

تحلیل تصادفی و تسویه‌ی بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع بادی با استفاده از برنامه‌ریزی ترکیبی خطی - عدد صحیح و شاخص‌های ریسک VaR و CVaR
هدایت صبوری^۱، رضا همتی^۲، مهدی احمدی جیردهی^۳

۱- مربی، گروه مهندسی برق- دانشکده انرژی- دانشگاه صنعتی کرمانشاه- کرمانشاه- ایران

h.saboori@kut.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی برق- دانشکده انرژی- دانشگاه صنعتی کرمانشاه- کرمانشاه- ایران

r.hemmati@kut.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی برق- دانشکده انرژی- دانشگاه صنعتی کرمانشاه- کرمانشاه- ایران

m.ahmadi@kut.ac.ir

چکیده: با وجود واحدهای بادی در بازار برق و به دلیل عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی توان بادی، برنامه‌ریزی بازار در یک چهارچوب تصادفی انجام می‌شود. مزیت اصلی مسئله‌ی تصادفی نسبت به نوع معین این است که تصمیم‌گیری‌های بهینه، مقدار امید ریاضی تابع هدف را بهینه می‌کنند؛ اما علیرغم وجود این مزیت در برنامه‌ریزی تصادفی، عیب اصلی آن در نظر نگرفتن دیگر پارامترهای نشان‌دهنده‌ی توزیع احتمال تابع هدف است که در قالب مفهوم ریسک این پارامترها در مسئله لحاظ خواهند شد. در این مقاله مسئله‌ی حداکثر سازی سود باقیمانده از تسویه‌ی بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره برای بهره‌بردار مستقل سیستم و در عین حال حداقل هزینه‌های بهره‌برداری از واحدهای حرارتی با حضور واحدهای بادی و با در نظر گرفتن مفهوم ریسک مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی ترکیبی خطی - عدد صحیح (MILP) و با در نظر گرفتن شاخص‌های ریسک ارزش درخطر (VaR) و ارزش درخطر شرطی (CVaR) جهت ارزیابی میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار است. **واژه‌های کلیدی:** ارزش درخطر (VaR)، ارزش درخطر شرطی (CVaR)، برنامه‌ریزی ترکیبی خطی - عدد صحیح (MILP)، برنامه‌ریزی تصادفی، بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره، عدم قطعیت منابع بادی.

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۱۱/۱۴

نام نویسنده مسئول : هدایت صبوری

نشانی: ایران- کرمانشاه- میدان آزادگان- ابتدای شهرک صدرا

دانشگاه صنعتی کرمانشاه - گروه مهندسی برق.

واژه‌نامه		
مجموعه‌ها	S_n^0	حالت اولیه در مدار قرار گرفتن واحد n
L	T_n^D	تعداد دوره‌هایی که واحد n به دلیل قید حداقل زمان توقف، بایستی در ابتدا خاموش باشد.
M	$T_n^{D_0}$	تعداد دوره‌هایی که واحد n قبل از اولین بازه زمانی (در انتهای بازه زمانی صفر) خاموش بوده است.
N	T_n^{H-C}	تعداد ساعات لازم برای تغییر روش راه‌اندازی واحد n از گرم به سرد
T	$S_{n,t}$	متغیر دودویی که در صورت روشن بودن واحد n در بازه زمانی t برابر با یک و در غیر این صورت صفر است.
Ω	$T_{n,t}^D$	تعداد بازه‌های زمانی که واحد n قبل از راه‌اندازی در بازه زمانی t خاموش بوده است.
ثابت‌ها	T_n^{MD}	حداقل زمان توقف واحد n
C_n^{CSU}	T_n^{MU}	حداقل زمان کار واحد n
C_n^{HSU}	T_n^U	تعداد دوره‌هایی که واحد n به دلیل قید حداقل زمان کار، بایستی در ابتدا روشن باشد.
C_n^{SD}	$T_n^{U_0}$	تعداد دوره‌هایی که واحد n قبل از اولین بازه زمانی (در انتهای بازه زمانی صفر) روشن بوده است.
$C_{n,l}^{SU}$	α_n	ضریب ثابت تابع هزینه تولید درجه دوم واحد n
C_t^{LS}	β_n	ضریب درجه اول تابع هزینه تولید درجه دوم واحد n
C_t^{PD}	γ_n	ضریب درجه دوم تابع هزینه تولید درجه دوم واحد n
C_t^{WS}	$\lambda_{n,m}$	شیب بلوک m از تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد n
CD_t^{DRB}	π_{ω}	احتمال رخداد سناریوی ω
CD_t^{DRD}	φ	درصدی از سناریوها با سود بیشتر از δ
CD_t^{URB}	θ	ضریب وزن دهی به امید سود و ریسک سود
CD_t^{URD}	متغیرها	
CG_n^{DRB}	$C_{n,t}^D$	هزینه توقف واحد n در بازه زمانی t
CG_n^{DRD}	$C_{n,t}^G$	هزینه تولید واحد n در بازه زمانی t
CG_n^{URB}	$C_{n,t}^U$	هزینه راه‌اندازی واحد n در بازه زمانی t
CG_n^{URD}	$C_{n,t}^{RB}$	مجموع هزینه‌های بلوک‌های ذخیره واحد n و بار در بازه زمانی t
Cte	C^{RT}	مجموع هزینه‌های ذخیره‌های متعادل‌کننده تأمین‌شده توسط واحدها و بار و هزینه‌های قطع بار و باد در حالت زمان حقیقی
k_n	$P_{m,n,t}^{PL}$	توان تولیدشده در بلوک m از تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد n در بازه زمانی t
N_n^{GC}	$C_{n,t}^D$	هزینه توقف واحد n در بازه زمانی t
N_n^{SUC}	$C_{n,t}^G$	هزینه تولید واحد n در بازه زمانی t
P_n^{SDR}	$C_{n,t}^U$	هزینه راه‌اندازی واحد n در بازه زمانی t
P_n^{SUR}	$C_{n,t}^{RB}$	مجموع هزینه‌های بلوک‌های ذخیره واحد n و بار در بازه زمانی t
P_n^{RD}	C^{RT}	مجموع هزینه‌های ذخیره‌های متعادل‌کننده تأمین‌شده توسط واحدها و بار و هزینه‌های قطع بار و باد در حالت زمان حقیقی
P_n^{RU}	$P_{m,n,t}^{PL}$	توان تولیدشده در بلوک m از تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد n در بازه زمانی t
PD_t^{Base}	$C_{n,t}^D$	هزینه توقف واحد n در بازه زمانی t
PD_t^{Max}	$C_{n,t}^G$	هزینه تولید واحد n در بازه زمانی t
PD_t^{Min}	$C_{n,t}^U$	هزینه راه‌اندازی واحد n در بازه زمانی t
PG_n^{Max}	$C_{n,t}^D$	هزینه توقف واحد n در بازه زمانی t
PG_n^{Min}	$C_{n,t}^G$	هزینه تولید واحد n در بازه زمانی t
PW_t	$C_{n,t}^U$	هزینه راه‌اندازی واحد n در بازه زمانی t
$PW_{t,\omega}^{Er}$		خطای پیش‌بینی توان بادی در بازه زمانی t و سناریوی ω

ناکارآمدی و عدم توانایی دولت‌ها در تأمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری صنعت برق، این صنعت را به سمت خصوصی‌سازی سوق داده است. در نتیجه‌ی تجدید ساختار^۱، صنعت برق که در دوره‌ای طولانی با شرکت‌های یکپارچه با ساختار عمودی^۲ اداره می‌شد، به صنعتی رقابتی تبدیل شد. از دیگر نتایج مقررات زدایی، شکل‌گیری بازار آزاد و رقابتی برای برق و ایجاد نهادهای مختلف با وظایف گوناگون بود. یکی از بهترین راهکارها جهت تسویه‌ی بازار برق^۳ به کارگیری بازار مبتنی بر سیستم حوضچه (بازار اشتراکی^۴) است. لازم به ذکر است که بهترین راهکار جهت جبران نامتعادلی‌های موجود میان توان‌های تولیدی و مصرفی در زمان حقیقی به کارگیری بازار زمان حقیقی^۵ است؛ بازار زمان حقیقی برای خرید و فروش ذخیره‌های افزایشی و کاهش‌ی شده توسط واحدهای حرارتی و بار در لحظه تحویل انرژی تشکیل می‌شود. در نتیجه هدف نهایی، تسویه هم‌زمان بازار انرژی و ذخیره خواهد بود [۶-۳].

با وجود واحدهای بادی در سیستم و به دلیل عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی توان بادی، برنامه‌ریزی سیستم به صورت تصادفی^۶ انجام خواهد شد. مزیت اصلی مسئله‌ی تصادفی نسبت به نوع معین این است که تصمیم‌گیری‌های بهینه، مقدار امید ریاضی تابع هدف را بهینه می‌کنند؛ اما علی‌رغم وجود این مزیت در برنامه‌ریزی تصادفی، عیب اصلی آن در نظر نگرفتن دیگر پارامترهای نشان‌دهنده توزیع احتمال تابع هدف است. مشکل اصلی صرف‌نظر نمودن از ریسک^۷ در مسائل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مانند مسئله‌ی تسویه‌ی هم‌زمان بازار انرژی و ذخیره این است که مقادیر بهینه‌ی متغیرهای تصمیم‌گیری ممکن است حداکثر مقدار امید سود را به قیمت وجود سودهای بسیار پایین در بعضی از سناریوهای نامطلوب نتیجه دهند [۸ و ۷]. بنابراین هدف، کنترل ریسک وجود سودهای پایین برای بهره‌بردار مستقل سیستم در مسئله‌ی تسویه‌ی هم‌زمان بازار انرژی و ذخیره است. شناخته‌شده‌ترین شاخص‌های ریسک موجود عبارت‌اند از: ارزش درخطر (VaR)^۸ و ارزش درخطر شرطی (CVaR)^۹.

