (۳-۵۴) می‌باشد.

$$\mu_{W_{av}}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq W_{av} - \Delta W_{av} \\ \frac{W_{av} - x}{\Delta W_{av}} & W_{av} - \Delta W_{av} \leq x \leq W_{av} \\ 0 & x > W_{av} \end{cases} \quad (3-54)$$



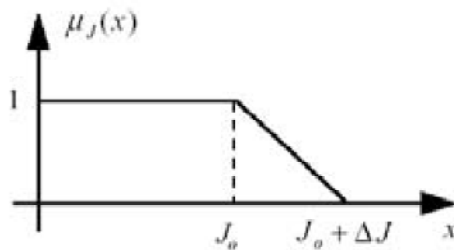
شکل ۳-۶ درجه عضویت میزان توان در دسترس نیروگاه بادی

درجه عضویت تابع هدف: در این مدل یک مقدار آرمانی برای تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. این مقدار آرمانی دارای عدم قطعیت می‌باشد. بدین معنی که مقداری افزایش در مقدار تابع هدف به منظور بهبود برآورده شدن قیود و بالعکس مجاز می‌باشد. بنابراین رابطه‌ی تابع هدف نیز به عنوان یک رابطه‌ی فازی در نظر گرفته می‌شود. مقدار تابع هدف باید از مقدار J_0 کوچکتر و یا مساوی آن باشد.

$$\min J \lesssim J_0 \quad (3-55)$$

مقدار تابع عضویت رابطه‌ی تابع هدف بصورت (۳-۵۶) می‌باشد که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.

$$\mu_J(x) = \begin{cases} 1 & x \leq J_0 \\ \frac{J_0 + \Delta J - x}{\Delta J} & J_0 \leq x \leq J_0 + \Delta J \\ 0 & x \geq J_0 + \Delta J \end{cases} \quad (۳-۵۶)$$



شکل ۳-۷ تابع عضویت فازی هزینه‌ی کل

مقدار ΔJ برحسب تجربه و بصورت درصدی از J_0 مشخص می‌شود. در این پروژه این درصد برابر ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. این مقادیر تنظیمات می‌تواند در هر سیستمی با توجه به ویژگی‌های آن سیستم و تجارب قبلی مشخص شود.

۳-۴-۳ روش حل

روش بهینه‌سازی فازی، مسئله بهینه‌سازی قطعی متناظر با مسئله‌ی فازی موردنظر را بدست آورده و سپس آنرا حل می‌نماید. با توجه به اینکه تابع هدف و قیود باید بطور همزمان در بدست آوردن جواب مسئله در نظر گرفته شود، تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی بصورت بیشینه کردن درجه‌ی عضویت برآورده شدن تمامی آنها (تابع هدف و قیود) می‌باشد. Z به عنوان کمینه درجه برآورده شدن تابع هدف و قیود مسئله تعریف خواهد شد. به عبارت دیگر Z یک متغیر کمکی در مدل‌سازی فازی می‌باشد که میزان برآورده شدن هر یک از توابع مورد نظر را

مشخص می‌نمایید. برای مثال $Z=1$ به معنی در نظر گرفتن مقدار مطلوب (کمینه) برای هزینه و مقدار مطلوب (بیشینه) برای بکارگیری توان بادی می‌باشد [۲۸-۳۰].

$$\max_{Z \in [0,1]} Z = \max_{Z \in [0,1]} \min \{ \mu_J, \mu_{P_d(t)}, \mu_{P_R(t)}, \mu_{W_{av}(t)} \}, t = 1, 2, \dots, T \quad (57-3)$$

با بازنویسی روابط، مسئله بصورت مدل (۵۸-۳) بیان خواهد شد.

$$\begin{aligned} & \max Z, \\ & s.t. \\ & Z \leq \mu_J, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ & Z \leq \mu_{P_d(t)}, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ & Z \leq \mu_{P_R(t)}, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ & Z \leq \mu_{W_{av}(t)}, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ & 0 \leq Z \leq 1 \end{aligned} \quad (58-3)$$

مدل فازی روابط (۵۲-۳) تا (۵۸-۳) را می‌توان بصورت مدل قطعی (۵۹-۳) تبدیل کرد.

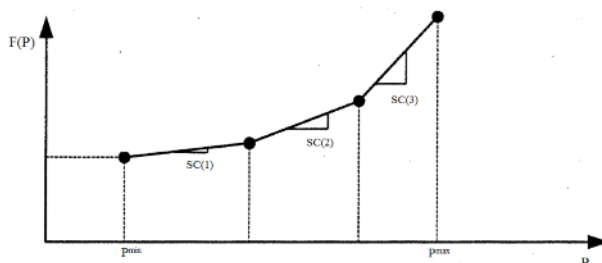
$$\begin{aligned} & \max Z, \\ & s.t. \\ & (Z-1) \cdot \Delta J - J_i + J \leq 0 \\ & (Z-1) \cdot \Delta P_d - \sum_{i=1}^{N_G} p_{it}^S u(i,t) - P_t^{WP,S} + P_d(t) \leq 0 \\ & (Z-1) \cdot \Delta P_d + \sum_{i=1}^{N_G} p_{it}^S u(i,t) + P_t^{WP,S} - P_d(t) \leq 0 \\ & (Z-1) \cdot \Delta P_R - \sum_{i=1}^{N_G} p_{it}^S u(i,t) + RESW \times P_t^{WP,S} + P_R(t) \leq 0 \\ & Z \cdot \Delta W_{av} - W_{av} + P_t^{WP,S} \leq 0 \\ & P_i^{min} u_{it} \leq P_{it}^S \leq P_i^{max} u_{it}, \forall i, \forall t. \end{aligned} \quad (59-3)$$

همانطور که دیده می‌شود، قید قطعی مسئله هم در مدل در نظر گرفته شده و باید برآورده شوند. در این مدل J با رابطه‌ی (۳-۴۶) جایگزین می‌شود. با افزایش هزینه و خطا در برآورده شدن قید ذخیره مقدار متغیر Z زیاد می‌شود. چنانچه برخی از قیود مسئله بطور کامل برآورده نشود مقدار درجه عضویت Z کمتر از ۱ خواهد بود.

برنامه بهینه‌سازی فازی مشارکت واحدها در حضور نیروگاه بادی در نرم‌افزار قدرتمند GAMS کدنویسی شده است و با استفاده از ماژول CEPLEX حل شده است [۴۷]. از آنجائیکه در این کدنویسی از روش حل برنامه-ریزی خطی استفاده شده است، لذا باید تمامی روابط این مسئله خطی باشند. تنها داده مسئله که غیر خطی می‌باشد تابع هزینه ژنراتورهای شبکه بوده که به صورت یک تابع درجه دو داده شده است. بنابراین قبل از استفاده از روش خطی باید این توابع را با توابع خطی معادل آنها جایگزین نمود. روش خطی‌سازی استفاده شده در این بخش به طور کامل در ادامه شرح داده شده است.

۳-۴ خطی‌سازی بخش‌های غیرخطی تابع هدف

به‌منظور دستیابی به جواب بهتر با استفاده از برنامه‌ریزی خطی-عدد صحیح، در اینجا به توضیح یک روش خطی‌سازی می‌پردازیم که در مدل‌های ارایه شده در بخش ۳-۲ این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش محدوده‌ی تغییرات دامنه‌ی تابع غیرخطی به چندین بخش تقسیم می‌شود. در هر یک از این بخش‌ها منحنی تابع غیرخطی با یک خط تقریب زده می‌شود. سپس مقدار تابع غیرخطی با مجموع مقدار توابع در هر بخش خطی تقریب زده می‌شود. نمونه‌ای از این تقریب خطی در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸- تقریب خطی یک منحنی غیرخطی

فرض می‌شود تابع $F(P)$ تابعی غیرخطی باشد. محدوده‌ی متغیر به بخش S تقسیم می‌شود.

$$seg = \frac{P^{\max} - P^{\min}}{S} \quad (۶۰-۳)$$

سپس شیب منحنی در وسط هر بخش محاسبه خواهد شد.

$$SC(s) = F'(P^{\min} + \frac{1}{2}s \times seg), \quad s = 1, 2, \dots, S. \quad (۶۱-۳)$$

که s شماره‌ی هر بخش می‌باشد و $SC(s)$ شیب منحنی در وسط هر بخش و $F'(0)$ مشتق تابع غیرخطی می‌باشد. سپس مقدار متغیر (در اینجا توان تولیدی واحدها) بین بخش‌های مختلف تقسیم می‌شود. مقدار تابع غیرخطی از مجموع مقادیر تابع در بخش‌های خطی بدست می‌آید [۵۲].

$$P = \sum_{s=1}^S P_{seg}(s) \quad (۶۲-۳)$$

$$F(P) = \sum_{s=1}^S SC(s) \times P_{seg}(s) + sm \quad (۶۳-۳)$$

که در آن:

$$sm = F(P^{\min}) - SC(1) \times P^{\min} \quad (۶۴-۳)$$

این خطی‌سازی به بخش‌های غیرخطی تابع‌های هدف اعمال می‌شود. این بخش‌های غیرخطی شامل تابع انتشار آلاینده‌های هوای واحدها و تابع پیشنهاد هزینه‌ی انرژی واحدها (هم در حالت عادی و هم در حالت برنامه‌ریزی برای سناریوها) می‌باشد [۵۲-۵۳].

۳-۵ جمع‌بندی

روابط برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با مشارکت نیروگاه‌های بادی با معیار امنیت تصادفی به‌طور مفصل در این فصل شرح داده شده است. همچنین روابط در نظر گرفتن میزان آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم با مشارکت واحدهای بادی مورد بررسی قرار گرفت. روش بهینه‌سازی

چندمنظوره محدودیت ε و استفاده از این روش در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم با حضور واحدهای بادی با هدف کاهش همزمان هزینه‌ی بهره‌برداری و آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی در انتهای این فصل مورد بحث قرار گرفت. سپس یک روش خطی‌سازی برای بخش‌های غیرخطی مدل به‌منظور دستیابی به جواب بهینه معرفی شد.

فصل چهارم

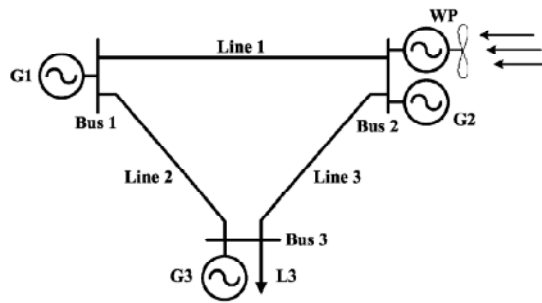
شبیه سازی و نتایج

فصل چهارم: شبیه‌سازی و نتایج

در این فصل نتایج برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با حضور نیروگاه‌های بادی با معیار امنیت تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل از شبیه‌سازی بر روی شبکه‌ی سه شینه شکل ۴-۱ در بازه‌ی زمانی ۴ و ۲۴ ساعته اجرا شده است. اطلاعات این شبکه از مرجع [۲۵] گرفته شده است. به‌منظور مقایسه، برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با هر دو روش معیار امنیت قطعی و تصادفی بر روی شبکه‌ی IEEE-RTS مورد آزمایش قرار گرفته است. داده‌های مربوط به شبکه‌ی IEEE-RTS از مرجع [۴۴] گرفته شده است و در پیوست ب آمده است. داده‌های مربوط به تابع هزینه‌ی پیشنهاد انرژی واحدها و محدودیت بیشینه و کمینه تولید واحدها از مرجع [۴۵] گرفته شده است. برنامه‌ریزی همزمان کاهش هزینه‌ی بهره‌برداری سیستم و انتشار آلاینده‌های هوا نیز بر روی شبکه‌های ۳۰ شینه‌ی IEEE و IEEE-RTS مورد آزمایش قرار گرفته است. داده‌های مربوط به تابع هزینه‌ی پیشنهاد انرژی واحدها و تابع انتشار آلاینده‌های ژنراتورهای این شبکه از مرجع [۴۶] گرفته شده‌اند. اطلاعات این شبکه نیز در پیوست ب می‌باشد.

مدل‌های موردنظر به‌وسیله حل‌کننده CEPLEX با استفاده از روش برنامه‌ریزی آمیخته خطی و عدد صحیح در نرم افزار قدرتمند GAMS [۴۷] کدنویسی و اجرا شده است.

در این پروژه فرض شده که نیروگاه بادی در یک شین از شبکه قرار دارد. در شبکه‌ی سه‌شینه‌ی موردنظر، از مقاومت خطوط صرف‌نظر شده و در نتیجه تلفات توان اکتیو در نظر گرفته نشده است. راکتانس خطوط pu ۰/۱۳ در مقادیر پایه ۴۱ MW و ۱۲۰ kV می‌باشد. ظرفیت همه خطوط مساوی و برابر ۵۵ MW فرض شده و اطلاعات ژنراتورها در جدول ۴-۱ آورده شده است. به‌منظور سادگی فرض شده که پیشنهاد فروش انرژی و ذخیره‌ی واحدها در سراسر محدوده‌ی برنامه‌ریزی مشابه می‌باشد. ژنراتورها بلوک‌های انرژی را با قیمت $\lambda_{G_{it}}$ و هزینه‌ی راه‌اندازی λ_{it}^{SU} پیشنهاد می‌دهند.



شکل ۴-۱- نمایش تک‌خطی شبکه‌ی نمونه‌ی سه‌شینه

جدول ۴-۱- اطلاعات ژنراتورها برای سیستم سه‌شینه

ژنراتور i	۱	۲	۳
$P_i^{\min}(MW)$	۱۰	۱۰	۱۰
$P_i^{\max}(MW)$	۱۰۰	۱۰۰	۵۰
$\lambda_{it}^{SU} (\$)$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
$\lambda_{G_{it}} (\$/MWh)$	۳۰	۴۰	۲۰
$C_{it}^{R^U} (\$/MWh)$	۵	۷	۸
$C_{it}^{R^D} (\$/MWh)$	۵	۷	۸
$C_{it}^{R^{NS}} (\$/MWh)$	۴/۵	۵/۵	۷

مقدار بیشینه ذخیره‌ی چرخان افزایشی و کاهش‌ی پیشنهاد شده توسط ژنراتورها به‌ترتیب $P_i^S - P_i^{\max}$ ،

و برای ذخیره‌ی غیرچرخان $P_i^S - P_i^{\min}$ در نظر گرفته شده است. قیدهای کمینه زمان روشن بودن و

خاموشی واحدها در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این فرض شده که هر سه ژنراتور در ابتدای محدوده‌ی مورد مطالعه ($t=0$) خاموش می‌باشند. منحنی بار ساعتی که در باس ۳ قرار دارد در جدول ۲-۴ داده شده است.