تاکنون مطالعاتی در زمینه‌ی به کارگیری مفهوم ریسک در

$C_{n,t}^{RB}$	مجموع هزینه‌های بلوک‌های ذخیره واحد n و بار در بازه زمانی t
C^{RT}	مجموع هزینه‌های ذخیره‌های متعادل‌کننده تأمین‌شده توسط واحدها و بار و هزینه‌های قطع بار و باد در حالت زمان حقیقی
$P_{m,n,t}^{PL}$	توان تولیدشده در بلوک m از تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد n در بازه زمانی t
$P_{t,\omega}^{LS}$	بار قطع‌شده در بازه زمانی t و سناریوی ω
$P_{t,\omega}^{WS}$	توان بادی قطع‌شده در بازه زمانی t و سناریوی ω
PD_t	تقاضای بار در بازه زمانی t
PD_t^{DRB}	بلوک ذخیره کاهش‌ی بار در بازه زمانی t
PD_t^{URB}	بلوک ذخیره افزایش‌ی بار در بازه زمانی t
$PD_{t,\omega}^{DRD}$	ذخیره کاهش‌ی زمان حقیقی بار در بازه زمانی t و سناریوی ω
$PD_{t,\omega}^{URD}$	ذخیره افزایش‌ی زمان حقیقی بار در بازه زمانی t و سناریوی ω
$PD_{t,\omega}^{Sch}$	تقاضای بار برنامه‌ریزی‌شده در بازه زمانی t
$PG_{n,t}$	توان تولیدی واحد n در بازه زمانی t
$PG_{n,t}^{DRB}$	بلوک ذخیره کاهش‌ی واحد n در بازه زمانی t
$PG_{n,t}^{URB}$	بلوک ذخیره افزایش‌ی واحد n در بازه زمانی t
$S_{n,t}$	متغیر دودویی که در صورت روشن بودن واحد n در بازه زمانی t برابر با یک و در غیر این صورت صفر است.
$T_{n,t}^D$	تعداد بازه‌های زمانی که واحد n قبل از راه‌اندازی در بازه زمانی t خاموش بوده است.
δ	ارزش درخطر (VaR)
σ_ω	متغیر دودویی کمکی مربوط به محاسبه VaR
ξ_ω	متغیر پیوسته‌ی کمکی مربوط به محاسبه CVaR

۱- مقدمه

باد یکی از منابع عمده انرژی‌های تجدید پذیر است که به علت داشتن ویژگی‌هایی همچون چرخه کوتاه‌مدت تجدید پذیری، قابلیت دسترسی بالا، قابلیت نصب و راه‌اندازی سریع و همچنین نداشتن آلاینده‌گی و تأثیر منفی بر اکوسیستم، از جمله مطلوب‌ترین گزینه‌های تولید انرژی در دهه‌های آینده محسوب می‌شود؛ اما مشکل اصلی منابع بادی، چگالی انرژی پایین و ساختار متغیر آن‌هاست [۲ و ۱].

از طرف دیگر در بسیاری از کشورها مسائل ناشی از

محدودیت‌های مربوط به مشارکت واحدهای حرارتی انجام خواهد شد؛ زیرا روش پیشنهادی مانع از روشن یا خاموش شدن غیرضروری واحدها شده و در نتیجه قیمت پیشنهادی آن‌ها جهت فروش توان را کاهش خواهد داد و در عین حال محدودیت‌های فنی آن‌ها را نیز برآورده می‌نماید. همچنین در مدل پیشنهادی، منابع بادی و عدم قطعیت مربوط به توان تولیدی آن‌ها نیز با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای در نظر گرفته خواهد شد؛ خطای پیش‌بینی توان تولیدی واحدهای بادی نیز به صورت یک توزیع احتمال نرمال در نظر گرفته خواهد شد. توان تولیدی واحدهای بادی و تقاضای بار نیز قابلیت قطع شدن را دارا می‌باشند. علاوه بر این ذخیره‌های چرخان جهت برقراری تعادل میان توان‌های تولیدی و مصرفی در زمان حقیقی توسط واحدهای حرارتی و بار تأمین خواهند شد. سیستم مورد مطالعه متشکل از پنج واحد حرارتی و یک واحد بادی بوده و برنامه‌ریزی واحدها در محیط نرم‌افزار GAMS انجام می‌شود.

۲- مفاهیم ریاضی

همان‌طور که اشاره شد در این مقاله به دلیل عدم قطعیت توان تولیدی واحدهای بادی از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده خواهد شد. علاوه بر این برای ایجاد تعادل میان سود حاصله برای بهره‌بردار و ریسک سود حاصله، مفهوم ریسک و شاخص‌های ارزش درخطر و ارزش درخطر شرطی به کار برده می‌شوند.

۲-۱- برنامه‌ریزی تصادفی

اگر اطلاعات ورودی یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مانند مسئله‌ی تسویه بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره، کاملاً معلوم و قطعی باشند، حل بهینه‌ی آن با حل مسئله‌ی قطعی به دست می‌آید. با این وجود اکثر اوقات پارامترهای ورودی مثل توان تولیدی واحدهای بادی دارای عدم قطعیت بوده اما توسط توابع توزیع احتمال قابل بیان هستند. در نتیجه‌ی پارامترهای ورودی غیرقطعی، تابع هدف (سود) حاصل غیرخطی بوده و لازم است به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شود.

بازارهای برق و دیگر مباحث مرتبط با آن‌ها انجام شده است. در [۹] یک مدل پخش بار بهینه با در نظر گرفتن واحدهای بادی و توان خروجی متغیر آن‌ها در یک بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین مفهوم ریسک با در نظر گرفتن شاخص ارزش درخطر در مسئله لحاظ شده و روش حل مسئله الگوریتم تجمع ذرات است. نویسندگان [۱۰] از یک مدل ترکیبی غیرخطی - عدد صحیح جهت انجام برنامه‌ریزی بهینه‌ی واحدهای آبی در بازار برق و در بازه‌ی زمانی کوتاه مدت استفاده کرده‌اند. در این مطالعه عدم قطعیت قیمت‌ها در بازار با استفاده از تعریف سناریوها در مسئله لحاظ شده است. شاخص ارزش درخطر شرطی نیز برای کنترل ریسک هزینه استفاده شده است. در [۱۱] سه نوع مدل بهینه‌سازی جهت تعیین استراتژی قیمت دهی واحدهای آبی و بادی در بازار برق پیشنهاد شده است. مفهوم ریسک نیز با در نظر گرفتن شاخص ارزش درخطر شرطی در مسئله لحاظ شده است. نویسندگان [۱۲] حداکثر سازی سود واحدهای بادی در بازار برق را در قالب مفهوم برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای با لحاظ کردن شاخص ارزش درخطر شرطی در فرمول‌بندی مسئله مورد بررسی قرار داده‌اند. در [۱۳] نیز بهره‌برداری بهینه از یک ذخیره‌ساز انرژی با در نظر گرفتن هزینه‌های تبادل انرژی با شبکه و مفهوم ریسک جهت کنترل هزینه‌های بهره‌برداری مورد مطالعه قرار گرفته است؛ شاخص ریسک مورد استفاده نیز شاخص ارزش درخطر شرطی است.

در این مقاله مسئله‌ی حداکثر سازی سود باقیمانده از تسویه بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره برای بهره‌بردار مستقل سیستم و در عین حال حداقل هزینه‌های واحدهای حرارتی با حضور واحدهای بادی و با در نظر گرفتن مفهوم ریسک مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. شاخص‌های ریسک ارزش درخطر و ارزش درخطر شرطی جهت ارزیابی میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار در فرمول‌بندی مسئله در نظر گرفته خواهند شد. هدف از به کارگیری این شاخص‌ها، کنترل ریسک وجود سناریوهایی با مقدار سود پایین برای بهره‌بردار مستقل سیستم خواهد بود. حداقل هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی نیز با در نظر گرفتن هزینه‌های تولید، راه‌اندازی و توقف واحدهای حرارتی و

تصمیم‌گیری‌ها به هر یک از تحقق‌های فرآیند تصادفی بستگی دارند. در اینجا متغیرهای مرحله دوم شامل ذخیره‌های متعادل‌کننده زمان حقیقی خریداری شده از واحدهای تولیدی و بار و توان قطع شده‌ی باد و بار هستند [۷].

۲-۲- ریسک و شاخص‌های اندازه‌گیری آن

در مسئله‌ی تسویه هم‌زمان بازار انرژی و ذخیره، کنترل ریسک وجود سودهای پایین در برخی سناریوهای نامطلوب برای بهره‌بردار مستقل سیستم امری ضروری است. اگر متغیر تصادفی $P(x, \omega)$ نشان‌دهنده مقدار سود در هر سناریو باشد (x نشان‌دهنده بردار متغیرهای تصمیم‌گیری و ω نشان‌دهنده بردار متغیرهای تصادفی است)، آنگاه عبارت $\{P(x, \omega)\}$ یک عدد حقیقی بیان‌کننده مقدار ریسک سود است و به‌عنوان شاخص ریسک شناخته می‌شود. چگونگی در نظر گرفتن شاخص ریسک فوق در یک مسئله با برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای در رابطه (۳) نشان داده شده است:

$$\text{Maximize}_{x, y(\omega)} (1-\theta) \cdot \varepsilon_{\omega} \{P(x, \omega)\} + \theta \cdot r_{\omega} \{P(x, \omega)\} \quad (1)$$

در این رابطه θ یک پارامتر وزن دهی با مقداری بین صفر و یک است که برای ایجاد تعادل میان امید سود و ریسک سود در مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به رابطه‌ی فوق با افزایش مقدار پارامتر θ ، اهمیت ریسک سود نسبت به امید سود از نظر بهره‌بردار بیشتر خواهد شد.

ارزش درخطر (VaR) یکی از اصلی‌ترین شاخص‌های اندازه‌گیری ریسک است و به‌عنوان ریسک وجود سودهای با مقداری کمتر از یک مقدار ثابت در سناریوها در نظر گرفته می‌شود. از همین رو این شاخص از شاخص‌های اندازه‌گیری ریسک متقارن مانند واریانس کارآمدتر است؛ زیرا در صورت استفاده از شاخصی چون واریانس، سودهای بسیار بالا و بسیار پایین هر دو حذف می‌شوند که طبیعتاً حذف سودهای بسیار بالا مطلوب نخواهد بود. فرض می‌کنیم مقادیر ممکن برای سود در سناریوهای مختلف (متغیر تصادفی $P(x, \omega)$) در مجموعه‌ای مانند R واقع شده و

در چنین شرایطی، راه‌حل حداقل کردن مقدار امید ریاضی تابع هدف (سود) است. برنامه‌ریزی تصادفی برای فرمول‌بندی و حل مسائلی با پارامترهای غیرقطعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در قالب مفهوم برنامه‌ریزی تصادفی هر پارامتر غیرقطعی به‌عنوان یک متغیر تصادفی مدل‌سازی می‌شود. از نظر محاسباتی یک فرآیند تصادفی توسط مجموعه‌ای محدود از سناریوها به‌صورت مناسبی تعریف می‌شود و احتمال وقوع هر سناریو مقداری مشخص است.

یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری دومرحله‌ای (مسئله‌ی تسویه‌ی بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره) را در حالت کلی در نظر می‌گیریم که در آن فرآیند تصادفی λ (توان تولیدی واحدهای بادی) توسط مجموعه‌ی سناریوهای λ_{ω} نشان داده می‌شود. فرض می‌شود که دو متغیر تصمیم‌گیری متفاوت به نام‌های x و y در این مسئله وجود دارند. تصمیم‌گیری متغیر x قبل از تحقق فرآیند تصادفی λ انجام می‌شود؛ درحالی‌که y بعد از تحقق مقدار λ تعیین می‌شود. در نتیجه تصمیم‌گیری متغیر y به تصمیم‌گیری متغیر x که قبلاً انجام شده و تحقق $\lambda(\omega)$ فرآیند تصادفی λ وابسته است؛ بنابراین می‌توان y را به‌صورت $y(x, \omega)$ بیان نمود. فرآیند تصمیم‌گیری به‌صورت زیر است:

۱- تصمیم‌گیری متغیر x انجام می‌شود.

۲- فرآیند تصادفی λ به‌صورت $\lambda(\omega)$ تحقق می‌یابد.

۳- تصمیم‌گیری متغیر $y(x, \omega)$ انجام می‌شود.

در این فرآیند تصمیم‌گیری دو نوع تصمیم‌گیری متفاوت در نظر گرفته می‌شوند:

۱- تصمیم‌گیری‌های مرحله‌ی اول: این تصمیم‌گیری‌ها قبل از تحقق فرآیند تصادفی اتخاذ می‌شوند. بنابراین متغیرهای نشان‌دهنده تصمیم‌گیری‌های مرحله اول به هر یک از تحقق‌های فرآیند تصادفی وابسته نیستند. در این مقاله متغیرهای مرحله‌ی اول شامل تقاضای بار مصرف‌کنندگان، هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی و بلوک‌های ذخیره‌ی خریداری شده از واحدهای تولیدی و بار می‌باشند.

۲- تصمیم‌گیری‌های مرحله دوم: این تصمیم‌گیری‌ها پس از تحقق فرآیند تصادفی اتخاذ می‌گردند. در نتیجه این

ضمناً با توجه به توضیحات ذکر شده، استفاده از شاخص CVaR نسبت به شاخص VaR رایج‌تر است؛ اما در این مقاله هر دو شاخص به‌عنوان مکمل یکدیگر مورد بررسی قرار خواهند گرفت [۱۴].

۳- فرمول‌بندی مسئله

در این مقاله مسئله‌ی حداکثر سازی سود باقیمانده از تسویه بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره برای بهره‌بردار مستقل سیستم و در عین حال حداقل هزینه‌های واحدهای حرارتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شاخص‌های ریسک ارزش درخطر و ارزش درخطر شرطی به‌صورت عباراتی در تابع هدف مسئله اضافه می‌شوند. علاوه بر این جهت مدل‌سازی عدم قطعیت واحدهای بادی از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده می‌شود. همچنین به دلیل استفاده از متغیرهای دودویی جهت نشان دادن حالت روشن یا خاموش واحدهای حرارتی، برنامه‌ریزی مسئله به‌صورت ترکیبی خطی - عدد صحیح است. هزینه‌های تولید، راه‌اندازی و توقف واحدهای حرارتی و محدودیت‌های مربوط به مشارکت واحدهای حرارتی نیز در نظر گرفته می‌شوند. همچنین خدمات جانبی شامل ذخیره‌های سمت تولید و تقاضا جهت متعادل‌سازی زمان حقیقی توان‌ها در فرمول‌بندی مسئله لحاظ می‌شوند.

۳-۱- تابع هدف

در مسئله‌ی تسویه بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره و بدون در نظر گرفتن مفهوم ریسک تابع هدف مطابق با رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شود:

$$\left(\sum_{t \in T} C_t^{PD} \times PD_t \right) - C^{RT} - \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (C_{n,t}^G + C_{n,t}^U + C_{n,t}^D + C_{n,t}^{RB}) \quad (5)$$

با لحاظ نمودن شاخص ارزش درخطر (VaR) در تابع هدف مسئله، رابطه (۵) به‌صورت رابطه (۶) اصلاح می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن شاخص VaR در مسئله قیدهایی مطابق با روابط (۷) و (۸) به فرمول‌بندی مسئله اضافه می‌شوند:

متغیر تصادفی ω دارای تابع چگالی احتمال $\pi(\omega)$ باشد. در این صورت احتمال اینکه مقدار سود در هر سناریو بیشتر از مقدار ثابت δ باشد برابر است با:

$$\psi(x, \delta) = \int_{P(x, \omega) \geq \delta} \pi(\omega) \cdot d(\omega) \quad (2)$$

$\psi(x, \delta)$ تابع چگالی احتمال تجمعی مربوط به متغیر تصمیم‌گیری x است. برای متغیر تصادفی $P(x, \omega)$ مقدار شاخص VaR به ازای احتمال مشخص ϕ (در بازه ۱ و ۰) به‌صورت رابطه (۳) است:

$$\text{VaR}_{\phi}(x, \omega) = \min \{ \delta \in R : \psi(x, \delta) \geq \phi \} \quad (3)$$

به‌عبارت‌دیگر شاخص VaR یا همان متغیر δ مقدار سودی را به دست می‌دهد که ϕ درصد سودهای حاصله در سناریوها از آن مقدار بیشتر خواهند بود ($1 - \phi$) درصد سودها از δ کمتر خواهند بود). با این وجود هنگامی که توزیع متغیر تصادفی $P(x, \omega)$ نرمال نباشد، شاخص VaR ناپایدار بوده و کار با آن از نظر محاسباتی مشکل خواهد بود. به‌علاوه، این شاخص مقادیر سودی را که کمتر از δ باشند کنترل نمی‌کند.

دیگر شاخص ریسک که مقادیر سود را در سناریوهایی با سود کمتر از مقدار VaR کنترل می‌کند ارزش درخطر شرطی (CVaR) نام دارد؛ این شاخص امید ریاضی سودها را در سناریوهایی با سود کمتر از مقدار شاخص VaR محاسبه می‌کند. مقدار شاخص CVaR برای متغیر تصادفی $P(x, \omega)$ به ازای احتمال مشخص ϕ (در بازه ۱ و ۰) در رابطه‌ی (۴) آمده است:

$$\text{CVaR}_{\phi}(x, \omega) = (1 - \phi)^{-1} \int_{P(x, \omega) \leq \text{VaR}_{\phi}(x, \omega)} P(x, \omega) \times \pi(\omega) \cdot d\omega \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴)، احتمال برقراری نامساوی

$P(x, \omega) \leq \text{VaR}_{\phi}(x, \omega)$ برابر است با $(1 - \phi)$. به‌عبارت‌دیگر شاخص CVaR مقدار امید ریاضی سودها را در $(1 - \phi)$ درصد از کل سناریوها که دارای کم‌ترین سودها هستند به دست می‌دهد. به‌عنوان نمونه $\text{CVaR}_{80\%}$ عبارت است از امید ریاضی سودهایی با مقداری کمتر از $\text{VaR}_{80\%}$.

بوده و برابر با تفاضل سود هر یک از سناریوها و مقدار δ است.