جدول ۲-۴- بار ساعتی در شین ۳

دوره‌ی t	۱	۲	۳	۴
$L_{jt}^s (MW)$	۳۰	۸۰	۱۱۰	۴۰

همانطور که در بخش ۱-۲-۲-۳ بیان شده، منحنی پیش‌بینی تولیدی توان بادی به صورت توزیع احتمال نرمال در نظر گرفته می‌شود. به منظور لحاظ کردن این فرض در برنامه‌ریزی، تابع توزیع نرمال برای هر ساعت به صورت سه تکه تقریب زده می‌شود و از در نظر گرفتن این تابع توزیع احتمال سه تکه برای هر دوره‌ی زمانی، درخت سناریوی توان بادی در بازه‌ی برنامه‌ریزی تشکیل می‌شود. پیش‌بینی تولید توان بادی در جدول ۳-۴ آمده است. به منظور در نظر گرفتن تولید توان بادی در برنامه‌ریزی با معیار امنیت قطعی، توان تولیدی بادی برابر با مقدار پیش‌بینی آن در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳-۴- سناریوی توان باد

$P_{t\omega}^{WP} (MW)$			دوره‌ی t
مقدار پائین	مقدار بالا	مقدار پیش‌بینی شده	
۲	۹	۶	۱
۱۳	۳۰	۲۰	۲
۲۵	۵۰	۳۵	۳
۶	۱۲	۸	۴

۴-۱- برنامه‌ریزی ذخیره موردنیاز سیستم با حضور نیروگاه‌های بادی

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم در حضور نیروگاه‌های بادی با معیار امنیت تصادفی بر روی شبکه سه شینه نمونه در بازه‌ی زمانی ۴ و ۲۴ ساعته مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور

مقایسه، برنامه‌ریزی با هر دو معیار امنیت قطعی و تصادفی بر روی شبکه IEEE-RTS نیز صورت گرفته، نتایج این برنامه‌ریزی‌ها در این بخش نشان داده شده است.

۴-۱-۱ - برنامه‌ریزی بهره‌برداری شبکه‌ی سه شینه با معیار امنیت تصادفی

در این مدل همانطور که در فصل دوم گفته شد، تولید توان بادی در ساعت‌های مختلف به صورت سناریوی کامل باد در نظر گرفته می‌شود. در هر ساعت منحنی توزیع نرمال تولید توان بادی، به صورت تابع سه تیکه تقریب زده می‌شود. این بخش‌ها شامل مقدار پیش‌بینی شده، مقدار بالا و مقدار پائین می‌باشد که مقادیر آنها برای هر ساعت در جدول (۴-۳) آمده است. این بخش‌ها به ترتیب دارای احتمال‌های ۰/۶، ۰/۲ و ۰/۲ می‌باشند. همچنین ارزش بار از دست رفته برابر $1000 \text{ \$/MW}$ در تمامی دوره‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج این برنامه‌ریزی در بازه‌ی زمانی ۴ ساعته در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۴- نتایج برنامه‌ریزی برای سیستم سه‌شینه با استفاده از معیار امنیت تصادفی

R_t^{NS}			R_t^D			R_t^U			P_t^S			$P_t^{WP,S}$	دوره t
G3	G2	G1	G3	G2	G1	G3	G2	G1	G3	G2	G1		
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۰	۲۴	۰	۰	۶	۱
۰	۰	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۰	۰	۳۰	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۱۵	۰	۰	۱۰	۵۰	۰	۲۵	۳۵	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۳۲	۰	۰	۸	۴

همانطور که دیده می‌شود تولید برنامه‌ریزی شده برای باد در تمامی دوره‌ها به غیر از دوره‌ی ۲ بر روی مقدار پیش‌بینی شده‌ی آن تنظیم می‌شود. همچنین الویت تولید توان واحدهای حرارتی به واحد ۳ تعلق دارد زیرا این واحد ارزان‌ترین واحد از دیدگاه تولید توان در بین واحدهای حرارتی می‌باشد. پس از این واحد، ارزان‌ترین واحد از دیدگاه تولید توان در بین واحدهای حرارتی واحد ۱ می‌باشد. در ساعت ۳ که مصرف بار بیشتر است، این واحد نیز در تولید توان مشارکت می‌کند. همانطور که در جدول ۴-۴ دیده می‌شود، ذخیره‌ی چرخان افزایشی

در هر ساعت به گونه‌ای تنظیم شده است که در صورت وزش باد در مقدار پایین آن، کمبود توان در هر ساعت بتواند توسط ذخیره چرخان افزایشی سیستم جبران شود. به عنوان مثال در ساعت ۱ اگر سناریوی تولید توان بادی MW ۲ رخ دهد، ذخیره‌ی چرخان MW ۴ که توسط واحد ۳ تأمین می‌شود، قادر به جبران این کمبود می‌باشد. همچنین با وجود ارزان‌تر بودن هزینه‌ی پیشنهاد شده برای ذخیره چرخان از طرف واحد ۱، ذخیره چرخان افزایشی توسط واحد ۳ تأمین می‌شود زیرا واحد ۱ به دلیل گران‌تر بودن قیمت پیشنهادی انرژی آن در ساعت‌های کم‌باری در تولید توان شرکت نمی‌کند و در نتیجه قادر به تأمین ذخیره‌ی چرخان نمی‌باشد. در ساعت ۳ به دلیل بار بیشتر، واحد ۱ نیز در تأمین توان شرکت می‌کند، بنابراین این واحد تأمین‌کننده‌ی ذخیره‌ی چرخان افزایشی در این ساعت می‌باشد. ذخیره‌ی چرخان کاهش‌ی سیستم نیز در ساعت ۳ توسط واحد ۱ تأمین می‌شود. این ذخیره در سناریوهایی که تولید توان باد از مقدار پیش‌بینی شده بیشتر است مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ساعت‌های دیگر این مقدار اضافه توان تولیدی توسط واحد بادی، به وسیله‌ی ریزش باد^۱ جبران می‌شود (ریزش باد به‌عنوان تنها کنترل توان خروجی واحد بادی در این پروژه در نظر گرفته شده است).

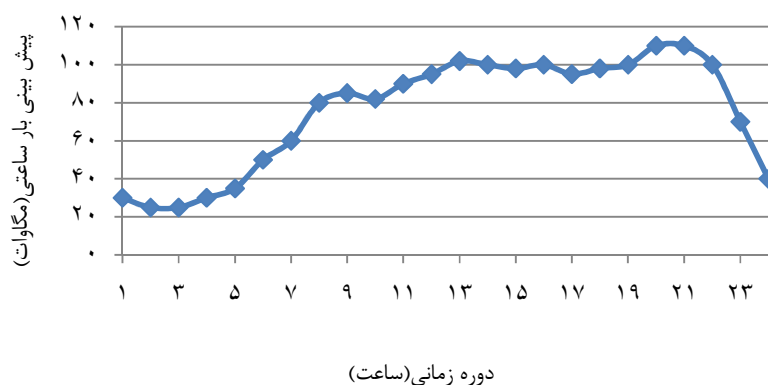
همانطور که در جدول ۴-۴ دیده می‌شود، تولید توان بادی در دوره‌ی دوم از مقدار پیش‌بینی شده‌ی آن بیشتر می‌باشد. به‌منظور تضمین تأمین بار در دوره‌ی دوم بهره‌بردار MW ۱۷ با واحد ۱ برای تأمین ذخیره قرار داد می‌بندد. تسویه بازار با برنامه‌ریزی توان باد MW ۳۰ در دوره‌ی ۲ سبب می‌شود که واحد ۱ در تأمین بار شرکت نکند، بنابراین بهره‌بردار می‌تواند این MW ۱۷ را به‌صورت ذخیره‌ی غیرچرخان با واحد ۱ قرارداد ببندد. اگر مقدار توان برنامه‌ریزی شده‌ی واحد بادی را در مقدار پیش‌بینی شده‌ی آن قرار دهیم، آنگاه واحد ۱ نیز در تأمین انرژی شرکت داده می‌شود و در نتیجه ذخیره‌ی موردنیاز به‌صورت ذخیره‌ی چرخان خواهد بود. در نتیجه هزینه‌ی راه‌اندازی واحد ۱، هزینه‌ی تولید توان توسط واحد ۱ و تأمین ذخیره‌ی چرخان توسط واحد ۱ موجب افزایش هزینه‌ی بهره‌برداری سیستم خواهد شد. با محدود کردن ظرفیت خط (۲-۳) به MW ۲۵ نتایج به‌صورت جدول ۴-۵ تغییر خواهد کرد.

جدول ۴-۵- نتایج برنامه‌ریزی سیستم سه‌شینه با استفاده از معیار امنیت تصادفی با محدود کردن ظرفیت خط (۲-۳)

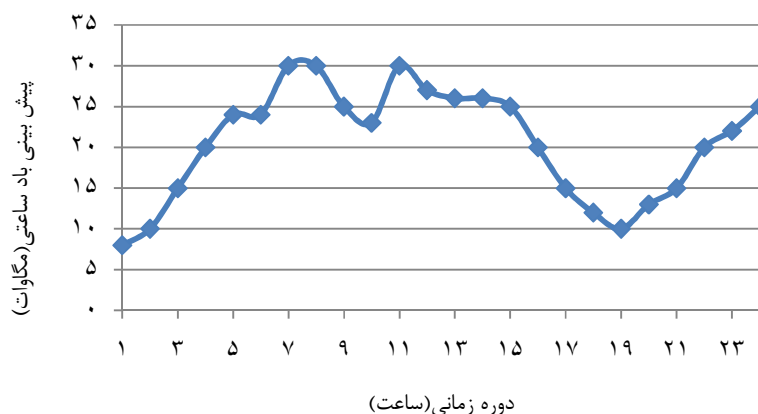
R_t^{NS}			R_t^D			R_t^U			P_t^S			$P_t^{WP,S}$	دوره t
G3	G2	G1	G3	G2	G1	G3	G2	G1	G3	G2	G1		
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۰	۲۴	۰	۰	۶	۱
۰	۰	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۰	۰	۳۰	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۰	۴۵	۱۵	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۳۲	۰	۰	۸	۴

همانطور که دیده می‌شود، در راه‌حل بهینه‌ی تسویه‌ی بازار برنامه‌ریزی توان بادی ۱۵ MW در دوره‌ی ۳ بدست خواهد آمد که در نتیجه نمی‌توان از بقیه‌ی توان بادی استفاده کرد. واحد ۱ به‌منظور تأمین بار دوره‌ای ۱۱۰ MW و انتقال توان از خط ۲، با توان برنامه‌ریزی شده‌ی ۴۵ MW در تأمین بار شرکت می‌کند. بدین طریق توان بیشتر از طریق خط (۱-۳) به بار منتقل خواهد شد تا توان عبوری از خط (۲-۳) کاهش یابد. نتایج در بقیه‌ی دوره‌های زمانی بدون تغییر باقی خواهد ماند.

همچنین برنامه‌ریزی با معیار امنیت تصادفی بر روی شبکه‌ی سه‌شینه‌ی موردنظر در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته نیز اجرا شده است که نتایج آن در جدول (۴-۶) تا (۴-۸) آمده است. منحنی پیش‌بینی باد و بار در طی ۲۴ ساعت به‌صورت شکل‌های (۲-۴) و (۳-۴) در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۲- منحنی پیش‌بینی بار ساعتی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعت



شکل ۳-۴- منحنی پیش‌بینی تولید توان بادی در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعت

جدول ۴-۶- نتایج برنامه‌ریزی توان با استفاده از معیار تصادفی شبکه‌ی سه‌شینه در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته (MW)

۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	t	
۱۸	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G1	P_t^S
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G2	
۵۰	۵۰	۴۹	۵۰	۵۰	۳۰	۲۶	۱۱	۱۰	۱۰	۱۵	۲۲	G3	
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	t	
۰	۰	۳۰	۴۵	۴۷	۴۰	۳۶	۳۰	۳۰	۲۳	۲۴	۲۶	G1	P_t^S
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G2	
۱۵	۴۸	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	G3	

جدول ۴-۷- نتایج برنامه‌ریزی ذخیره چرخان افزایشی با استفاده از معیار امنیت تصادفی شبکه‌ی سه‌شینه در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته (MW)

۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	t	
۸/۱	۹	۶/۹	۷/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G1	R_t^U
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G2	
۰	۰	۰	۰	۰	۶	۷/۲	۷/۲	۶	۴/۵	۳	۲/۴	G3	
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	t	
۰	۰	۶	۴/۵	۳/۹	۳	۳/۶	۴/۵	۶	۷/۵	۷/۸	۷/۸	G1	R_t^U
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G2	
۷/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G3	

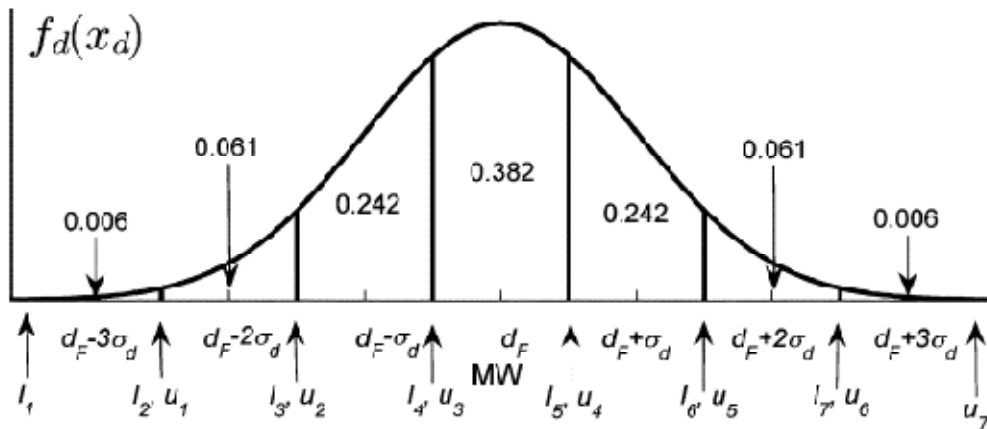
جدول ۴-۸- نتایج برنامه‌ریزی ذخیره‌چرخان کاهشی و غیر چرخان با معیار امنیت تصادفی شبکه‌ی سه‌شینه در بازه‌ی ۲۴ ساعته

(MW)

۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	t	
۲/۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G1	R_t^D
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G2	
۰	۰	۰	۰	۳	۳	۲/۴	۱	۰	۰	۱	۱/۲	G3	
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	t	
۰	۰	۲	۱/۵	۱/۳	۱	۱/۲	۱/۵	۲	۲/۵	۲/۶	۲/۶	G1	R_t^D
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G2	
۰	۲/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G3	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	t	
۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G1	R_t^{NS}
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G2	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G3	
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	t	
۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G1	R_t^{NS}
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G2	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	G3	

دو سطر آخر جدول (۴-۸) میزان ذخیره غیر چرخان برنامه‌ریزی شده در شبکه سه‌شینه را نشان می‌دهد. دیده می‌شود ذخیره‌ی غیرچرخان برنامه‌ریزی شده در تمامی ساعت‌ها بجز در ساعت‌های ۸ و ۲۳، صفر خواهد بود. ذخیره‌ی غیرچرخان برنامه‌ریزی شده در این ساعت‌ها که توسط واحد ۱ تأمین خواهد شد مساوی و برابر ۱۰ MW می‌باشد.