مقدار امید ریاضی سود باقیمانده برای بهره‌بردار مستقل سیستم در توابع هدف بیان شده در روابط (۶) و (۹) به صورت تفاضل درآمد ناشی از فروش توان به بار و مجموع هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی، هزینه بلوک‌های ذخیره و امید هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی توان‌ها تعریف می‌شود. تقاضای بار مصرف‌کنندگان نیز به صورت متغیری انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی به صورت مجموع هزینه‌های تولید توان، راه‌اندازی و توقف آن‌ها در نظر گرفته شده است. تابع هزینه تولید هر واحد معمولاً به صورت یک تابع غیرخطی و درجه دوم از توان خروجی واحد بیان می‌شود، درحالی‌که تابع هزینه راه‌اندازی واحد عموماً به صورت یک تابع غیرخطی و نمایی از ساعت‌های توقف قبل از راه‌اندازی واحد مدل می‌شود. بنابراین تابع هدف فوق غیرخطی بوده و حل آن با روش‌های معمول دشوار است. در نتیجه یک تقریب خطی از توابع غیرخطی هزینه تولید و راه‌اندازی واحدها در نظر گرفته می‌شود. تابع هزینه تولید درجه دوم هر واحد معمولاً به صورت رابطه‌ی (۱۱) بیان می‌شود [۱۵]:

$$C_{n,t}^G = \alpha_n \times S_{n,t} + \beta_n \times PG_{n,t} + \gamma_n \times PG_{n,t}^2 \quad (11)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T$$

تابع هزینه‌ی فوق می‌تواند با یک تابع تکه‌ای-خطی تقریب زده شود و اگر تعداد تکه خط‌ها به اندازه‌ی کافی باشند تقریب به‌طور مناسبی انجام خواهد شد [۱۵]. روابط مربوط به این تقریب خطی در روابط (۱۲) تا (۱۴) آمده‌اند:

$$C_{n,t}^G = k_n \times S_{n,t} + \sum_{m=1}^{N_n^{GC}} (\lambda_{n,m} \times P_{m,n,t}^{PL}) \quad (12)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T$$

$$PG_{n,t} = PG_n^{\text{Min}} \times S_{n,t} + \sum_{m=1}^{N_n^{GC}} P_{m,n,t}^{PL} \quad (13)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T$$

$$k_n = \alpha_n + \beta_n \times PG_n^{\text{Min}} + \gamma_n \times (PG_n^{\text{Min}})^2 \quad (14)$$

$$\forall n \in N$$

تابع هزینه راه‌اندازی معمولاً به صورت تابعی نمایی از ساعات توقف قبل از راه‌اندازی هر واحد در نظر گرفته

$$\text{Max } (1-\theta) \times \left\{ \left(\sum_{t \in T} C_t^{\text{PD}} \times PD_t \right) - C^{\text{RT}} - \right. \quad (6)$$

$$\left. \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (C_{n,t}^G + C_{n,t}^U + C_{n,t}^D + C_{n,t}^{\text{RB}}) \right\} + \theta \times \delta$$

$$\delta - \left\{ \left(\sum_{t \in T} C_t^{\text{PD}} \times PD_t \right) - \right. \quad (7)$$

$$\left. \left[\sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (C_{n,t}^G + C_{n,t}^U + C_{n,t}^D + C_{n,t}^{\text{RB}}) + \right. \right.$$

$$\left. \left. CG_n^{\text{URD}} \times PG_{n,t,\omega}^{\text{URD}} - CG_n^{\text{DRD}} \times PG_{n,t,\omega}^{\text{DRD}} + \right. \right.$$

$$\left. \left. CD_t^{\text{URD}} \times PD_{t,\omega}^{\text{URD}} - CD_t^{\text{DRD}} \times PD_{t,\omega}^{\text{DRD}} + \right. \right.$$

$$\left. \left. C_t^{\text{LS}} \times P_{t,\omega}^{\text{LS}} + C_t^{\text{WS}} \times P_{t,\omega}^{\text{WS}} \right] \right\} \leq C_{te} \times \sigma_{\omega}$$

$$\forall \omega \in \Omega$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} (\pi_{\omega} \times \sigma_{\omega}) \leq (1-\varphi) \quad (8)$$

در رابطه (۶) امید ریاضی سود باقیمانده برای بهره‌بردار مستقل سیستم با ضریب $(1-\theta)$ و ریسک سود (شاخص VaR) با ضریب θ ظاهر شده‌اند. θ یک پارامتر وزن دهی با مقداری بین صفر و یک است که برای ایجاد تعادل میان امید سود و ریسک سود در مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به رابطه (۶) با افزایش مقدار پارامتر θ ، اهمیت ریسک سود نسبت به امید سود از نظر بهره‌بردار بیشتر خواهد شد. در رابطه‌ی (۷) نیز σ_{ω} متغیری دودویی است که در صورت کم‌تر بودن سود هر یک از سناریوها از مقدار δ برابر با یک و در غیر این صورت صفر است.

برای لحاظ نمودن شاخص CVaR در مسئله، تابع هدفی به صورت رابطه‌ی (۹) پیشنهاد می‌شود. اگر سمت چپ نامعادله (۷) برابر با $C(w)$ در نظر گرفته شود، قید نشان داده شده در رابطه‌ی (۱۰) نیز بایستی در هنگام استفاده از این شاخص در نظر گرفته شود:

$$\text{Max } (1-\theta) \times \left\{ \left(\sum_{t \in T} C_t^{\text{PD}} \times PD_t \right) - C^{\text{RT}} - \right. \quad (9)$$

$$\left. \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} (C_{n,t}^G + C_{n,t}^U + C_{n,t}^D + C_{n,t}^{\text{RB}}) \right\} +$$

$$\theta \times \left\{ \delta - \left[\frac{1}{1-\varphi} \right] \times \sum_{\omega \in \Omega} (\pi_{\omega} \times \xi_{\omega}) \right\}$$

$$C(w) \leq \xi_{\omega} \quad (10)$$

$$\forall \omega \in \Omega$$

در اینجا نیز امید ریاضی سود باقیمانده برای بهره‌بردار مستقل سیستم با ضریب $(1-\theta)$ و ریسک سود (شاخص CVaR) با ضریب θ در رابطه‌ی (۹) ظاهر شده‌اند. توضیح اینکه در رابطه‌ی (۱۰)، ξ_{ω} یک متغیر پیوسته با مقدار مثبت

$$C^{RT} = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} \times [(\sum_{t \in T} \sum_{n \in N} CG_n^{URD} \times PG_{n,t,\omega}^{URD}) - (\sum_{t \in T} \sum_{n \in N} CG_n^{DRD} \times PG_{n,t,\omega}^{DRD}) + (\sum_{t \in T} CD_t^{URD} \times PD_{t,\omega}^{URD}) - (\sum_{t \in T} CD_t^{DRD} \times PD_{t,\omega}^{DRD}) + (\sum_{t \in T} C_t^{LS} \times P_{t,\omega}^{LS}) + (\sum_{t \in T} C_t^{WS} \times P_{t,\omega}^{WS})] \quad (21)$$

۳-۲- قیدهای زمان حقیقی (متعادل کننده) بازار

قید مربوط به تعادل توان‌های تولیدی و مصرفی در زمان حقیقی در هر سناریو و هر بازه‌ی زمانی به صورت رابطه (۲۲) است. در این رابطه مجموع توان برنامه‌ریزی شده واحدهای حرارتی و توان تولیدی واحد بادی منهای توان قطع شده باد بایستی با تفاضل توان‌های برنامه‌ریزی شده و قطع شده بار برابر است. توان برنامه‌ریزی شده‌ی واحدهای حرارتی و توان برنامه‌ریزی شده بار نیز به ترتیب به صورت روابط (۲۳) و (۲۴) در نظر گرفته می‌شود:

$$\sum_{j \in J} PG_{n,t,\omega}^{Sch} + PW_t(1 + PW_{t,\omega}^{Er}) - P_{t,\omega}^{WS} = PD_{t,\omega}^{Sch} - P_{t,\omega}^{LS} \quad \forall t \in T, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (22)$$

$$PG_{n,t,\omega}^{Sch} = PG_{n,t} + PG_{n,t,\omega}^{URD} - PG_{n,t,\omega}^{DRD} \quad \forall n \in N, \quad \forall t \in T, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (23)$$

$$PD_t^{Sch} = PD_t + PD_{t,\omega}^{URD} - PD_{t,\omega}^{DRD} \quad \forall t \in T, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (24)$$

توان برنامه‌ریزی شده هر واحد حرارتی بایستی بزرگ‌تر از حداقل توان تولیدی و کوچک‌تر از توان در دسترس آن واحد باشد که توان در دسترس هر واحد خود کوچک‌تر از ظرفیت آن واحد است. توان برنامه‌ریزی شده بار نیز بایستی در محدوده‌ی حداقل و حداکثر تقاضای بار باشد که این مقدار به ترتیب ۲۵ درصد کمتر و ۲۵ درصد بیشتر از تقاضای بار پایه در نظر گرفته شده است. قیدهای مربوط به محدودیت توان برنامه‌ریزی شده واحدهای حرارتی و بار به ترتیب به صورت روابط (۲۵) تا (۲۷) می‌باشد:

$$PG_n^{Min} \times S_{n,t} \leq PG_{n,t}^{Sch} \leq PG_{n,t}^{Up} \quad \forall n \in N, \quad \forall t \in T, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (25)$$

$$0 \leq PG_{n,t}^{Up} \leq PG_n^{Max} \times S_{n,t} \quad \forall n \in N, \quad \forall t \in T \quad (26)$$

$$PD_t^{Min} \leq PD_t^{Sch} \leq PD_t^{Max} \quad \forall t \in T, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (27)$$

می‌شود و می‌تواند به صورت مناسبی با یک تابع پله‌ای تقریب زده شود. روابط مربوط به این تقریب نیز به صورت زیر می‌باشند:

$$C_{n,t}^U \geq C_{n,l}^{SU} \times [S_{n,t} - \sum_{i=1}^l S_{n,t+i}] \quad (15)$$

$$\forall n \in N, \quad \forall t \in T, \quad \forall l = 1, \dots, N_n^{SUC} \quad (16)$$

$$C_{n,l}^{SU} = \begin{cases} C_n^{HSU}, & \forall l \leq (T_n^{HC} + T_n^{MD}) \\ C_n^{CSU}, & \forall l > (T_n^{HC} + T_n^{MD}) \end{cases} \quad (17)$$

هم‌چنین در صورت توقف (خاموشی) یک واحد، هزینه‌ی توقف آن واحد، به دلیل تلفات سوخت، معمولاً ثابت در نظر گرفته می‌شود. با این وجود می‌توان از روابط (۱۸) و (۱۹) نیز برای فرمول‌بندی هزینه توقف هر واحد استفاده نمود:

$$C_{n,t}^D \geq C_n^{SD} \times [S_{n,t-1} - S_{n,t}] \quad \forall n \in N, \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$C_{n,t}^D \geq 0 \quad \forall n \in N, \quad \forall t \in T \quad (19)$$