در این برنامه‌ریزی باد بر روی مقدار پیش‌بینی شده‌ی آن تنظیم شده و عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی باد در تعیین ذخیره‌ی موردنیاز سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این برنامه‌ریزی منحنی توزیع نرمال وزش باد به صورت تابع هفت تکه در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۴) تابع توزیع نرمال در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴): نمودار هفت تکه تقریبی تابع توزیع نرمال پیش‌بینی باد [۲۱]

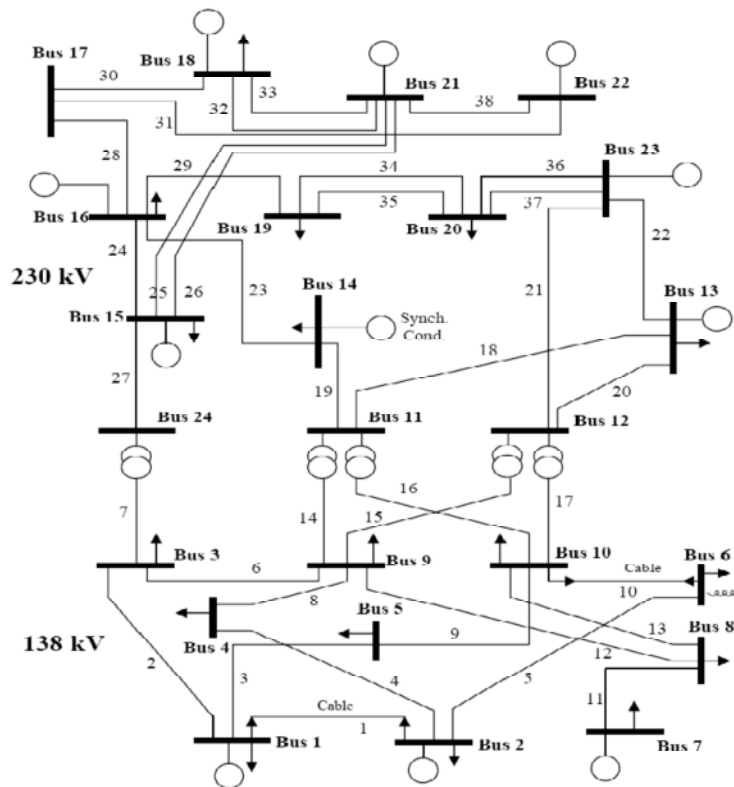
همانطور که در جدول ۴-۶ دیده می‌شود، واحد ۳ بدلیل کم بودن قیمت پیشنهادی انرژی آن در تمامی ساعت‌ها در تولید توان موردنیاز سیستم مشارکت می‌کند. پس از واحد ۳، واحد ۱ که پیشنهاد هزینه‌ی ارزان‌تری نسبت به واحد ۲ دارد در الویت تولید قرار داشته و در ساعت‌های پرباری در تولید توان مشارکت می‌کند. همانطور که پیش‌تر گفته شد، واحدها برای تأمین ذخیره چرخان باید در ساعت موردنظر در تأمین توان مشارکت کرده باشند و همچنین قید بیشینه و کمینه توان تولیدی هر واحد در تأمین ذخیره‌ی موردنیاز سیستم باید در نظر گرفته شود. در این برنامه‌ریزی با وجود ارزانتر بودن هزینه‌ی پیشنهادی تأمین ذخیره توسط واحد ۱، در ساعت‌هایی که این واحد در تأمین توان شرکت نمی‌کند، ذخیره‌ی موردنیاز سیستم توسط واحد ۳ تأمین خواهد شد. همچنین در ساعت‌های ۸ و ۲۳ به‌دلیل پر بودن ظرفیت واحد ۳ و در مدار نبودن واحدی دیگر، ذخیره‌ی موردنیاز سیستم توسط ذخیره‌ی غیرچرخان واحدها تأمین می‌شود. همچنین ذخیره‌ی چرخان کاهشی در برخی ساعت‌ها برای غلبه بر سناریوهای توان بالای باد، در نظر گرفته شده است.

۴-۱-۲- نتایج بهینه‌سازی با معیار امنیت و قطعی تصادفی بر روی شبکه‌ی IEEE-RTS

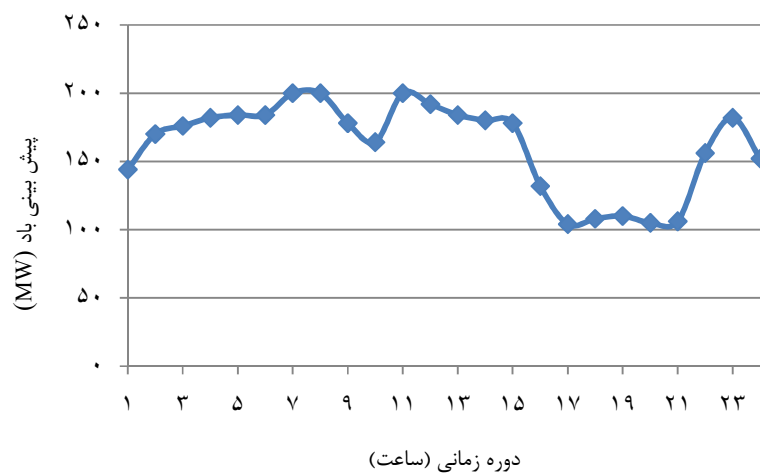
در این بخش، برنامه‌ریزی تعیین ذخیره‌ی موردنیاز سیستم در یک بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته با معیار امنیت قطعی و تصادفی شبیه‌سازی شده است. این مدل از برنامه‌ریزی بر روی شبکه IEEE-RTS [۴۴] که در شکل

(۴-۵) نشان داده شده، مورد آزمایش قرار گرفته است. این سیستم با صرف نظر از نیروگاه های آبی شامل ۲۶ ژنراتور و ۱۷ شین بار می باشد. داده های مربوط به تابع هزینه ژنراتور از مرجع [۴۵] می باشد. نیروگاه بادی در شین ۹ در نظر گرفته شده است. مقادیر پیش بینی باد در بازه ی زمانی ۲۴ ساعته در شکل (۴-۶) و جدول (۴-۹) نشان داده شده است. داده های مربوط به واحدها و شبکه در پیوست (ب) آورده شده است.

داده های بار هر ساعت مطابق روز سه شنبه از هفته چهل و پنجم، فصل پاییز انتخاب شده است. بار اوج سیستم ۲۶۵۰ MW و توزیع تقاضا در شین های سیستم براساس ضرایب جدول ۵ مرجع [۴۴] می باشد. منحنی شکل (۴-۷) و جدول (۴-۱۰) میزان تقاضای سیستم را در ۲۴ ساعت آینده نشان می دهد. همچنین ارزش بار ازدست رفته $1000 \text{ \$/h}$ در نظر گرفته شده است.



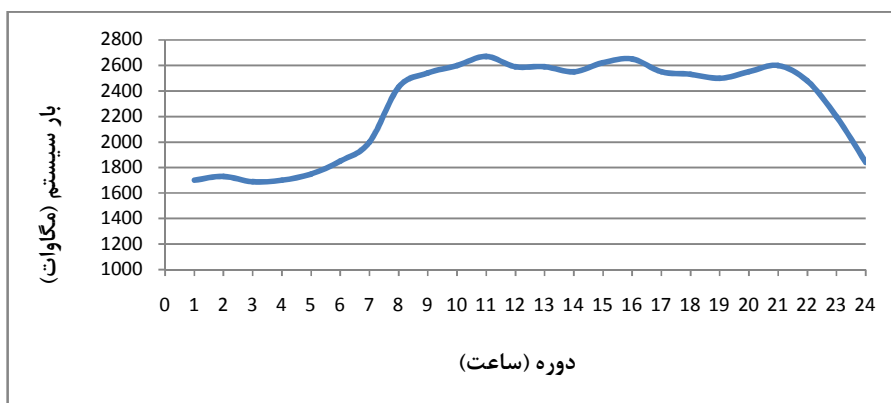
شکل ۴-۵- نمایش تک خطی شبکه IEEE-RTS



شکل ۴-۶- منحنی پیش بینی باد در بازه‌ی برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت

جدول ۴-۹- پیش بینی باد در بازه‌ی برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت

زمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
توان بادی پیش شده (مگاوات)	۱۴۴	۱۷۰	۱۷۶	۱۸۲	۱۸۴	۱۸۴	۲۰۰	۲۰۰	۱۷۸	۱۶۴	۲۰۰	۱۹۲
زمان	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
توان بادی پیش شده (مگاوات)	۱۸۴	۱۸۰	۱۷۸	۱۳۲	۱۰۴	۱۰۸	۱۱۰	۱۰۵	۱۰۶	۱۵۶	۱۸۲	۱۵۲



شکل (۴-۷): میزان بار سیستم IEEE-RTS در بازه ۲۴ ساعته

جدول ۴-۱۰- میزان بار سیستم IEEE-RTS در بازه ۲۴ ساعته

زمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بار سیستم (مگاوات)	۱۷۰۰	۱۷۳۰	۱۶۹۰	۱۷۰۰	۱۷۵۰	۱۸۵۰	۲۰۰۰	۲۴۳۰	۲۵۴۰	۲۶۰۰	۲۶۷۰	۲۵۹۰
زمان	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
بار سیستم (مگاوات)	۲۵۹۰	۲۵۵۰	۲۶۲۰	۲۶۵۰	۲۵۵۰	۲۵۳۰	۲۵۰۰	۲۵۷۰	۲۶۰۰	۲۴۸۰	۲۲۰۰	۱۸۴۰

قیمت پیشنهادی برای ذخیره هر واحد بر اساس هزینه حدی هر واحد در بیشینه توان آن در نظر گرفته شده است [۵۶-۵۵]. هزینه حدی به معنی هزینه تولید یک مگاوات بعدی توان هر واحد می‌باشد و از طریق گرفتن مشتق از تابع هزینه درجه دو واحدها به دست می‌آید. در این شبیه‌سازی‌ها هزینه پیشنهادی هر مگاوات ذخیره افزایشی و کاهش‌ی واحدها معادل هزینه حدی تولید توان بیشینه آن واحد لحاظ شده است.

همانطور که در جدول ۴-۱۱ دیده می‌شود، برنامه‌ریزی با معیار امنیت تصادفی هزینه فراهم‌آوری ذخیره پایین‌تری را نتیجه داده است. همچنین به دلیل کاهش میزان ذخیره چرخان مورد نیاز سیستم، از درمدا

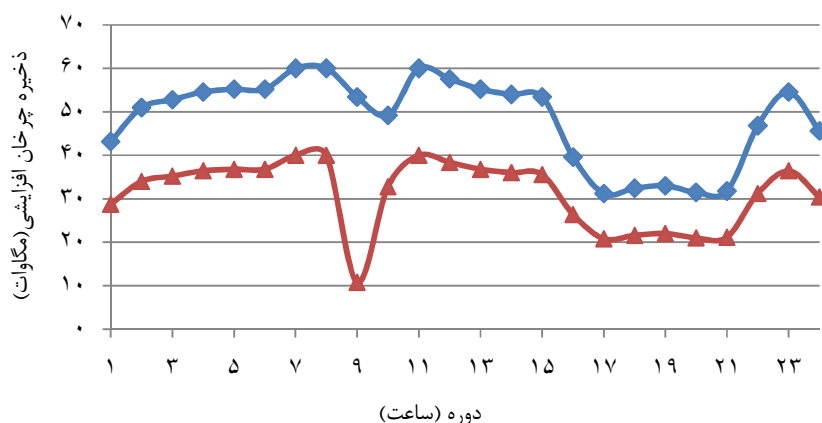
قرارگیری واحدهای گران قیمت جلوگیری شده و در نتیجه هزینه تولید نیز کاهش پیدا کرده است. همانطور که دیده می شود، استفاده از معیار برنامه ریزی تصادفی، سود مورد انتظار خالص \$ ۱۴۰۲۰ را نتیجه می دهد.

جدول ۴-۱۱- نتایج هزینه های بهره برداری حاصل از دو معیار برنامه ریزی تصادفی و قطعی

معیار	هزینه	تولید واحدها (\$)	ذخیره (\$)	هزینه کل (\$)
تصادفی	۶۴۰۸۱۷	۵۸۵۷	۶۴۶۶۷۴	
قطعی	۶۵۱۸۰۹	۸۸۸۵	۶۶۰۶۹۴	
سود مورد انتظار	۱۰۹۹۲	۳۰۱۰	۱۴۰۲۰	

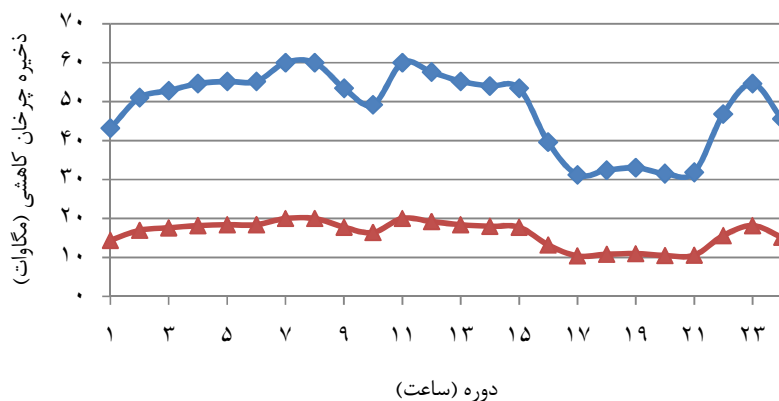
در شکل (۴-۸) مقایسه ای بین ذخیره چرخان افزایشی و کاهششی سیستم با دو معیار امنیت تصادفی و قطعی به عمل آمده است. همانطور که در شکل دیده می شود، مقدار ذخیره تعیین شده در برنامه ریزی با معیار امنیت تصادفی کمتر از برنامه ریزی با معیار امنیت قطعی می باشد. بنابراین روش امنیت تصادفی از اختصاص میزان اضافه ذخیره و در نتیجه صرف هزینه ای اضافه جلوگیری می کند.

این موضوع بدین دلیل می باشد که در برنامه ریزی با معیار امنیت تصادفی، برای تمامی سناریوهای مختلف تولید توان بادی با توجه به احتمال وقوع شان، برنامه ریزی اقتصادی انجام می شود و حذف بار اجباری برای جلوگیری از اختصاص ذخیره به سناریوها با احتمال کم، در برنامه ریزی در نظر گرفته می شود. همان گونه که در شکل پیداست، کاهش در ذخیره چرخان کاهششی بیشتر از کاهش در ذخیره ی چرخان افزایشی می باشد. زیرا ذخیره ی چرخان کاهششی به منظور اصلاح سناریوها با مقدار بالای توان بادی کاربرد دارد و با توجه به امکان استفاده از ریزش باد و عدم در نظر گرفتن قیمت برای ریزش باد در این برنامه ریزی، در برخی از این سناریوها، از ریزش باد برای برقراری تعادل توان استفاده می شود.



(الف) افزایشی

قطعی تصادفی



(ب) کاهشی

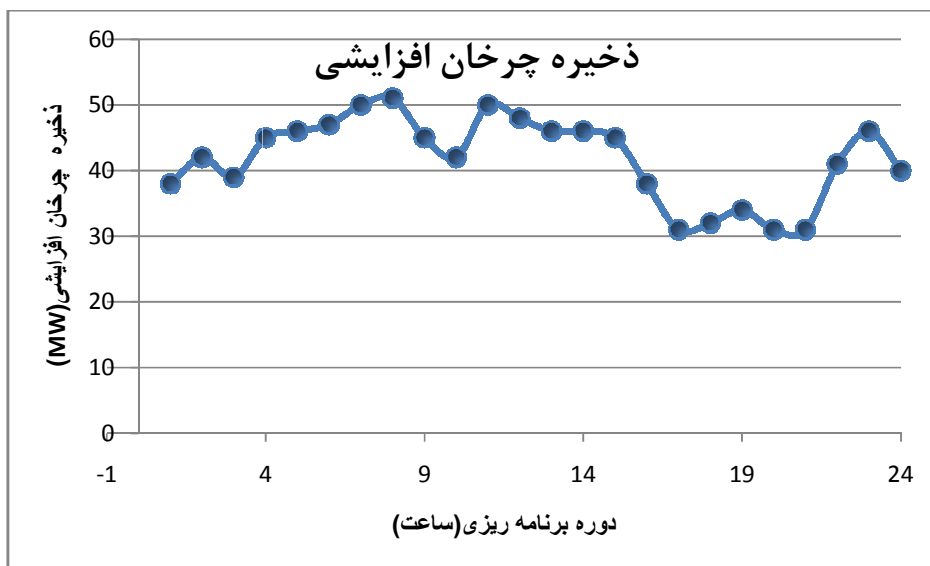
قطعی تصادفی

شکل ۴-۸- ذخیره چرخان موردنیاز سیستم با استفاده از معیارهای امنیت قطعی و تصادفی در حالت الف) افزایشی و ب) کاهشی

در شکل (۸-۴-الف) دلیل کاهش ناگهانی ذخیره چرخان افزایشی در ساعت ۹ در روش معیار امنیت تصادفی این می‌باشد که در برنامه‌ریزی واحدها، تمامی واحدهای در مدار در مقدارهای نزدیک مقدار بیشینه‌شان توان تولید می‌کنند. بنابراین در این ساعت برای فراهم کردن ذخیره موردنیاز به منظور پوشش دادن عدم قطعیت باد، نیاز به درمدار قرار گرفتن واحد تولیدی دیگری می‌باشد که این موضوع از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. بنابراین در این ساعت ذخیره کمتری در نظر گرفته شده و در صورت وقوع سناریوهای پایین توان باد، تعادل بین تولید و مصرف به وسیله‌ی حذف بار اجباری جبران می‌شود. با مقایسه شکل‌های (۴-۶) و (۴-۸)،

آشکار می‌شود که در ساعت‌هایی که توان پیش‌بینی شده باد بیشتر است، نیاز به ذخیره‌ی چرخان بیشتری نیز می‌باشد.

با افزایش میزان VOLL میزان ذخیره برنامه‌ریزی شده برای هر ساعت افزایش خواهد یافت. شکل (۹-۴) میزان ذخیره چرخان افزایشی سیستم را در حالتی که میزان VOLL دوبرابر شود نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود میزان ذخیره چرخان افزایشی در هر ساعت نسبت به شکل (۸-۴) افزایش یافته است. نکته قابل توجه میزان توان در ساعت ۹ می‌باشد که به جهت افزایش میزان VOLL، افزایش قابل توجهی یافته است. به عبارت دیگر بهره‌بردار تشخیص داده است که باید هزینه بیشتری برای امنیت سیستم بکند تا از بروز خسارت در یک هزینه بالاتر جلوگیری شود. یعنی با افزایش ارزش بار ازدست رفته، برنامه‌ریزی تصادفی سعی در کاهش کمبود توان‌های احتمالی کرده است و با افزایش میزان ذخیره در هر ساعت، از احتمال خاموشی دادن به بارها کاسته است.



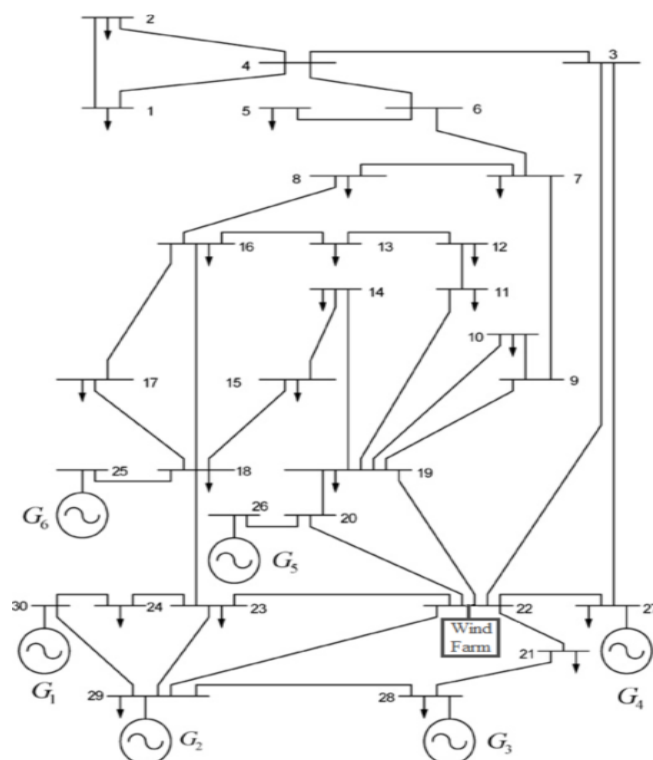
شکل ۹-۴-تاثیر افزایش میزان VOLL بر میزان ذخیره چرخان افزایشی

۴-۲- برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با هدف کمینه‌سازی همزمان هزینه و انتشار آلاینده‌ها

در فصل گذشته بخش ۳-۲، اهمیت کمینه‌سازی انتشار آلاینده‌های واحدهای حرارتی در حین برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم، مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش نتایج برنامه‌ریزی در مدار قرارگیری واحدها و تعیین ذخیره‌ی موردنیاز سیستم با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی کل بهره‌برداری سیستم و انتشار آلاینده‌ها به سه روش مطرح شده در فصل سوم، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. روش بهینه‌سازی چند منظوره محدودیت ۴، روش پیشنهادی این پروژه می‌باشد که به منظور بررسی کارآمد بودن آن، با روش‌های دیگر مقایسه شده است. همچنین در این بخش به منظور نشان دادن اهمیت استفاده از کمینه‌سازی همزمان هزینه‌ی بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها، نتایج روش بهینه‌سازی چندمنظوره محدودیت ۴ با برنامه‌ریزی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی بهره‌برداری سیستم به صورت تنها نیز مقایسه شده است.

۴-۲-۱- شبیه‌سازی بر روی شبکه ۶ ژنراتور IEEE

شبکه‌ی مورد مطالعه در این بخش، شبکه‌ی ۳۰ شینه‌ی نمونه‌ی IEEE که در شکل (۴-۱۰) آمده است، می‌باشد. همچنین فرض شده است که نیروگاه بادی در شین ۲۲ شبکه واقع می‌باشد. اطلاعات این شبکه در پیوست ب می‌باشد. این شبکه دارای ۶ ژنراتور است که اطلاعات آن‌ها از مرجع [۴۶] گرفته شده و در جدول ۴-۱۲ آمده است. قیمت پیشنهادی برای ذخیره هر واحد بر اساس هزینه حدی هر واحد در بیشینه توان آن در نظر گرفته شده است [۵۵-۵۶]. این برنامه‌ریزی در دوره‌ی زمانی ۶ ساعته انجام شده است. بار ساعتی کل در ۶ ساعت برنامه‌ریزی به ترتیب برابر ۴۵۰، ۴۲۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۲۰ و ۱۰۰ مگاوات در نظر گرفته شده‌اند. پیش-بینی باد ساعتی در جدول ۴-۱۳ آمده است. برای تولید توان بادی در هر ساعت سناریوی مقدار پیش‌بینی شده، مقدار بالا و مقدار پایین در نظر گرفته شده که احتمال آن‌ها در تمامی ساعات برابر و به ترتیب $0/6$ و $0/2$ و $0/2$ می‌باشد. مدل‌سازی پیش‌بینی باد در ۶ ساعت به صورت درخت سناریو در نظر گرفته شده است. سناریوهای پیش‌بینی توان بادی بر اساس تابع توزیع نرمال سه تکه مدل‌سازی شده است [۳۶].



شکل ۴-۱۰- نمایش تک خطی شبکه نمونه‌ی ۳۰ شینه‌ی IEEE

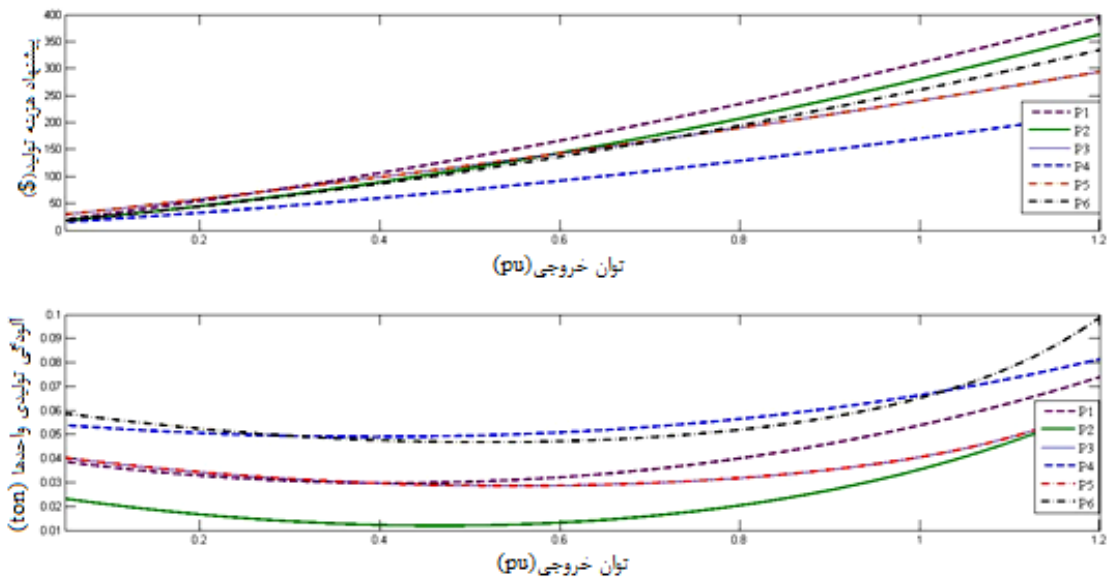
جدول ۴-۱۲ اطلاعات ژنراتورهای شبکه‌ی ۳۰ شینه IEEE

پیشنهاد هزینه‌ی ذخیره		ظرفیت واحدها (pu)		ضرایب تابع هزینه‌ی واحدها			
$C_{ii}^{R^D}$	$C_{ii}^{R^U}$	P_i^{\max}	P_i^{\min}	c_i	b_i	a_i	ژنراتور
۳۵	۳۵	۰/۵۰	۰/۰۵	۱۰	۲۰۰	۱۰۰	۱
۳۰	۳۰	۰/۶۰	۰/۰۵	۱۰	۱۵۰	۱۲۰	۲
۲۵	۲۵	۱/۰۰	۰/۰۵	۲۰	۱۸۰	۴۰	۳
۲۵	۳۰	۱/۲۰	۰/۰۵	۱۰	۱۰۰	۶۰	۴
۲۵	۲۰	۱/۰۰	۰/۰۵	۲۰	۱۸۰	۴۰	۵
۳۰	۲۵	۰/۶۰	۰/۰۵	۱۰	۱۵۰	۱۰۰	۶

درصد سهم بار هر شین از بار کل در پیوست ب آمده است. ذخیره غیرچرخان در این برنامه‌ریزی در نظر گرفته نشده است. منحنی‌های هزینه‌ی تولید واحدها و انتشار آلاینده‌های هر واحد در شکل (۴-۱۱) به منظور مقایسه آورده شده است.