عبارات دیگر بیان شده در رابطه مربوط به امید ریاضی سود عبارت‌اند از هزینه بلوک‌های ذخیره و امید هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی توان‌ها. هزینه بلوک‌های ذخیره شامل مجموع هزینه‌های بلوک‌های ذخیره افزایشی و کاهش تأمین شده توسط واحدهای حرارتی و بار است و برای هر واحد در هر بازه زمانی به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود:

$$C_{n,t}^{RB} = (CG_n^{URB} \times PG_{n,t}^{URB} + CG_n^{DRB} \times PG_{n,t}^{DRB}) + (CD_t^{URB} \times PD_t^{URB} + CD_t^{DRB} \times PD_t^{DRB}) \quad \forall n \in N, \quad \forall t \in T \quad (20)$$

مید هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی توان‌ها نیز عبارت است از مجموع امید هزینه‌های پرداختی جهت قطع بار و باد و امید هزینه‌های پرداختی یا دریافتی جهت تأمین ذخیره‌های افزایشی و کاهش متعادل‌کننده توان‌ها در زمان حقیقی توسط واحدهای حرارتی و بار. این هزینه به صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌شود:

قیدهای مربوط به حداقل زمان کار هر واحد به صورت

زیر است:

$$T_n^U = \min \{T, [T_n^{MU} - T_n^{U_0}] \times S_n^0\} \quad (35)$$

$$\sum_{t=1}^{T_n^U} (1 - S_{n,t}) = 0 \quad \forall n \in N \quad (36)$$

$$\sum_{i=t}^{T_n^{MU}-1} S_{n,i} \geq T_n^{MU} \times (S_{n,t} - S_{n,t-1}) \quad (37)$$

$$\forall n \in N, \forall t = T_n^U + 1, \dots, T - T_n^{MU} + 1$$

$$\sum_{i=t}^T [S_{n,i} - (S_{n,t} - S_{n,t-1})] \geq 0 \quad (38)$$

$$\forall n \in N, \forall t = T - T_n^{MU} + 2, \dots, T$$

قیدهای مربوط به حداقل زمان توقف هر واحد نیز

به صورت روابط (۳۹) تا (۴۲) هستند:

$$T_n^D = \min \{T, [T_n^{MD} - T_n^{D_0}] \times (1 - S_n^0)\} \quad (39)$$

$$\sum_{t=1}^{T_n^D} S_{n,t} = 0 \quad \forall n \in N \quad (40)$$

$$\sum_{i=t}^{T_n^{MD}-1} (1 - S_{n,i}) \geq T_n^{MD} \times (S_{n,t-1} - S_{n,t}) \quad (41)$$

$$\forall n \in N, \forall t = T_n^D + 1, \dots, T - T_n^{MD} + 1$$

$$\sum_{i=t}^T [1 - S_{n,i} - (S_{n,t-1} - S_{n,t})] \geq 0 \quad (42)$$

$$\forall n \in N, \forall t = T - T_n^{MD} + 2, \dots, T$$

۴- شبیه‌سازی و نتایج

سیستم مورد مطالعه در این مقاله متشکل از پنج واحد

حرارتی و یک واحد بادی است. کل دوره زمانی برنامه‌ریزی

یک شبانه‌روز و بازه‌های زمانی برابر با یک ساعت در نظر

گرفته شده‌اند. اطلاعات ورودی مسأله همگی در ضمیمه

مقاله آورده شده‌اند.

هزینه هر مگاوات از بلوک‌های ذخیره افزایشی و

کاهشی واحدهای حرارتی به میزان ۱۰ درصد هزینه تولید

هر مگاوات توان توسط آن‌ها و هزینه هر مگاوات از ذخیره

افزایشی و کاهشی زمان حقیقی به میزان ۲۰ درصد هزینه‌ی

تولید هر مگاوات توان در نظر گرفته شده است. هم‌چنین

هزینه هر مگاوات از بلوک‌های ذخیره افزایشی و کاهشی بار

به میزان ۳ درصد قیمت بار و هزینه هر مگاوات از ذخیره

افزایشی و کاهشی زمان حقیقی به میزان ۵ درصد قیمت بار

در هر ساعت در نظر گرفته می‌شود. هزینه قطع هر مگاوات

از بار و باد نیز به ترتیب برابر با ۵۰۰ دلار و ۱۰ دلار در نظر

گرفته شده است. مدل پیشنهادی در محیط نرم‌افزار GAMS

قیدهای مربوط به ذخیره‌های تأمین‌شده توسط هر واحد

حرارتی در هر سناریو و هر بازه زمانی به صورت روابط

(۲۸) و (۲۹) است. ذخیره‌های افزایشی و کاهشی

متعادل‌کننده‌ی توان‌های تولیدی و مصرفی در زمان حقیقی

که توسط واحدهای حرارتی تأمین می‌شوند بایستی به

ترتیب کوچک‌تر از بلوک‌های ذخیره‌های افزایشی و کاهش

تأمین‌شده توسط واحدهای حرارتی باشند. قیدهای مربوط

به ذخیره‌های تأمین‌شده توسط بار نیز مشابه با همین روابط

است.

$$PG_{n,t,\omega}^{URD} \leq PG_{n,t}^{URB} \quad (28)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T, \forall \omega \in \Omega$$

$$PG_{n,t,\omega}^{DRD} \leq PG_{n,t}^{DRB} \quad (29)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T, \forall \omega \in \Omega$$

مقدار تقاضای بار قطع‌شده بایستی کمتر از تقاضای بار

برنامه‌ریزی شده باشد. هم‌چنین مقدار توان بادی قطع‌شده

باید از توان بادی تولیدی در هر سناریو و هر بازه زمانی

کوچک‌تر باشد. روابط مربوطه به صورت زیر هستند:

$$P_{t,\omega}^{LS} \leq PD_t + PD_{t,\omega}^{URD} - PD_{t,\omega}^{DRD} \quad (30)$$

$$\forall t \in T, \forall \omega \in \Omega$$

$$P_{t,\omega}^{WS} \leq PW_t (1 + PW_{t,\omega}^{Er}) \quad (31)$$

$$\forall t \in T, \forall \omega \in \Omega$$

۳-۳- قیدهای روز پیشروی بازار

محدودیت‌های فنی واحدهای حرارتی از جمله حد

تغییرات تولید و حداقل زمان کار و توقف آن‌ها بایستی در

مسئله‌ی تسویه‌ی بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره با در نظر

گرفتن واحدهای بادی در نظر گرفته شوند. قیدهای مربوط

به حد افزایش و کاهش تولید واحدهای حرارتی به ترتیب

به صورت روابط (۳۲)، (۳۳) و (۳۴) است [۱۶]:

$$PG_{n,t}^{Up} \leq PG_{n,t-1,\omega}^{Sch} + P_n^{RU} \times S_{n,t} + P_n^{SUR} \times (S_{n,t} - S_{n,t-1}) + PG_n^{Max} \times [1 - S_{n,t}] \quad (32)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T, \forall \omega \in \Omega$$

$$PG_{n,t}^{Up} \leq PG_n^{Max} \times S_{n,t+1} + P_n^{SDR} \times (S_{n,t} - S_{n,t+1}) \quad (33)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T$$

$$PG_{n,t,\omega}^{Sch} - PG_{n,t,\omega}^{Sch} \leq P_n^{RD} \times S_{n,t} + P_n^{SDR} \times (S_{n,t-1} - S_{n,t}) + PG_n^{Max} \times (1 - S_{n,t-1}) \quad (34)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T, \forall \omega \in \Omega$$

جدول (۱): مقادیر درآمد، هزینه، سود و شاخص VaR

(برحسب دلار) به ازای $\Phi = 0/5$ و تغییرات θ

$\theta = 0/99$	$\theta = 0/5$	$\theta = 0/01$	VaR --- $\Phi = 0/5$
۲۸۴۳۷۲	۲۸۲۰۶۲	۲۸۱۵۳۴	ارزش درخطر
۶۷۸۱۹۳	۶۶۵۰۹۶	۶۷۸۳۷۶	درآمد فروش توان
۴۰۴۲۸۵	۴۱۵۵۵۵	۴۲۳۶۱۶	هزینه تولید توان
۶۰۰	۶۰۰	۰	هزینه راه‌اندازی و خاموشی
۸۰۹۶	۱۱۶۹۲	۱۲۲۱۳	هزینه خرید بلوک‌های ذخیره
۱۶۳۳۸	-۴۲۶۶۲	-۳۷۳۷۲	هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی
۲۴۹۵۷۳	۲۷۹۹۱۰	۲۷۹۹۱۹	سود باقیمانده

جدول (۲): مقادیر درآمد، هزینه، سود و شاخص VaR

(برحسب دلار) به ازای $\Phi = 0/7$ و تغییرات θ

$\theta = 0/99$	$\theta = 0/5$	$\theta = 0/01$	VaR --- $\Phi = 0/7$
۲۷۳۵۲۳	۲۷۰۷۶۹	۲۷۰۰۸۸	ارزش درخطر
۶۷۹۵۴۴	۶۶۳۹۲۵	۶۷۳۷۳۸	درآمد فروش توان
۴۰۶۴۲۱	۴۱۵۵۸۳	۴۲۲۵۴۰	هزینه تولید توان
۰	۶۰۰	۶۰۰	هزینه راه‌اندازی و خاموشی
۶۵۴۳	۱۱۳۱۸	۱۲۲۸۱	هزینه خرید بلوک‌های ذخیره
۲۸۶۲۵	-۴۳۴۵۸	-۴۱۶۱۰	هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی
۲۳۷۹۵۴	۲۷۹۸۸۰	۲۷۹۹۲۶	سود باقیمانده

جدول (۳): مقادیر درآمد، هزینه، سود و شاخص VaR

(برحسب دلار) به ازای $\Phi = 0/9$ و تغییرات θ

$\theta = 0/99$	$\theta = 0/5$	$\theta = 0/01$	VaR --- $\Phi = 0/9$
۲۵۰۵۱۸	۲۴۷۹۴۷	۲۳۳۴۱۹	ارزش درخطر
۶۶۰۵۲۱	۶۶۵۲۴۶	۶۶۸۲۹۴	درآمد فروش توان
۴۰۴۹۰۹	۴۲۰۴۷۰	۴۱۸۶۴۹	هزینه تولید توان
۰	۶۰۰	۶۰۰	هزینه راه‌اندازی و خاموشی
۵۰۹۳	۱۰۶۲۴	۱۲۱۰۳	هزینه خرید بلوک‌های ذخیره
-۵۰۸۵	-۴۵۸۳۶	-۴۲۹۶۲	هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی
۲۵۵۶۰۴	۲۷۹۳۸۸	۲۷۹۹۰۴	سود باقیمانده

مقادیر شاخص ارزش درخطر شرطی، درآمد فروش توان، هزینه‌های مربوط به واحدهای حرارتی و متعادل‌سازی توان و امید ریاضی سود باقی‌مانده برای بهره‌بردار مستقل

نسخه 24.2.2 پیاده‌سازی شده و توسط حل‌تر CPLEX

نسخه 11 حل شده است.