جدول ۴-۱۳ پیش‌بینی باد

$P_{T\omega}^{wp} (MW)$			دوره‌ی زمانی
مقدار پایین	مقدار بالا	مقدار پیش‌بینی شده	
۴۰	۸۰	۶۰	۱
۶۰	۱۰۰	۸۰	۲
۵۰	۹۰	۷۰	۳
۶۰	۱۰۰	۸۰	۴
۵۰	۹۰	۷۰	۵
۶۰	۱۰۰	۸۰	۶



شکل ۴-۱۱- منحنی‌های توان خروجی و آلودگی تولیدی واحدها [۳۶]

همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، به‌منظور تأمین توان موردنیاز سیستم، واحدها با پیشنهاد هزینه پایین‌تر در الویت تأمین توان قرار دارند. به‌عنوان مثال در ساعت‌های کم‌باری، به‌ترتیب واحدهای ۴ و ۶ تأمین‌کننده‌ی توان موردنیاز سیستم می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۴-۱۱) دیده می‌شود، این دو واحد ارزان‌ترین پیشنهاد هزینه‌ی تولید را دارا می‌باشند. جدول (۴-۱۴) تا (۴-۱۶) به‌ترتیب نتایج برنامه‌ریزی‌هایی که در آن‌ها میزان آلودگی تولیدی واحدها به‌صورت قید و برنامه‌ریزی چندمنظوره محدودیت ε لحاظ شده را نشان می‌دهد.

میزان حداکثر آلودگی تولیدی در بازه‌ی زمانی برنامه‌ریزی برای همه‌ی ژنراتورها یکسان و برابر ۰/۱۷ ton در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۱۴- نتایج برنامه‌ریزی سیستم با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری

۶			۵			۴			۳			۲			۱			t	
R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	ژنراتورها	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۰	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۲	۰	۰	۴۸	۰	۰	۰	۵۴	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	۵	۹۵	۵	۵	۰	۹۵	۳
۱۲	۰	۴۰	۱۰	۰	۵۱	۶	۰	۵۵	۷	۰	۶۱	۰	۰	۸۸	۰	۰	۰	۹۲	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷	۸	۵۷	۶	۸	۰	۵۷	۵
۰	۰	۰	۰	۱۴	۵	۰	۲۰	۱۵	۰	۲۰	۳۷	۰	۷	۵۲	۰	۷	۰	۵۲	۶
۶۰			۶۴			۸۰			۷۰			۸۰			۶۰			نیروگاه بادی	

جدول ۴-۱۵- نتایج برنامه‌ریزی اقتصادی بهره‌برداری سیستم با در نظر گرفتن محدودیت آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی

۶			۵			۴			۳			۲			۱			t	
R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	R_t^D	R_t^U	P_t^S	ژنراتورها	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۸	۰	۴۰	۰	۰	۵	۰	۰	۵	۰	۰	۳۰	۰	۰	۲۸	۰	۰	۰	۳۴	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	۰	۶۸	۹	۰	۰	۹۶	۳
۰	۰	۰	۶	۲۰	۴۵	۸	۲۰	۶۵	۷	۲۰	۱۰۰	۰	۰	۱۲۰	۰	۰	۰	۱۲۰	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۲۰	۶۳	۰	۲۰	۰	۸۰	۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۰	۰	۰	۰	۶۰	۶
۶۰			۷۰			۸۰			۷۰			۸۰			۶۰			نیروگاه بادی	

جدول ۴-۱۶- نتایج برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم با هدف کاهش همزمان هزینه بهره‌برداری و آلودگی تولیدی

۶			۵			۴			۳			۲			۱			t
R_t^D	R_t^U	P_t^c	R_t^D	R_t^U	P_t^c	R_t^D	R_t^U	P_t^c	R_t^D	R_t^U	P_t^c	R_t^D	R_t^U	P_t^c	R_t^D	R_t^U	P_t^c	ژنراتورها
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۸
۱۱	۵	۳۵	۸	۱۰	۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۴	۰	۰	۵۵	۰	۰	۵۶	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷	۲۰	۷۰	۸	۲۰	۷۶	۰	۲۰	۸۰	۰	۲۰	۸۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶	۰	۸۰	۷	۰	۸۱	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶	۰	۶۵	۶	۰	۶۵	۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۰	۰	۰	۶۰	۶
۶۵			۷۰			۸۰			۷۰			۸۰			۶۰			نیروگاه بادی

نتایج این نوع برنامه‌ریزی نسبت به نتایج برنامه‌ریزی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی بهره‌برداری سیستم دستخوش تغییر شده است. از جمله‌ی این تغییرات، کاهش توان تولیدی واحد ۴ به‌خصوص در دوره‌های کم‌باری می‌باشد. پرواضح است که این تغییر به واسطه‌ی محدود شدن میزان آلودگی مجاز تولیدی واحدها در طی بازه‌ی برنامه‌ریزی می‌باشد. همچنین در این جدول دیده می‌شود که، در ساعت ۶ توان بادی در مقدار پایین آن برنامه‌ریزی شده است. این بدین دلیل می‌باشد که با تنظیم توان بادی در مقدار پیش‌بینی شده‌اش، واحد ۲ برای تولید توان کمتری برنامه‌ریزی می‌شود. همانطور که در منحنی آلودگی تولیدی توسط واحدها دیده می‌شود، با کاهش تولید توان به سطح ۲۰ MW (۲ pu)، میزان انتشار آلاینده‌های این واحد افزایش می‌یابد. بنابراین در شرایط کم‌باری واحدهای بادی با وجود اینکه خود تولید کننده‌ی آلودگی نیستند، ممکن است سطح بالای تولیدشان منجر به افزایش آلودگی تولید شده توسط واحدهای حرارتی شود. این موضوع بیانگر اهمیت در نظر گرفتن میزان انتشار آلاینده‌های هوا توسط واحدهای حرارتی در برنامه‌ریزی می‌باشد. به عبارت دیگر حضور تولید توان بادی در کاهش آلودگی از دو دیدگاه قابل بررسی می‌باشد. اول اینکه مشارکت توان بادی که از انرژی‌های پاک می‌باشد موجب کاهش در میزان تولید توان نیروگاه‌های حرارتی خواهد شد. لذا میزان سوخت مصرفی کاهش یافته و آلودگی ناشی از مصرف و سوزاندن این سوخت‌ها کاهش خواهد یافت. نکته دوم این است

که باید در نظر داشت که کاهش تولید توان واحدهای حرارتی در برخی از نواحی کار آنها موجب افزایش در انتشار آلاینده‌ها می‌شود. دلیل فنی این امر این است که اگر یک واحد نیروگاهی در خارج از محدوده نامی خود کار نماید موجب بازده پایین‌تر و خوب نسوزاندن سوخت می‌شود، از اینرو میزان آلودگی افزایش خواهد یافت.

همانطور که دیده می‌شود در برنامه‌ریزی بهینه‌سازی چندمنظوره به روش محدودیت آلودگی نیز الویت تولید توان بر مبنای قیمت پیشنهادی واحدها تنظیم شده است. در این نتایج در ساعات کم‌باری واحد ۴ (ارزانترین واحد از لحاظ تولید توان) تأمین‌کننده‌ی توان موردنیاز سیستم می‌باشد. در این پروژه از بهینه‌سازی چندمنظوره به روش محدودیت ε به منظور این برنامه‌ریزی استفاده شده است. به منظور دستیابی به جواب بهینه‌ی کلی به روش تصمیم‌گیری فازی، $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ در نظر گرفته شده است. در این روش در مقایسه با برنامه‌ریزی با هدف حداقل کردن هزینه، در ساعات‌های کم‌باری تعداد واحدهای کمتری در تأمین توان موردنیاز مشارکت می‌کنند. این موضوع بدین دلیل می‌باشد که هرچه تعداد واحدهای تولیدکننده‌ی توان بیشتر باشد، سطح تولید توان هر واحد کاهش و در نتیجه انتشار آلاینده‌های هوا توسط آنها افزایش می‌یابد. در ساعت ۱ دیده می‌شود که واحدها با توجه به قیمت پیشنهادی انرژی‌شان، در تأمین توان موردنیاز بار ساعتی شرکت داده شده‌اند. از طرفی هر واحد به‌گونه‌ای در تولید توان شرکت داده شده‌اند که مقدار کمینه آلودگی تولیدی برحسب منحنی تولید آلودگی خودشان را داشته باشند. همچنین واحد ۲ که پایین‌ترین منحنی تولید آلودگی را دارا می‌باشد، در تمامی ساعت‌ها در تأمین توان مشارکت داده شده است. ذخیره چرخان افزایشی نیز در هر ساعت به‌گونه‌ای تنظیم شده است که جبران‌کننده‌ی کمبود توان در سناریوهای پایین توان بادی باشد. مقدار اضافه توان در سناریوهای توان بالای بادی توسط ذخیره‌ی چرخان کاهشی و یا به‌وسیله ریزش باد کم می‌شود.

۴-۲-۲- شبیه‌سازی بر روی شبکه ۲۶ ژنراتور IEEE

در ادامه برای نشان دادن کارایی روش بهینه‌سازی چندمنظوره به روش محدودیت ε برای برنامه‌ریزی شبکه‌های بزرگتر، شبکه ۲۶ ژنراتور IEEE-RTS به عنوان شبکه مورد آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های

این شبکه در پیوست آورده شده است. تابع انتشار آلاینده‌های این شبکه بر حسب نوع واحدها در جدول (۴-۱۷) آورده شده است.

جدول (۴-۱۷): مشخصه آلودگی واحدهای شبکه IEEE-RTS

گروه	شماره واحدها	$\alpha_i (\times 10^{-2})$	$\beta_i (\times 10^{-2})$	$\gamma_i (\times 10^{-2})$	ζ_i	λ_i
A	۱-۵	۴/۰۹۱	-۵/۵۵۴	۶/۴۹۰	$2/0 \times 10^{-4}$	۲/۸۵۷
B	۶-۹	۲/۵۴۳	-۶/۰۴۷	۵/۶۳۸	$5/0 \times 10^{-4}$	۳/۳۳۳
C	۱۰-۱۳	۴/۲۵۸	-۵/۰۹۴	۴/۵۸۶	$1/0 \times 10^{-6}$	۸/۰۰۰
D	۱۴-۱۶	۵/۳۲۶	-۳/۵۵۰	۳/۳۸۰	$2/0 \times 10^{-3}$	۲/۰۰۰
E	۱۷-۲۰	۴/۲۵۸	-۵/۰۹۴	۴/۵۸۶	$1/0 \times 10^{-6}$	۸/۰۰۰
F	۲۱-۲۳	۶/۱۳۱	-۵/۵۵۵	۵/۱۵۱	$1/0 \times 10^{-5}$	۶/۶۶۷
G	۲۴	۶/۱۳۱	-۵/۵۵۵	۵/۱۵۱	$1/0 \times 10^{-5}$	۶/۶۶۷
H	۲۵-۲۶	۶/۱۳۱	-۵/۵۵۵	۵/۱۵۱	$1/0 \times 10^{-5}$	۶/۶۶۷

ظرفیت نیروگاه بادی نصب شده در این شبکه ۲۵۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. برنامه‌ریزی برای یک بازه ۴ ساعته و با پیش‌بینی باد مطابق با جدول (۴-۱۸) صورت گرفته است. میزان پارامتر k برابر ۱۰ در نظر گرفته شده و برنامه بهینه‌سازی در نرم‌افزار GAMS کدنویسی شده است.

جدول ۴-۱۸ پیش‌بینی باد شبکه IEEE-RTS

دوره زمانی	$P_{i\omega}^{wp} (MW)$		
	مقدار پیش‌بینی شده	مقدار بالا	مقدار پایین
۱	۱۵۰	۱۷۰	۱۳۰
۲	۱۸۰	۲۱۰	۱۶۰
۳	۱۶۰	۱۸۰	۱۴۰
۴	۲۰۰	۲۲۰	۱۸۰

جدول نتایج برای کمینه‌سازی تنها هزینه و آلودگی در جدول (۴-۱۹) آورده شده است. این نتایج نشان دهنده محدوده مجاز فضای جواب‌ها برای دو تابع هزینه و آلودگی می‌باشد.

جدول (۴-۱۹): نتایج حاصل از بهینه‌سازی مستقل توابع هزینه و آلودگی

آلودگی (Ton)	میزان هزینه (\$)	
۱۶۸/۳۹۶	۱۳۸۴۳	کمینه‌سازی تابع هزینه
۳/۳۱۵	۶۹۲۰۱	کمینه‌سازی تابع آلودگی

نتایج برنامه‌ریزی برای $k=10$ در جدول (۴-۲۰) نشان داده شده است. همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد، محدوده بین بهترین و بدترین جواب تابع آلودگی به k قسمت تقسیم می‌شود. سپس هر مقدار تابع آلودگی به عنوان یک محدوده برای کمینه‌سازی تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. نتایج این ده مرحله بهینه‌سازی در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول (۴-۲۰): نتایج کمینه‌سازی در k مرحله تکرار

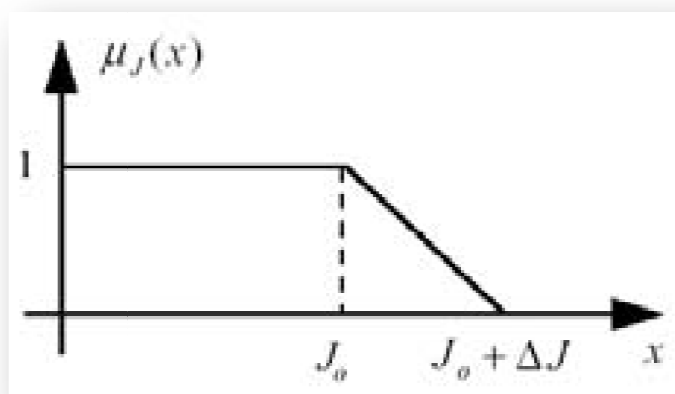
۵	۴	۳	۲	۱	k
۱۴۴۰۳	۱۴۳۰۴	۱۴۱۲۳	۱۳۹۴۲	۱۳۸۴۳	هزینه (K\$)
۹۳۵/۵۴	۱۱۲/۲۶	۱۳۰/۹۷	۱۴۹/۶۹	۱۶۸/۳۹	آلودگی (Ton)
۱۰	۹	۸	۷	۶	k
۲۸۳۶۶	۱۵۲۰۹	۱۵۰۲۸	۱۴۷۶۵	۱۴۵۸۴	هزینه (K\$)
۳/۳۱۵	۱۸/۷۱	۳۷/۴۲	۵۶/۱۳	۷۴/۸۴	آلودگی (Ton)

با استفاده از تصمیم‌گیری فازی نتایج بهینه‌سازی در مرحله $k=6$ انتخاب شده است.

۴-۳ برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با توجه به عدم قطعیت باد و بار با استفاده از بهینه‌سازی فازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی مدل ارائه شده برای برنامه‌ریزی مشارکت واحدها که در بخش ۳-۴ ارائه شده، بر روی شبکه ۳۰ شینه IEEE بخش قبل، آورده شده است. تولید توان بادی و میزان بار ساعتی نیز مانند بخش

قبل در نظر گرفته شده است. مقدار عدم قطعیت‌های در نظر گرفته در روابط در بخش ۳-۴ آورده شده است. این مقادیر غیر از مقدار عدم قطعیت در میزان تولید توان بادی مانند مرجع [۴۸] انتخاب شده است. عدم قطعیت در میزان تولید توان بادی مانند مرجع [۲۵] (مقاله مرجع این پایان‌نامه) برابر ۳۰٪ مقدار باد پیش‌بینی، در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است، برای مقادیر تابع هزینه کمتر از J_0 (مقدار آرمانی تابع هدف) مقدار مطلوبیت یک می‌باشد. نتایج بهینه‌سازی فازی برای چهار مقدار مختلف از مقدار آرمانی تابع هدف انجام و به همراه درجه عضویت بدست آمده در جدول ۴-۲۱ آورده شده است.



شکل ۴-۱۲ تابع عضویت فازی هزینه‌ی کل

جدول ۴-۲۱- نتایج بهینه‌سازی فازی برای سه مقدار مختلف از مقدار آرمانی تابع هدف

مقدار آرمانی تابع هدف (\$)	۲۵۰۰	۲۶۰۰	۲۶۱۰	۲۶۵۰
درجه عضویت بدست آمده	۰/۷۲۴	۰/۹۵	۰/۹۷۲	۱

همانطور که در جدول ۴-۲۱ دیده می‌شود، مقدار درجه عضویت در مقدار آرمانی \$ ۲۶۵۰ بیشینه و ۱ شده است، اما این حالت معادل برنامه‌ریزی قطعی [۵۶ و ۲۰] می‌باشد که تمام مقدار عدم قطعیت باد و بار در همه حالت‌ها پوشش داده شده و ذخیره بر روی مقدار از پیش تعیین شده‌ای تنظیم شده است. زیرا در حالت برنامه-

ریزی قطعی میزان ذخیره از پیش تعیین می‌شود و در برنامه‌ریزی امکان تغییر آنها نمی‌باشد. از سوی دیگر در برنامه‌ریزی به روش فازی میزان ذخیره از پیش تعیین نمی‌شود بلکه در طول برنامه‌ریزی و بر اساس در نظر گرفتن اهداف هزینه بهره‌برداری و میزان پوشش عدم قطعیت‌ها مشخص می‌شود. همانطور که در فصل ۲ و ۳ توضیح و در نتایج این فصل نیز نشان داده شد، برنامه‌ریزی قطعی سبب افزایش هزینه بهره‌برداری از سیستم قدرت و از دست رفتن بخشی از مزایای تولید توان بادی می‌شود. بنابراین مقدار آرمانی \$ ۲۶۱۰ بهترین گزینه به نظر می‌رسد که نتایج بدست آمده برای تولید توان واحدها و ذخیره‌ها در جدول ۴-۲۲ نشان داده شده است. در این برنامه‌ریزی عدم قطعیت باد و بار به‌طور همزمان در نظر گرفته شده است. بنابراین از لحاظ برنامه‌ریزی ذخیره با هیچ یک از نتایج دیگر این فصل قابل ارزیابی نمی‌باشد. اما در اینجا به تحلیل صحت نتایج بر مبنای منحنی هزینه تولید توان شکل ۴-۱۱ پرداخته شده است.

جدول ۴-۲۲- نتایج بهینه‌سازی فازی برای مقدار آرمانی \$ ۲۶۱۰

۴	۱			۲			۳			۴			۵			۶			ژنراتورها	
	R_t^D	R_t^U	P_t^s	R_t^D	R_t^U	P_t^s	R_t^D	R_t^U	P_t^s	R_t^D	R_t^U	P_t^s	R_t^D	R_t^U	P_t^s	R_t^D	R_t^U	P_t^s		
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۲	۲
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۳
	۲۶	۲۶	۳۱	۲۶	۲۶	۵۳	۳۰	۳۰	۷۴	۳۰	۲۲	۹۸	۴۴	۶	۱۱۴	۴۰	۲	۱۰۸		۴
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۸	۷۲	۰	۲۴	۷۶		۵
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸	۳۵	۰	۱۰	۴۴	۰	۱۴	۴۶		۶
	۶۹			۶۷			۷۶			۶۷			۷۶			۵۷				نیروگاه بادی

همانطور که دیده می‌شود، در ساعت ۱ که شاعت پرباری می‌باشد، ژنراتور ۴ که ارزان‌ترین ژنراتور می‌باشد بیشترین میزان تولید توان را در ساعت ذکر شده بر عهده دارد. پس از آن ژنراتور ۳ و ۵ که کمترین هزینه تولید توان را دارند و در نهایت ژنراتورهای ۲ و ۶ در تولید توان مشارکت داده شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود ژنراتور ۱ که گرانترین ژنراتور می‌باشد، در هیچ ساعتی در تولید توان مشارکت داده نشده‌اند. از طرف دیگر، ژنراتور ۴ که ارزانترین ژنراتور می‌باشد تأمین ذخیره موردنیاز سیستم در تمام ساعات را به عهده دارد. که در این اختصاص حداکثر و حداقل ظرفیت تولید توان واحد رعایت شده است.

۴-۴- جمع‌بندی

در این فصل نتایج عددی برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با مشارکت توان بادی با معیار امنیت تصادفی بر روی شبکه سه شینه و شبکه نمونه IEEE-RTS مورد تحلیل قرار گرفت. جهت نشان دادن کارایی روش بهینه‌سازی تصادفی، برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره‌چرخان با مشارکت توان بادی با معیار امنیت قطعی [۵۶ و ۲۰] نیز انجام شد و نتایج آن با معیار بهینه‌سازی تصادفی مقایسه گردید. در ادامه، مشارکت بارهای قابل قطع در تأمین ذخیره نیز مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج به دست آمده تحلیل گردید. همچنین نتایج برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم با در نظر گرفتن محدودیت بیشینه میزان آلودگی ممکن هر واحد در بازه‌ی برنامه‌ریزی و نیز کاهش همزمان هزینه بهره‌برداری سیستم و آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی توسط بهینه‌سازی چندمنظوره به دو روش وزن-دهی و محدودیت ϵ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

نتیجه گیری و پیشنهادات

فصل پنجم

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با مشارکت تولید توان بادی با روش بهینه‌سازی تصادفی دارای مزایایی نسبت به برنامه‌ریزی به روش قطعی می‌باشد. در ذیل نتایجی که در طی این پروژه بدست آمده، به‌طور مختصر آورده شده است.

✓ تعیین ذخیره موردنیاز سیستم قدرت با مشارکت تولید توان بادی با معیار تصادفی به‌دلیل در نظر گرفتن ماهیت تصادفی سیستم و ارزش بار از دست رفته در هر ساعت، از اختصاص دادن میزان اضافی ذخیره جلوگیری نموده و برای هر ساعت میزان بهینه‌ای از ذخیره را در نظر می‌گیرد. همچنین این میزان ذخیره به قیمت انرژی و میزان بار سیستم در هر ساعت مرتبط می‌باشد.

✓ با استفاده از معیار امنیت تصادفی در تعیین ذخیره موردنیاز سیستم، به دلیل برنامه‌ریزی اقتصادی برای تمامی سناریوهای ممکن باد، بهره‌برداری از سیستم حتی در شرایط تغییر مقدار باد از مقدار پیش‌بینی شده آن به صورت اقتصادی انجام می‌گیرد.

✓ در برنامه‌ریزی تصادفی، به علت تحلیل سناریوهای ممکن باد پیش از شروع دوره برنامه‌ریزی، از آسیب رسیدن به خطوط و حبس ذخیره‌ها در هنگام وقوع یک سناریو جلوگیری می‌شود.

✓ با توجه به منحنی انتشار آلاینده‌های واحدها، این آلاینده‌ها در میزان مشخصی از توان خروجی واحدها کمینه می‌شوند و تولید توان در مقادیر کمتر از این میزان سبب افزایش میزان انتشار آلاینده‌ها می‌شود. از آنجاکه با مشارکت گسترده واحدهای بادی در تولید توان، توان تولیدی واحدهای حرارتی کاهش و در نتیجه انتشار آلاینده‌ها افزایش می‌یابد، در نظر گرفتن میزان انتشار آلاینده‌ها در طی برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم با ضریب نفوذ بالای توان باد، ضروری به نظر می‌رسد.

✓ برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم با هدف کاهش همزمان هزینه بهره‌برداری سیستم و آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندمنظوره سبب کارآمدتر شدن برنامه‌ریزی بهره‌برداری و کاهش انتشار آلاینده‌های هوا توسط نیروگاه‌ها می‌شود.

۵-۲- پیشنهادات

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در زمینه تعیین ذخیره موردنیاز سیستم با مشارکت تولید توان بادی و شناخت مشکلات و کاستی‌های موجود در این زمینه، موارد ارائه شده در ذیل جهت تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:

➤ آرایه مدلی جهت در نظر گرفتن توأم پیشامدهای اتفاقی نظیر برون‌رفت اجزاء سیستم و خطای پیش‌بینی باد در برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره با معیار امنیت تصادفی.

- با مشارکت سمت تقاضا در بازار خدمات جانبی، ظرفیت ذخیره ژنراتورها آزاد شده و از روشن شدن ژنراتورهای گران‌قیمت جلوگیری می‌شود. بررسی کاهش قیمت انرژی در اثر بکارگیری بارهای قابل‌قطع در بازار ذخیره تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.
- انتشار آلاینده‌ها توسط نیروگاه‌ها به‌طور معمول در مناطق مختلف وابسته به شرایط محیطی متفاوت می‌باشد. بنابراین در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن آلودگی تولیدی واحدهای حرارتی، در حین برنامه‌ریزی می‌توان محدودیت‌های متفاوتی را برای آلودگی تولیدی در مناطق مختلف لحاظ کرد. علاوه بر این، می‌توان برای میزان آلودگی تولیدی مجموعه‌ی واحدهای حرارتی موجود در یک ناحیه، محدودیت لحاظ کرد.
- ارایه مدلی جهت در نظر گرفتن چندین نیروگاه بادی در نقاط مختلف شبکه و لحاظ نمودن وابستگی بین تولید آن‌ها در برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره.

فهرست مراجع:

- [1] R. Doherty and M. O'Malley, "A New Approach to Quantify Reserve Demand in Systems with Significant Installed Wind Capacity," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, No. 2, pp. 587–595, May 2005.
- [2] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control," 2nd ed. New York: Wiley, 1996.
- [3] Y. Rebours and D. S. Kirschen, "A survey of definitions and specifications of reserve services," 2005. [Online]. Available: http://www.umist.ac.uk/departments/mcee/research/Publications/uom-survey_reserve_services-2005.pdf.
- [4] L. Sun, Y. Zhang, and C. Jiang, "A matrix real-coded genetic algorithm to the unit commitment problem," *Electric Power Systems Research*, pp. 716–728, 2006.
- [5] M.M. El-saadawi, M.A. Tantawi, E. Twafik, A fuzzy optimization-based approach to large scale thermal unit commitment, *Electr. Power Syst. Res.* 72 (2004) 245–252.
- [6] P. Varaiya, F. Wu, and W. Bialek "Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch" Invited paper.
- [7] International Energy Agency, World Energy Outlook 2009. [Online]. Available: http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_english.pdf
- [8] E. D. Farmer, V. G. Newman and P. H. Ashmole, "Economic and Operational Implications of a Complex of Wind-driven Generators on a Power System," *IET Journals*, Vol. 127, No. 5, June 1980.
- [9] R. A. Schlueter, G. L. Park, M. Lotfalian, H. Shayanfar and J. Dorsey, "Modification of Power System Operation for Significant Wind Generation Penetration," *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. PAS-102, No. 1, Jan 1983.
- [10] S. M. Chan, D. C. Powell, M. Yoshimura and D. H. Curtice, "Operations Requirements of Utilities with Wind Power Generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 2850-2860, Vol. PER-3, Sep. 1983.
- [11] A. K. David, "Incorporation of Large Stochastic Sources in the Power System," *IET Journals*, Vol. 132, No. 4, July 1985.
- [12] M. J. Grubb, "Value of Variable Sources on Power Systems," *IET Journals*, Vol. 138, NO. 2, pp. 149-165, March 1991.
- [13] L. Soder, "Reserve Margin Planning in a Wind-Hydro-Thermal Power System," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 8. No. 2, pp. 564-571, May 1993.
- [14] R. Billinton, Bagen and Y. Cui, "Reliability Evaluation of Small Stand-alone Wind Energy Conversion Systems Using a Time Series Simulation Model," *IET Journals*, Vol. 150, No. 1, pp.96-100, Jan 2003.

- [15] M. Black, G. Strbac, "Value of Bulk Energy Storage for Managing Wind Power Fluctuations," *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 22, No. 1, March 2007.
- [16] B. C. Ummels, M. Gibescu, E. Pelgrum, W.L. Kling and A.J. Brand, "Impacts of Wind Power on Thermal Generation Unit Commitment and Dispatch," *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 22, No. 1, pp. 44-51, March 2007.
- [17] J. Kennedy, B. Fox and D.J. Morrow, "Distributed Generation as a Balancing Resource for Wind Generation," *IET Journals*, Vol.1, pp. 167-174, 2007.
- [18] T. Y. Lee, "Optimal Spinning Reserve for a Wind-Thermal Power System Using EIPSO," *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 22, No. 4, pp. 1612-1621, Nov. 2007.
- [19] R. H. Liang, J. H. Liao, "A Fuzzy-Optimization Approach for Generation Scheduling With Wind and Solar Energy Systems," *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 22, No. 4, pp. 1665-1674, Nov. 2007.
- [20] A. Miguel, Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Should the Spinning Reserve Procurement in Systems with Wind Power Generation be Deterministic or Probabilistic?," *1st International Conference On Supergen*, pp. 1-9, 2008.
- [21] A. Miguel, Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Estimating the Spinning Reserve Requirements in Systems With Significant Wind Power Generation Penetration," *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 24, No. 1, pp. 114-124, Feb. 2009.
- [22] M. A. Ortega-Vazquez, D. S. Kirschen, "Optimizing the Spinning Reserve Requirements Using a Cost/Benefit Analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 22, No. 1, pp. 24-33, Feb. 2007.
- [23] F. Bouffard, F. D. Galiana, "Stochastic Security for Operations Planning With Significant Wind Power Generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 23, No. 2, pp. 306-316, May 2008.
- [24] M. Lu, C. Chang, W. Lee and L. Wang, "Combining the Wind Power Generation System With Energy Storage Equipment," Vol. 45, No. 6, Nov./Dec. 2009.
- [25] J. M. Morales, A. J. Conejo, J. Perez-Ruiz, "Economic Valuation of Reserves in Power Systems with High Penetration of Wind Power," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 93, No. 11, pp. 900-910, Nov. 2009.
- [26] H. Yongxiu, G. Liping and C. Qi, "Study on Value of Lost Load in China Based on Complete Benefit Analysis," *International Power Eng. Conf.*, pp. 682-685, 2007.
- [27] Sustainable Development Commission, "Wind Power in UK: A Guide to the Key Issues Surrounding Onshore Wind Power Development in the UK," 2005.
- [28] S. Saneifard, N. R. Prasad, H. A. Smolleck, 'A Fuzzy Logic Approach to Unit Commitment', *IEEE Transactions on Power System*, Vol.12, No.2, May 1997, pp 988-995.