در جدول (۱) مقادیر شاخص ارزش درخطر، درآمد ناشی از فروش توان تولیدی واحدهای حرارتی به بار، هزینه تولید توان واحدهای حرارتی، هزینه راه‌اندازی و خاموشی واحدهای حرارتی، هزینه خرید بلوک‌های ذخیره افزایشی و کاهش از واحدهای حرارتی و بار، هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی توان‌های تولیدی و مصرفی و در نهایت امید ریاضی سود باقی‌مانده برای بهره‌بردار مستقل سیستم به ازای $\Phi = 0/5$ و $\theta = 0/01$ ، $\theta = 0/50$ و $\theta = 0/99$ نشان داده شده‌اند. در جدول‌های (۲) و (۳) نیز مقادیر فوق به ترتیب به ازای $\Phi = 0/7$ و هم‌چنین $\Phi = 0/9$ و سه مقدار مختلف برای θ نشان داده شده‌اند. معیار تعیین پارامتر θ اهمیت مفهوم ریسک برای بهره‌بردار سیستم است. هرچه مقدار پارامتر θ بیشتر شود اهمیت ریسک سود برای بهره‌بردار بیشتر خواهد شد. بدین معنا که بهره‌بردار بایستی با تغییر مقدار این پارامتر از صفر تا یک، مقدار بهینه‌ی آن را با توجه به کاربرد موردنظر خود به دست آورد. انتخاب پارامتر Φ طبق نظر بهره‌بردار صورت خواهد گرفت. به‌عنوان مثال اگر بهره‌بردار بخواهد هزینه‌ی ۴۰ درصد از بدترین سناریوها را کنترل کند پارامتر Φ را برابر با ۰/۶ قرار خواهد داد. با توجه به هر یک از جدول‌های (۱) تا (۳)، با افزایش مقدار پارامتر θ و در نتیجه افزایش اهمیت ریسک سود حاصله برای بهره‌بردار مستقل سیستم، مقدار شاخص VaR افزایش می‌یابد که این افزایش برای بهره‌بردار مطلوب است. از طرف دیگر با افزایش مقدار پارامتر θ و در پی آن کاهش توجه بهره‌بردار به امید سود حاصله، مقدار امید سود کاهش می‌یابد که این کاهش برای بهره‌بردار مطلوب نیست. با مقایسه جدول‌های (۱) تا (۳) نیز می‌توان مشاهده نمود که با افزایش مقدار پارامتر Φ ، مقدار شاخص VaR کاهش می‌یابد اما تغییرات امید سود حاصله ناچیز است.

جدول (۵): مقادیر درآمد، هزینه، سود و شاخص CVaR

(برحسب دلار) به ازای $\Phi = 0.7$ و تغییرات θ

$\theta = 0.99$	$\theta = 0.5$	$\theta = 0.01$	CVaR --- $\Phi = 0.7$
۲۵۵۱۹۱	۲۵۴۶۵۰	۲۵۲۵۶۴	ارزش درخطر شرطی
۶۷۲۷۵۵	۶۵۵۲۲۶	۶۶۸۲۶۰	درآمد فروش توان
۴۳۶۳۶۰	۴۱۹۷۳۹	۴۱۹۵۹۸	هزینه تولید توان
۱۲۰۰	۶۰۰	۶۰۰	هزینه راهاندازی و خاموشی
۸۰۱۹	۱۱۷۷۶	۱۲۲۷۸	هزینه خرید بلوک‌های ذخیره
-۴۰۷۷۱	-۵۶۳۵۶	-۴۴۰۸۳	هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی
۲۶۷۹۴۵	۲۷۹۴۶۶	۲۷۹۸۶۶	سود باقیمانده

جدول (۶): مقادیر درآمد، هزینه، سود و شاخص CVaR

(برحسب دلار) به ازای $\Phi = 0.9$ و تغییرات θ

$\theta = 0.99$	$\theta = 0.5$	$\theta = 0.01$	CVaR --- $\Phi = 0.9$
۲۴۱۶۴۶	۲۴۰۲۸۹	۲۳۵۷۴۸	ارزش درخطر شرطی
۶۷۰۷۲۳	۶۵۴۴۸۷	۶۶۰۰۹۷	درآمد فروش توان
۴۳۷۸۷۹	۴۲۰۶۵۱	۴۱۶۱۰۶	هزینه تولید توان
۱۲۰۰	۶۰۰	۶۰۰	هزینه راهاندازی و خاموشی
۶۵۵۶	۱۱۲۲۴	۱۲۳۸۱	هزینه خرید بلوک‌های ذخیره
-۳۰۰۳۹	-۵۶۹۹۲	-۴۸۷۱۰	هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی
۲۵۵۱۲۷	۲۷۹۰۰۴	۲۷۹۷۱۹	سود باقیمانده

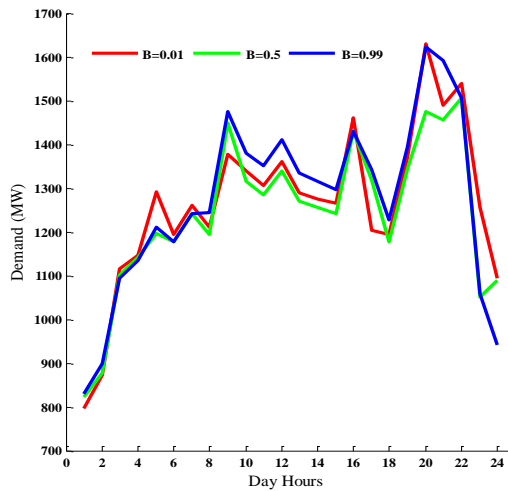
تغییرات شاخص‌های VaR و CVaR نسبت به تغییرات پارامتر θ در شکل (۱) نشان داده شده است. هم‌چنین خط‌چین‌های نشان داده شده در این شکل بیان‌کننده تغییرات این دو شاخص نسبت به تغییرات پارامتر Φ هستند. با توجه به شکل، در حالت کلی با افزایش مقدار پارامتر Φ ، مقادیر شاخص‌های VaR و CVaR کاهش و با افزایش مقدار پارامتر θ مقادیر این شاخص‌ها افزایش می‌یابند.

سیستم به ازای $\Phi = 0.5$ ، $\Phi = 0.7$ و $\Phi = 0.9$ برای مقادیر مختلف θ ($\theta = 0.01$ ، $\theta = 0.5$ و $\theta = 0.99$) به ترتیب در جدول‌های (۴) تا (۶) آمده‌اند. با توجه به نتایج حاصل شده و با افزایش پارامتر θ ، شاخص CVaR افزایش و امید سود حاصله کاهش می‌یابد. بنابراین در حالت کلی با تغییر پارامتر θ ، تغییرات امید سود و ریسک سود در جهت عکس یکدیگر بوده و بایستی با انتخاب مناسب پارامتر θ مصالحه‌ای میان این دو مقدار ایجاد نمود. به‌عنوان نمونه با در نظر گرفتن جدول (۵) مشاهده می‌شود که بدون در نظر گرفتن ریسک در مسئله ($\theta = 0.01$) شاخص CVaR برابر با ۲۵۲۵۶۴ دلار و امید سود برابر با ۲۷۹۸۶۶ دلار است. با افزایش مقدار پارامتر θ به ۰/۵۰، شاخص CVaR برابر با ۲۵۴۶۵۰ دلار و امید سود برابر با ۲۷۹۴۶۶ دلار خواهد شد. بنابراین درحالی‌که شاخص CVaR دارای افزایش مطلوبی به میزان ۲۰۸۶ دلار است، امید سود کاهش نامطلوبی به میزان ۴۰۰ دلار را خواهد داشت. با توجه به سریع‌تر بودن نرخ افزایش شاخص CVaR نسبت به نرخ کاهش امید سود با افزایش پارامتر θ از ۰/۰۱ به ۰/۵۰، می‌توان $\theta = 0.5$ را یک مقدار بهینه در نظر گرفت؛ اما با توجه به جدول (۵) با افزایش پارامتر θ از ۰/۵۰ به ۰/۹۹ میزان افزایش مطلوب شاخص CVaR نسبت به کاهش نامطلوب امید سود کم‌تر بوده و $\theta = 0.99$ نقطه‌ای بهینه به نظر نمی‌رسد. هم‌چنین با مقایسه‌ی جدول‌های (۴) تا (۶) نیز می‌توان مشاهده نمود که با افزایش مقدار پارامتر Φ ، مقدار شاخص CVaR کاهش می‌یابد اما تغییرات امید سود حاصله ناچیز است.