- [29] A. H. Mantawy, "A genetic-based algorithm for fuzzy unit commitment model," *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, IEEE*, vol. 1, Jul 2000.
- [30] A.H. Mantawy and Y. L. Abdel- Magid, "A New Fuzzy Unit Commitment Model and Solution", 14th Power Systems Computation Conference, June 24-28, 2002, Sevilla, Spain.
- [31] C. Su, Y. Hsu, "Fuzzy dynamic programming: an application to unit commitment", *IEEE transactions on power systems*, Vol.6, No.3, Aug 1991.
- [32] M. M. El-Saadawi, M. A. Tantawi, E. Tawfik, "A fuzzy optimizationbased approach to large scale thermal unit commitment", *Electric power system Research*, Vol.72, Issue.3, Dec 2004.
- [33] H. Yamin, "Fuzzy Self-Scheduling for GENCOS", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, February 2005.
- [34] D. P. Kadam, S. S. Wagh, P. M. Patil, "Thermal Unit Commitment Problem by Using Genetic Algorithm, Fuzzy Logic and Priority List Method," *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications*, vol. 1, pp.468-472, 2007.
- [35] Dudek G. "Adaptive simulated annealing schedule to the unit commitment problem" *Electric Power Systems Research*, Vol 80, Issue 4, pp. 465-472, Apr 2010.
- [36] M. A. khorsand, A. Zakariazadeh, S. Jadid, "Stochastic Wind-thermal Generation Scheduling Considering Emission Reduction: A Multiobjective Mathematical Programming Approach" in *Proc. Of IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC2011)*, Wuhan, China, 25-28 March 2011.
- [37] B. Venkatesh, T. Jamtsho, and H. B. Gooi, "Unit commitment—A fuzzy mixed integer Linear Programming solution," *IET Gen., Transm., Distrib.*, vol. 1, no. 5, pp. 836–846, Sep. 2007.
- [38] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2009*. [Online]. Available: http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_english.pdf
- [39] S. K. Joshi, K. N. Patel, "Real Time Economic Dispatch," *Proc. IEEE, International Conf. on Power Syst. Tech.*, Vol. 3, 2003.
- [40] J. Nanda, L. Hari, M. L. Kothari, "Economic Emission Load Dispatch with Line Flow Constraints Using a Classical Technique," *Proc. IEE.*, Vol. 141, pp. 1–10, 1994.
- [41] V. Vahidi nasab, S. Jadid, "Joint Economic and Emission Dispatch in Energy Markets: A Multiobjective Mathematical Programming Approach," *Energy*, 35 (3), pages 1497-1504, Mar 2010.

- [42] N. Amjady, J. Aghaei and H. A. Shayanfar, “Stochastic Multiobjective Market Clearing of Joint Energy and Reserves Auctions Ensuring Power System Security,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 24, No. 4, pp. 1841–1854, Nov. 2009.
- [43] S. Agrawal, B.K. Panigrahi and M. K. Tiwari, “Multiobjective Particle Swarm Algorithm with Fuzzy Clustering for Electrical Power Dispatch,” *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol. 12, pp. 529–541, 2008.
- [44] Reliability Test System Task Force, “The IEEE reliability test system—1996,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 14, pp. 1010–1020, Aug. 1999.
- [45] C. Wang and S. M. Shahidehpour, “Effects of Ramp-Rate Limits on Unit Commitment and Economic Dispatch,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 8, No. 3, pp. 1341–1350, Aug. 1993.
- [46] O. Alsac, B. Stott, “Optimal Load Flow with Steady-State Security,” *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol: PAS-93, pp. 745-751, 1974.
- [47] GAMS: A User’s Guide, A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman. (2003). [Online]. Available: <http://www.gams.com/> .
- [48] H. Siahkali, “Fuzzy Mid Term Unit Commitment Considering Large Scale Wind Farms,” 2nd *IEEE International Conf. on Power and Energy (PECon 08)*, December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia.
- [49] European Communities “Photovoltaic solar energy: development and current research”, Office for Official Publications of the European Union, 2009.
- [50] A. Barnett, C. Honsberg, D. Kirkpatrick, S. Kurtz, D. Moore, D. Salzman, R. Schwartz, J. Gray, S. Bowden, K. Goossen, M. Haney, D. Aiken, M. Wanlass, and K. Emery, “50% efficient solar cell architectures and designs,” in Proc. IEEE Photovoltaic Energy Conv. Conf., 2006, pp. 2560–2564.
- [51] N. U.S. Energy Information Administration, World Net Geothermal, Solar, Wind and Wood and Waste Electric Power Generation, 1980–2006. [Online]. Available: <http://www.eia.doe.gov/iea/elec.html>.
- [52] J. Wang, N. E. Redondo, and F. D. Galiana, “Demand-side Reserve Offers in Joint Energy/Reserve Electricity Markets,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 4, pp. 1300–1306, Nov. 2003.
- [53] M. A. Ortega-Vazquez, “Optimizing the spinning reserve requirements,” Ph.D. dissertation, Sch. Elect. Electron. Eng., Univ. Manchester, Manchester, U.K., 2006.
- [54] S. Ahmet, Ö. Güler, ” Comparison of Wind Turbine Power Curve Models”, International Renewable Energy Congress, November 5-7, 2010.

[55] F. Bouffard, F. Galiana, and A. Conejo, "Market-clearing with stochastic security—Part I: Formulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, pp. 1818–1826, Nov. 2005.

[56] F. Bouffard, F. Galiana, and A. Conejo, "Market-Clearing with Stochastic Security Part II: Case Studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, pp. 1827–1835, Nov. 2005.

پیوستها

پیوست الف - فهرست نمادها

	(۱) شماره‌ها
شاخص شین‌های سیستم ، از ۱ تا N_B .	n
شاخص واحدهای تولیدی از ۱ تا N_G .	i
شاخص بارها از ۱ تا N_L .	j
شاخص دوره‌های زمانی از ۱ تا N_T .	t
شماره‌ی بلوک‌های انرژی ارایه شده توسط واحدهای تولیدی از ۱ تا N_{Oit} (تعداد بلوک‌های انرژی که توسط واحد i در دوره‌ی زمانی t ارائه شده است).	m
شاخص سناریوهای توان باد، از ۱ تا N_W .	ω
	(۲) متغیرهای پیوسته
هزینه‌ی ناشی راه‌اندازی واحد i در دوره‌ی زمانی t [\$.] C_{it}^{SU} هزینه‌ی راه اندازی واحد i در دوره‌ی زمانی t در سناریو ω می‌باشد.	C_{it}^{SU}
توان خروجی برنامه‌ریزی شده واحد i در دوره‌ی زمانی t [MW].	P_{it}^S
توان خروجی برنامه‌ریزی شده از m امین بلوک انرژی که توسط واحد i در بازه‌ی زمانی t پیشنهاد شده است [MW]. که به $P_{Git}^{\max}(m)$ محدود می‌شود.	$p_{Git}(m)$
توان برنامه‌ریزی شده برای بار j در دوره‌ی زمانی t [MW].	L_{jt}^S
ذخیره‌ی چرخان افزایشی برنامه‌ریزی شده برای واحد i در دوره‌ی زمانی t [MW]. که بیشینه آن $R_{it}^{U,\max}$ می‌باشد.	R_{it}^U
ذخیره‌ی چرخان کاهش‌ی برنامه‌ریزی شده برای واحد i در دوره‌ی زمانی t [MW]. که بیشینه آن $R_{it}^{D,\max}$ می‌باشد.	R_{it}^D
ذخیره‌ی غیرچرخان برنامه‌ریزی شده برای واحد i در دوره‌ی زمانی t [MW]. که حداکثر آن $R_{it}^{NS,\max}$ می‌باشد.	R_{it}^{NS}
توان بادی برنامه‌ریزی شده در دوره‌ی زمانی t [MW].	$P_t^{WP,S}$
هزینه‌ی ناشی از تغییر در برنامه‌ی راه‌اندازی واحد i در دوره‌ی زمانی t و	C_{it}^A

سناریو ω [\$] .	
توان خروجی واحد i در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$P_{it\omega}^G$
توان مصرف شده توسط بار j در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$L_{jt\omega}^C$
ذخیره‌ی چرخان افزایشی تأمین شده توسط واحد i در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$r_{it\omega}^U$
ذخیره‌ی چرخان کاهش‌ی تأمین شده توسط واحد i در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$r_{it\omega}^D$
ذخیره‌ی غیرچرخان تأمین شده توسط واحد i در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$r_{it\omega}^{NS}$
ذخیره تأمین شده از m امین بلوک انرژی که توسط واحد i در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω پیشنهاد شده است [MW].	$r_{Git\omega}(m)$
حذف بار تحمیل شده به مصرف‌کننده j در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$L_{jt\omega}^{shed}$
ریزش تولید توان بادی در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$S_{t\omega}$
توان عبوری از خط (n,r) در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$f_{t\omega}(n,r)$
تلفات توان در خط (n,r) در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [MW].	$P_{t\omega}^{loss}(n,r)$
زاویه‌ی ولتاژ در گره‌ی n و در دوره‌ی زمانی t و سناریو ω [rad].	$\delta_{nt\omega}$
(۳) متغیرهای باینری	
متغیر ۰/۱ که در صورتی معادل ۱ می‌باشد که در برنامه‌ریزی واحد i در دوره‌ی زمانی t در مدار باشد.	u_{it}
متغیر ۰/۱ که در صورتی معادل ۱ می‌باشد که واحد i در دوره‌ی زمانی t و در سناریو ω در مدار باشد.	$v_{it\omega}$
متغیر باینری وضعیت بار قابل قطع	$I_{nt}(\omega)$
(۴) متغیرهای تصادفی	
متغیر تصادفی که تولید توان بادی را در دوره‌ی زمانی t مدل می‌کند [MW].	P_t^{WP}
مقدار این متغیر تصادفی را در سناریو ω بیان می‌کند.	$P_{t\omega}^{WP}$
(۵) ثابت‌ها	

طول دوره‌ی زمانی t [ساعت].	d_t
هزینه‌ی پیشنهادی راه‌اندازی واحد i در دوره‌ی زمانی t [\$]	λ_{it}^{SU}
هزینه‌ی حدی m امین بلوک پیشنهاد انرژی که توسط واحد i در دوره‌ی زمانی t پیشنهاد شده است [\$/MWh].	$\lambda_{Git}(m)$
قیمت پیشنهادی مصرف‌کننده‌ی j در دوره‌ی زمانی t [\$/MWh].	λ_{Ljt}
هزینه‌ی حدی پیشنهاد انرژی ارائه شده توسط نیروگاه بادی در دوره‌ی زمانی t [\$/MWh].	λ_t^{WP}
ارزش بار از دست رفتن برای مصرف‌کننده‌ی j در دوره‌ی زمانی t [\$/MWh].	V_{jt}^{LOL}
هزینه‌ی ریزش توان بادی در دوره‌ی زمانی t [\$/MWh].	V_t^S
احتمال سناریو توان باد ω .	π_ω
کمینه توان خروجی واحد i [MW].	P_i^{\min}
بیشینه توان خروجی واحد i [MW].	P_i^{\max}
مقدار قدرمطلق قسمت غیرحقیقی ادمتیانس خط (n,r) [در مبنای واحد (pu)].	$B(n,r)$
حداکثر ظرفیت خط (n,r) [MW].	$f^{\max}(n,r)$
	۶ مجموعه‌ها
مجموعه‌ی خطوط انتقال	Λ
مجموعه‌ی بارهای واقع در هر شین	M_L
مجموعه‌ی ژنراتورهای واقع در هر شین	M_G

پیوست ب - اطلاعات شبکه‌های نمونه

سیستم ۲۶ واحد استفاده شده جهت آزمایش روش پیشنهادی در این پروژه، مشابه سیستم IEEE-RTS تک ناحیه‌ای می‌باشد [۳۱]. این سیستم شامل ۲۶ واحد تولید با ظرفیت کل تولید ۳۱۰۵ مگاوات می‌باشد. مشخصه‌های این سیستم در جداول ذیل آورده شده است.