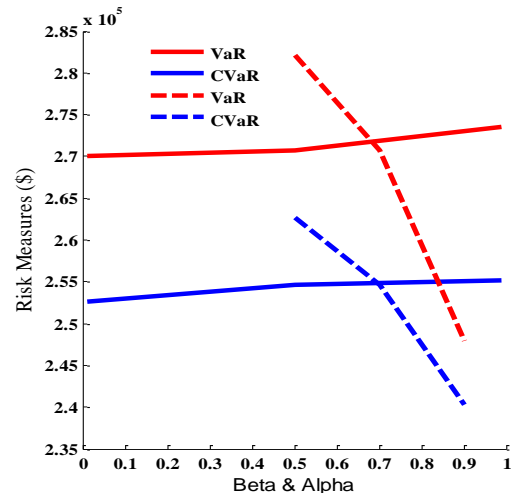
جدول (۴): مقادیر درآمد، هزینه، سود و شاخص CVaR

(برحسب دلار) به ازای $\Phi = 0.5$ و تغییرات θ

$\theta = 0.99$	$\theta = 0.5$	$\theta = 0.01$	CVaR --- $\Phi = 0.5$
۲۶۳۳۰۲	۲۶۲۶۲۰	۲۶۱۶۷۸	ارزش درخطر شرطی
۶۵۷۶۷۷	۶۵۴۶۵۱	۶۶۷۷۵۹	درآمد فروش توان
۴۲۹۴۳۳	۴۱۸۱۵۶	۴۱۸۲۶۸	هزینه تولید توان
۱۲۰۰	۶۰۰	۶۰۰	هزینه راهاندازی و خاموشی
۹۰۲۳	۱۱۹۰۷	۱۲۰۵۷	هزینه خرید بلوک‌های ذخیره
-۵۴۵۵۶	-۵۵۵۱۱	-۴۲۹۲۰	هزینه متعادل‌سازی زمان حقیقی
۲۷۲۵۷۶	۲۷۹۴۹۹	۲۷۹۷۵۴	سود باقیمانده

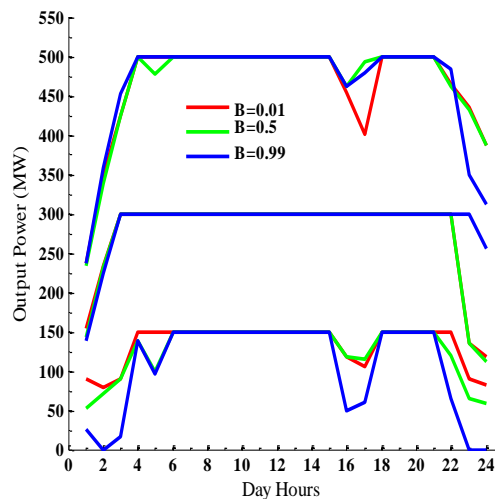


شکل (۳): تغییرات تقاضای بار نسبت به تغییرات پارامتر θ با در نظر گرفتن شاخص CVaR



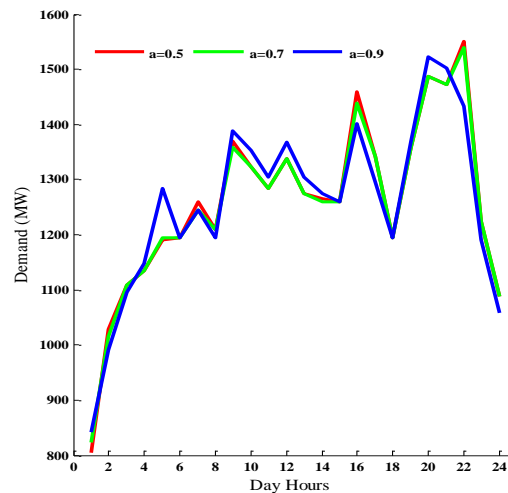
شکل (۱): تغییرات شاخص‌های VaR و CVaR نسبت به تغییرات پارامترهای θ و φ

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها مشخص شد که تنها واحدهای ۱، ۳ و ۵ در تأمین تقاضای بار نقش خواهند داشت. در شکل (۴) توان تولیدی این واحدها با در نظر گرفتن شاخص VaR نشان داده شده‌اند. در این شکل تغییرات توان تولیدی واحدها نسبت به تغییرات پارامتر θ نیز مورد بررسی قرار گرفته است. توضیح اینکه منحنی‌های بالایی، میانی و پایینی به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان تولیدی واحدهای ۱، ۳ و ۵ می‌باشند. هم‌چنین در شکل (۵) توان تولیدی واحدهای ۱، ۳ و ۵ و تغییرات آن‌ها نسبت به تغییرات پارامتر θ با در نظر گرفتن شاخص CVaR نشان داده شده‌اند.

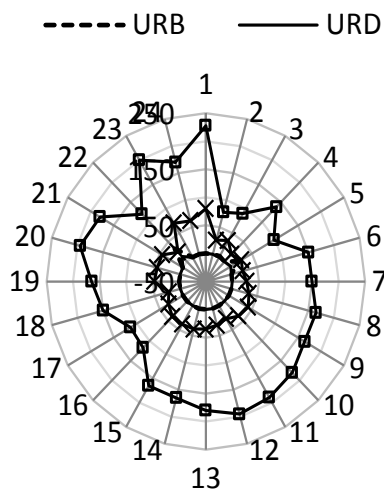


شکل (۴): تغییرات توان تولیدی واحدها نسبت به تغییرات پارامتر θ با در نظر گرفتن شاخص VaR

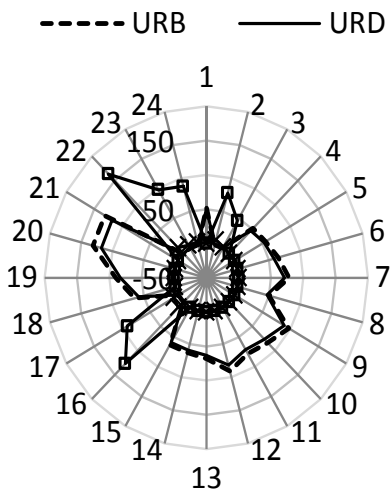
منحنی‌های تقاضای بار تأمین شده در ۲۴ ساعت با در نظر گرفتن شاخص VaR در شکل (۲) آمده است. در این شکل تغییرات تقاضای بار نسبت به تغییرات پارامتر θ نیز نشان داده شده است. همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد بار تأمین شده همواره در بازه‌ای به طول ۲۵ درصد کمتر تا ۲۵ درصد بیشتر از بار پایه قرار می‌گیرد. هم‌چنین منحنی‌های شکل (۳) میزان تقاضای بار تأمین شده با لحاظ نمودن شاخص CVaR و تغییرات آن نسبت به پارامتر θ را نشان می‌دهند:



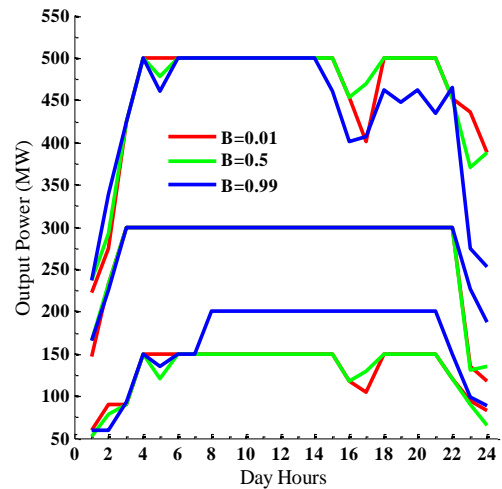
شکل (۲): تغییرات تقاضای بار نسبت به تغییرات پارامتر θ با در نظر گرفتن شاخص VaR



شکل (۶): بلوک ذخیره افزایشی (URB) و کاهششی (DRB) و امید ذخیره افزایشی (URD) و کاهششی (DRD) زمان حقیقی واحدها با در نظر گرفتن شاخص VaR



شکل (۷): بلوک ذخیره افزایشی (URB) و کاهششی (DRB) و امید ذخیره افزایشی (URD) و کاهششی (DRD) زمان حقیقی بار با در نظر گرفتن شاخص VaR



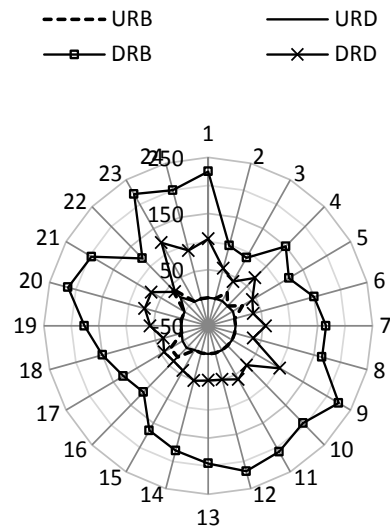
شکل (۵): تغییرات توان تولیدی واحدها نسبت به تغییرات پارامتر θ با در نظر گرفتن شاخص CVaR

مقادیر بلوک‌های ذخیره افزایشی و کاهششی و امید ذخیره‌ی افزایشی و کاهششی زمان حقیقی تأمین‌شده توسط واحدهای حرارتی با در نظر گرفتن شاخص VaR و به ازای $\theta = 0.5$ و $\phi = 0.7$ در شکل (۶) آمد است. همچنین مقادیر ذخیره‌های تأمین‌شده توسط بار با در نظر گرفتن شاخص VaR در شکل (۷) نشان داده‌شده‌اند. با توجه به نتایج حاصله، عمده ذخیره تأمین‌شده توسط واحدهای حرارتی به صورت کاهششی و عمده ذخیره تأمین‌شده توسط بار به صورت افزایششی است. همچنین در شکل‌های (۸) و (۹) مقادیر بلوک‌های ذخیره افزایششی و کاهششی و امید ذخیره افزایششی و کاهششی زمان حقیقی تأمین‌شده توسط واحدهای حرارتی و بار با در نظر گرفتن شاخص CVaR مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت نیز عمده ذخیره تأمین‌شده توسط واحدهای حرارتی به صورت کاهششی و عمده ذخیره تأمین‌شده توسط بار به صورت افزایششی است.