جدول (ب-۱): نوع واحدها و هزینه راه‌اندازی آنها

گروه	شماره واحدها	نوع واحد	ظرفیت (MW)	هزینه راه‌اندازی (\$)
A	۵	سوخت فسیلی / بخار	۱۲	۶۸
B	۴	سوخت فسیلی / سیکل ترکیبی	۲۰	۵
C	۴	ذغال سنگ / بخار	۷۶	۶۵۵/۶
D	۳	سوخت فسیلی / بخار	۱۰۰	۵۶۶
E	۴	ذغال سنگ / بخار	۱۵۵	۱۰۴۸/۳
F	۳	سوخت فسیلی / بخار	۱۹۷	۷۷۵
G	۱	سوخت فسیلی / بخار	۳۵۰	۴۴۶۸
H	۲	هسته‌ای	۴۰۰	N/A

جدول (ب-۲): محدودیت‌های تولید واحدهای تولید و ضرایب تابع هزینه درجه دوم

گروه	واحد	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a_i (\$/MW ² h)	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/h)
A	۱	۲/۴	۱۲/۰	۰/۰۲۵۳۳	۲۵/۵۴۷۲	۲۴/۳۸۹۱
	۲	۲/۴	۱۲/۰	۰/۰۲۶۴۹	۲۵/۶۷۵۳	۲۴/۴۱۱۰
	۳	۲/۴	۱۲/۰	۰/۰۲۸۰۱	۲۵/۸۰۲۷	۲۴/۶۳۸۲
	۴	۲/۴	۱۲/۰	۰/۰۲۸۴۲	۲۵/۹۳۱۸	۲۴/۷۶۰۵

ادامه جدول (ب-۲)						
۲۴/۸۸۸۲	۲۶/۰۶۱۱	۰/۰۲۸۵۵	۱۲/۰	۲/۴	۵	
۱۱۷/۷۵۵۱	۳۷/۵۵۱۰	۰/۰۱۱۹۹	۲۰/۰	۴/۰	۶	
۱۱۸/۱۰۸۳	۳۷/۶۶۳۷	۰/۰۱۲۶۱	۲۰/۰	۴/۰	۷	
۱۱۸/۴۵۷۶	۳۷/۷۷۷۰	۰/۰۱۳۵۹	۲۰/۰	۴/۰	۸	B
۱۱۸/۸۲۰۶	۳۷/۸۸۹۶	۰/۰۱۴۳۳	۲۰/۰	۴/۰	۹	
۸۱/۱۳۶۴	۱۳/۳۲۷۲	۰/۰۰۸۷۶	۷۶/۰	۱۵/۲	۱۰	
۸۱/۲۹۸۰	۱۳/۳۵۳۸	۰/۰۰۸۹۵	۷۶/۰	۱۵/۲	۱۱	
۸۱/۴۶۴۱	۱۳/۳۸۰۵	۰/۰۰۹۱۰	۷۶/۰	۱۵/۲	۱۲	C
۸۱/۶۲۵۹	۱۳/۴۰۷۳	۰/۰۰۹۳۲	۷۶/۰	۱۵/۲	۱۳	
۲۱۷/۸۹۵۲	۱۸/۰۰۰۰	۰/۰۰۶۲۳	۱۰۰/۰	۲۵/۰	۱۴	
۲۱۸/۳۳۵۰	۱۸/۱۰۰۰	۰/۰۰۶۱۲	۱۰۰/۰	۲۵/۰	۱۵	D
۲۱۸/۷۷۵۲	۱۸/۲۰۰۰	۰/۰۰۵۹۸	۱۰۰/۰	۲۵/۰	۱۶	
۱۴۲/۷۳۴۸	۱۰/۶۹۴	۰/۰۰۴۶۳	۱۵۵/۰	۵۴/۲۴	۱۷	
۱۴۳/۰۲۸۸	۱۰/۷۱۵۴	۰/۰۰۴۷۳	۱۵۵/۰	۵۴/۲۴	۱۸	
۱۴۳/۳۱۷۹	۱۰/۷۳۶۷	۰/۰۰۴۸۱	۱۵۵/۰	۵۴/۲۴	۱۹	E
۱۴۳/۵۹۷۲	۱۰/۷۵۸۳	۰/۰۰۴۸۷	۱۵۵/۰	۵۴/۲۴	۲۰	
۲۵۹/۱۳۱۰	۲۳/۰۰۰۰	۰/۰۰۲۵۹	۱۹۷/۰	۶۸/۹۵	۲۱	
۲۵۹/۶۴۹۰	۲۳/۱۰۰۰	۰/۰۰۲۶۰	۱۹۷/۰	۶۸/۹۵	۲۲	F
۲۶۰/۱۷۶۰	۲۳/۲۰۰۰	۰/۰۰۲۶۳	۱۹۷/۰	۶۸/۹۵	۲۳	
۱۷۷/۰۵۷۵	۱۰/۸۶۱۶	۰/۰۰۱۵۳	۳۵۰/۰	۱۴۰/۰	۲۴	G
۳۱۰/۰۰۲۱	۷/۴۹۲۱	۰/۰۰۱۹۴	۴۰۰/۰	۱۰۰/۰	۲۵	H
۳۱۱/۹۱۲۰	۷/۵۰۳۱	۰/۰۰۱۹۵	۴۰۰/۰	۱۰۰/۰	۲۶	

جدول (ب-۳): میزان بار سیستم

$p_d^t (MW)$	ساعت	$p_d^t (MW)$	ساعت	$p_d^t (MW)$	ساعت
۲۵۵۰	۱۷	۲۵۴۰	۹	۱۷۰۰	۱
۲۵۳۰	۱۸	۲۶۰۰	۱۰	۱۷۳۰	۲
۲۵۰۰	۱۹	۲۶۷۰	۱۱	۱۶۹۰	۳
۲۵۵۰	۲۰	۲۵۹۰	۱۲	۱۷۰۰	۴
۲۶۰۰	۲۱	۲۵۹۰	۱۳	۱۷۵۰	۵
۲۴۸۰	۲۲	۲۵۵۰	۱۴	۱۸۵۰	۶
۲۲۰۰	۲۳	۲۶۲۰	۱۵	۲۰۰۰	۷
۱۸۴۰	۲۴	۲۶۵۰	۱۶	۲۴۳۰	۸

جدول (ب-۴): مشخصات خطوط شبکه RTS

محدودیت (MVA)	$B(pu)$	$X(pu)$	$R(pu)$	L (Miles)	شین انتهاپی	شین ابتدایی	شماره خط
۱۹۳	۰/۴۶۱	۰/۰۱۴	۰/۰۰۳	۳	۲	۱	۱
۲۰۸	۰/۰۵۷	۰/۲۱۱	۰/۰۵۵	۵۵	۳	۱	۲
۲۰۸	۰/۰۲۳	۰/۰۸۵	۰/۰۲۲	۲۲	۵	۱	۳
۲۰۸	۰/۰۳۴	۰/۱۲۷	۰/۰۳۳	۳۳	۴	۲	۴
۲۰۸	۰/۰۵۲	۰/۱۹۲	۰/۰۵۰	۵۰	۶	۲	۵
۲۰۸	۰/۰۳۲	۰/۱۱۹	۰/۰۳۱	۳۱	۹	۳	۶
۵۱۰	۰	۰/۰۸۴	۰/۰۰۲	۰	۲۴	۳	۷
۲۰۸	۰/۰۲۸	۰/۱۰۴	۰/۰۲۷	۲۷	۹	۴	۸
۲۰۸	۰/۰۲۴	۰/۰۸۸	۰/۰۲۳	۲۳	۱۰	۵	۹
۱۹۳	۲/۴۵۹	۰/۰۶۱	۰/۰۱۴	۱۶	۱۰	۶	۱۰

۲۰۸	۰/۰۱۷	۰/۰۶۱	۰/۰۱۶	۱۶	۸	۷	۱۱
۲۰۸	۰/۰۴۵	۰/۱۶۵	۰/۰۴۳	۴۳	۹	۸	۱۲-۱
ادامه‌ی جدول (ب-۴)							
۲۰۸	۰/۰۴۵	۰/۱۶۵	۰/۰۴۳	۴۳	۱۰	۸	۱۳-۲
۵۱۰	۰	۰/۰۸۴	۰/۰۰۲	۰	۱۱	۹	۱۴
۵۱۰	۰	۰/۰۸۴	۰/۰۰۲	۰	۱۲	۹	۱۵
۵۱۰	۰	۰/۰۸۴	۰/۰۰۲	۰	۱۱	۱۰	۱۶
۵۱۰	۰	۰/۰۸۴	۰/۰۰۲	۰	۱۲	۱۰	۱۷
۶۰۰	۰/۱۰۰	۰/۰۴۸	۰/۰۰۶	۳۳	۱۳	۱۱	۱۸
۶۰۰	۰/۰۸۸	۰/۰۴۲	۰/۰۰۵	۲۹	۱۴	۱۱	۱۹
۶۰۰	۰/۱۰۰	۰/۰۴۸	۰/۰۰۶	۳۳	۱۳	۱۲	۲۰
۶۰۰	۰/۲۰۳	۰/۰۹۷	۰/۰۱۲	۶۷	۲۳	۱۲	۲۱
۶۰۰	۰/۱۸۲	۰/۰۸۷	۰/۰۱۱	۶۰	۲۳	۱۳	۲۲
۶۰۰	۰/۰۸۲	۰/۰۵۹	۰/۰۰۵	۲۷	۱۶	۱۴	۲۳
۶۰۰	۰/۰۳۶	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲	۱۲	۱۶	۱۵	۲۴
۶۰۰	۰/۱۰۳	۰/۰۴۹	۰/۰۰۶	۳۴	۲۱	۱۵	۲۵-۱
۶۰۰	۰/۱۰۳	۰/۰۴۹	۰/۰۰۶	۳۴	۲۱	۱۵	۲۵-۲
۶۰۰	۰/۱۰۹	۰/۰۵۲	۰/۰۰۷	۳۶	۲۴	۱۵	۲۶
۶۰۰	۰/۰۵۵	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳	۱۸	۱۷	۱۶	۲۷
۶۰۰	۰/۰۴۹	۰/۰۲۳	۰/۰۰۳	۱۶	۱۹	۱۶	۲۸
۶۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲	۱۰	۱۸	۱۷	۲۹
۶۰۰	۰/۲۲۱	۰/۱۰۵	۰/۰۱۴	۷۳	۲۲	۱۷	۳۰
۶۰۰	۰/۰۵۵	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳	۱۸	۲۱	۱۸	۳۱-۱
۶۰۰	۰/۰۵۵	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳	۱۸	۲۱	۱۸	۳۱-۲
۶۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۴۰	۰/۰۰۵	۲۷/۵	۲۰	۱۹	۳۲-۱
۶۰۰	۰/۰۸۳	۰/۰۴۰	۰/۰۰۵	۲۷/۵	۲۰	۱۹	۳۲-۲
۶۰۰	۰/۰۴۶	۰/۰۲۲	۰/۰۰۳	۱۵	۲۳	۲۰	۳۳-۱
۶۰۰	۰/۰۴۶	۰/۰۲۲	۰/۰۰۳	۱۵	۲۳	۲۰	۳۳-۲
۶۰۰	۰/۱۴۲	۰/۰۶۸	۰/۰۰۹	۴۷	۲۲	۲۱	۳۴

سیستم استفاده شده جهت آزمایش مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی با هدف کاهش هزینه‌ی بهره‌برداری و آلوده‌کننده‌های هوا در این پروژه، مشابه شبکه ۳۰ شینه IEEE می‌باشد [۴۱]. این سیستم شامل ۶ واحد تولیدی می‌باشد. ضرایب تولید آلودگی واحدها در جدول (ب-۵) آمده است.

جدول (ب-۵): ضرایب تولید آلودگی واحدها

NO _x		SO _x			ژنراتورها
λ_i	ζ_i	$\gamma_i(\times 10^{-2})$	$\beta_i(\times 10^{-2})$	$\alpha_i(\times 10^{-2})$	
۲/۸۵۷	$۲/۰ \times ۱۰^{-۴}$	۶/۴۹۰	-۵/۵۵۴	۴/۰۹۱	۱
۳/۳۳۳	$۵/۰ \times ۱۰^{-۴}$	۵/۶۳۸	-۶/۰۴۷	۲/۵۴۳	۲
۸/۰۰۰	$۱/۰ \times ۱۰^{-۶}$	۴/۵۸۶	-۵/۰۹۴	۴/۲۵۸	۳
۲/۰۰۰	$۲/۰ \times ۱۰^{-۳}$	۳/۳۸۰	-۳/۵۵۰	۵/۳۲۶	۴
۸/۰۰۰	$۱/۰ \times ۱۰^{-۶}$	۴/۵۸۶	-۵/۰۹۴	۴/۲۵۸	۵
۶/۶۶۷	$۱/۰ \times ۱۰^{-۵}$	۵/۱۵۱	-۵/۵۵۵	۶/۱۳۱	۶

همچنین سهم بار هر شین از بار ساعتی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

جدول (ب-۶): درصد بار هر شین از بار کل در شبکه‌ی ۳۰ شینه IEEE

شین	درصد بار	شین	درصد بار	شین	درصد بار	شین	درصد بار	شین	درصد بار
۱	۰	۲	۷/۷	۳	۰/۸	۴	۲/۷	۵	۳۳/۲
۶	۰	۷	۸	۸	۱۰/۶	۹	۰	۱۰	۲
۱۱	۰	۱۲	۴	۱۳	۰	۱۴	۲/۲	۱۵	۲/۹
۱۶	۱/۲	۱۷	۳/۲	۱۸	۱/۱	۱۹	۳/۴	۲۰	۰/۸
۲۱	۶/۲	۲۲	۰	۲۳	۱/۱	۲۴	۳/۱	۲۵	۰
۲۶	۱/۲	۲۷	۰	۲۸	۰	۲۹	۰/۸	۳۰	۳/۷

Abstract

Limitation in fossile resources is the challenging issue of governments in the recent decades. As a result the government intend to reduce the use of fossile resources and increase the use of renewable resources. such as wind power that draws attention the electric utility in order to generate electric power.

In this thesis, a stochastic optimization model for unit commitment scheduling in order to determine hourly power production of each unit has been used, this scheduling has been performed with consideration of unit constraints and transmission line power flow limit. In this project, the level of wind has been assumed as a normal probability distribution function which has been modeled by scenario tree. The probability of each scenario and the value of loss load are also considered in the objective function. Unit commitment programming has been done applying fuzzy optimization with consideration of load uncertainty and the uncertainty of wind power production. In addition, the impact of wind presence on thermal unit emission have been investigated and a multi objective programming approach for considering both objective functions of cost and emission is proposed. Unit commitment scheduling with stochastic security criterion has been examined on a 3-bus example system and IEEE-RTS system. Unit commitment scheduling with the aim of simultaneously reducing the operational cost and emission of thermal units has been performed on the IEEE 30-bus test system and IEEE-RTS system. Also the proposed fuzzy optimization method has been simulated on the IEEE 30 bus system. Simulation results indicate that the proposed methods have better results compared to the previous methods.

Keywords: Emission, Mix-integer linear programming, Multi objective programming, stochastic optimization, Fuzzy optimization, Reserve



Shahrood university of technology

Department of Electrical and robotic

Power electrical engineering faculty

**Use of wind power plant in power
system considering stochastic security
criterion**

Author:

Omid Ghods

Supervisor:

Mahdi Banejad

Advisor:

Mohsen Asili

July 2011