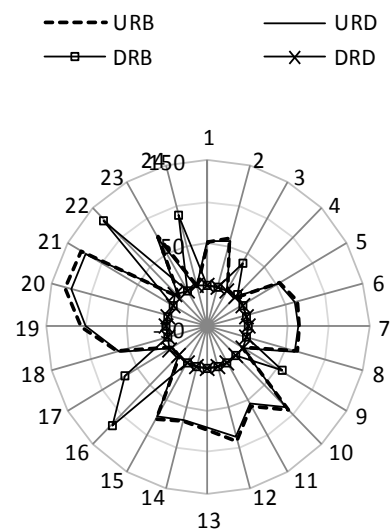
بهره‌بردار مستقل سیستم در فرمول‌بندی مسئله‌ی حداکثر سازی سود باقیمانده از تسویه بازار هم‌زمان انرژی و ذخیره و حداقل هزینه‌های واحدهای حرارتی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین قیدهای مشارکت واحدهای حرارتی و عدم قطعیت واحدهای بادی با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای در مسئله لحاظ شد. با استفاده از نتایج حاصل شده، حساسیت متغیرهای مختلف موجود در مسئله مانند امید سود، ریسک سود، تقاضای بار تأمین شده و توان تولیدی واحدهای حرارتی نسبت به تغییرات پارامترهای مربوط به ریسک (θ و φ) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این نتایج با افزایش مقدار پارامتر θ ، اهمیت ریسک سود حاصله برای بهره‌بردار مستقل سیستم بیشتر شده و شاخص‌های ریسک ($CVaR$ و VaR) دارای افزایش مطلوبی خواهند بود، اما امید سود کاهش می‌یابد. در نتیجه باید تعادلی میان مقادیر امید سود و ریسک سود ایجاد نمود که این مهم با انتخاب مناسب مقدار پارامتر θ قابل دستیابی است. با انتخاب مناسب مقدار پارامتر θ می‌توان امید سود را در سطح قابل قبولی حفظ نموده و ریسک سود را نیز کنترل کرد. در نهایت با افزایش مقدار پارامتر φ نیز مقادیر شاخص‌های VaR و $CVaR$ کاهش خواهند یافت.

ضمیمه

مشخصات مربوط به واحدهای حرارتی در جدول (۷) آمده است. کل دوره‌ی زمانی برنامه‌ریزی یک شبانه‌روز و بازه‌های زمانی برابر با یک ساعت در نظر گرفته شده‌اند. تقاضای بار پایه و قیمت بار در هر ساعت به ترتیب در جدول‌های (۸) و (۹) آورده شده‌اند. همچنین میزان توان بادی پیش‌بینی شده در جدول (۱۰) آمده است. به علاوه، با در نظر گرفتن توزیع احتمال خطای پیش‌بینی به صورت نرمال با میانگین صفر و واریانس $0/1$ و با گسسته سازی و تقسیم آن به سیزده بخش مساوی، سیزده مقدار خطا نسبت به مقدار میانگین، با احتمال مشخص برای هر خطابه دست می‌آید. بدین ترتیب می‌توان سیزده سناریو با احتمال مشخص برای توان بادی در نظر گرفت. ضرایب احتمال مربوط به هر سناریو با توجه به شکل (۱) به صورت جدول (۱۱) است [۱۷ و ۱۸]:



شکل (۸): بلوک ذخیره افزایشی (URB) و کاهش (DRB) و امید ذخیره افزایشی (URD) و کاهش (DRD) زمان حقیقی واحدها با در نظر گرفتن شاخص $CVaR$



شکل (۹): بلوک ذخیره افزایشی (URB) و کاهش (DRB) و امید ذخیره افزایشی (URD) و کاهش (DRD) زمان حقیقی بار با در نظر گرفتن شاخص $CVaR$

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مفهوم ریسک و شاخص‌های VaR و $CVaR$ جهت اندازه‌گیری ریسک سود حاصله برای

جدول (۱۰): توان بادی پیش‌بینی شده (مگاوات) [۱۸]

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
توان	۱۴۰	۱۰۵	۹۰	۷۰	۱۰۵	۹۰
ساعت	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
توان	۱۰۵	۹۰	۱۴۰	۱۲۵	۱۰۵	۱۲۵
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
توان	۱۰۵	۱۱۰	۱۱۰	۱۶۰	۱۲۵	۹۰
ساعت	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
توان	۱۴۰	۱۷۵	۱۷۵	۱۸۵	۱۹۵	۱۶۰

جدول (۱۱): احتمال خطای توان بادی پیش‌بینی شده

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
درصد خطا	-۰/۳	-۰/۲۵	-۰/۲	-۰/۱۵	-۰/۱
احتمال	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۸۵	۰/۰۳۸	۰/۱۱۰۹
سناریو	۶	۷	۸	۹	۱۰
درصد خطا	-۰/۰۵	۰	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵
احتمال	۰/۲۱۰۸	۰/۲۶۱۱	۰/۲۱۰۸	۰/۱۱۰۹	۰/۰۳۸
سناریو		۱۱	۱۲	۱۳	
درصد خطا		۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	
احتمال		۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱	

جدول (۷): مشخصات واحدهای حرارتی

مشخصات	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵
$(MW) PG_n^{Min}$	۱۲۵	۱۰۰	۷۵	۵۰	۵۰
$(MW) PG_n^{Max}$	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۲۰۰
$(h) T_n^{MU}$	۷	۶	۵	۴	۳
$(h) T_n^{MD}$	۷	۶	۵	۴	۳
$(h) S_n^0$	+۷	-۶	+۵	-۴	+۳
$(\$) \alpha_n$	۷۰۰	۹۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۴۰۰
$(\$/MW) \beta_n$	۱۶	۲۳	۱۷	۲۱	۱۸
$(\$/MW^2) \gamma_n$	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۲۷
$(\$) C_n^{HSU}$	۷۰۰	۹۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۴۰۰
$(\$) C_n^{CSU}$	۱۴۰۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۸۰۰
$(h) T_n^{H-C}$	۶	۵	۴	۳	۲
$(\$) C_n^{SD}$	۷۰۰	۹۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۴۰۰
$(MW) P_n^{RU}$	۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۱۰۰
$(MW) P_n^{RD}$	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۲۰۰
$(MW) P_n^{SUR}$	۱۲۵	۱۰۰	۷۵	۵۰	۵۰
$(MW) P_n^{SDR}$	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۲۰۰

جدول (۸): بار پایه‌ی ۲۴ ساعته (مگاوات) [۱۶]

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
بار	۷۰۰	۷۵۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
ساعت	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بار	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۱۳۰۰	۱۴۰۰	۱۴۵۰	۱۵۰۰
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
بار	۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۰۵۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
ساعت	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
بار	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰	۹۰۰	۸۰۰

جدول (۹): قیمت بار ساعتی (دلار)

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
قیمت	۲۰	۲۰/۲۵	۲۰/۷۵	۲۱/۲۵	۲۱/۵۰	۲۲
ساعت	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
قیمت	۲۲/۲۵	۲۲/۵۰	۲۳	۲۳/۵۰	۲۳/۷۵	۲۴
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
قیمت	۲۳/۵۰	۲۳	۲۲/۵۰	۲۱/۷۵	۲۱/۵۰	۲۲
ساعت	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
قیمت	۲۲/۵۰	۲۳/۵۰	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰/۵۰

مراجع

- [1] R. Swisher, C.R. De Azua, and J. Clendenin, "Strong Wind on the Horizon: Wind Power Comes of Age", Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No.12, pp. 1757-1764, 2001.
- [2] S.R. Bull, "Renewable Energy Today and Tomorrow," Proceedings of IEEE, Vol. 89, No. 8, pp.1216-1221, 2001.
- [3] D.S. Kirschen, and G. Strbac, Fundamentals of Power System Economics, wiley, 2004.
- [4] M. Shahidepour, H. Yamin, and Z. Li, Market operations in electric power systems, Wiley, New York, 2002.
- [5] J. Wang, N. E. Redondo, and F. D. Galiana, "Demand-side reserve offers in joint energy/reserve electricity markets," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 4, pp. 1300-1306, 2003.
- [6] <http://www.igmc.ir>.
- [7] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets, Springer, New York, 2010.
- [8] F. Bouffard, and F. D. Galiana, "Stochastic security for operations planning with significant wind power generation," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, pp. 306 - 316, 2008.
- [9] X. Li and Ch. Jiang, "Short-Term Operation Model

- and Risk Management for Wind Power Penetrated System in Electricity Market," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 2, pp. 932-939, 2011.
- [10] J.P.S. Catalão, H.M.I. Pousinho, J. Contreras, "Optimal hydro scheduling and offering strategies considering price uncertainty and risk management," *Science Direct, Energy* 37, pp. 237-244, 2012.
- [11] A. A. Sánchez, J. Contreras, and J.I. Muñoz, "Optimal Coordinated Wind-Hydro Bidding Strategies in Day-Ahead Markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, pp. 798-809, 2013.
- [12] V. González, D. Pozo, J. Contreras, "Risk-constrained dynamic energy allocation for a wind power producer," *Science Direct, Electric Power Systems Research* 116, pp. 338-346, 2014.
- [13] S. Moazeni, W. B. Powell, and A.H. Hajimiragha, "Mean-Conditional Value-at-Risk Optimal Energy Storage Operation in the Presence of Transaction Costs," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. pp, No. 99, PP. 1-11, 2014.
- [14] M. Dicorato, G. Forte, M. Trovato, and E. Caruso, "Risk-Constrained Profit Maximization in Day-Ahead Electricity Market," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 1107-1114, 2009.
- [15] S. Bradley, and A. Hax, TL Magnanti, *Applied Mathematical Programming*, Addison-Wesley Pub. Co, 1977.
- [16] M. Carrión, and J. M. Arroyo, "A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 3, pp. 1371-1378, 2006.
- [17] A. L. Garcia, *Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering*, Pearson Education, Inc, 2009.
- [18] Y.H. Wan, *Wind Power Plant Behaviors: Analyses of Long-Term Wind Power Data*, National Renewable Energy Laboratory (NREL) Report, 2004.

¹ Deregulation

² Vertically integrated

³ Market clearing

⁴ Pool market

⁵ Real-time

⁶ Stochastic Programming

⁷ Risk

⁸ Value at Risk

⁹ Conditional Value at Risk