

ارزیابی میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار ناشی از عدم قطعیت منابع بادی و بار در مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی با استفاده از شاخص ارزش در خطر شرطی

سعید صبور^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ رسول کاظم‌زاده^۲، دانشیار؛ هدایت صبور^۳، مربی

۱- مرکز تحقیقات انرژی‌های نو - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سهند - تبریز - ایران - s_saboori@sut.ac.ir

۲- مرکز تحقیقات انرژی‌های نو - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سهند - تبریز - ایران - r.kazemzadeh@sut.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده انرژی - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - h.saboori@kut.ac.ir

چکیده: مزیت اصلی به کارگیری برنامه‌ریزی تصادفی نسبت به نوع قطعی آن در مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی (UC) با حضور منابع بادی، در نظر گرفتن سناریوهای رخداد ممکن برای توان بادی و بار از طریق حداقل نمودن امید ریاضی هزینه بهره‌برداری است. اما عیب اصلی نمایش تابع هزینه توسط امید ریاضی آن، صرف نظر نمودن از دیگر پارامترهای مهم و تعیین کننده تابع توزیع احتمال هزینه است. یکی از بهترین روش‌ها جهت غلبه بر این مشکل و در عین حال حفظ ساختار تصادفی مسئله به کارگیری مفهوم ریسک است. با توجه به مطالب فوق، در این مقاله اثر میزان عدم قطعیت موجود در منابع بادی و بار بر میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار در مسئله UC از طریق اصلی‌ترین شاخص ریسک یا ارزش در خطر شرطی (CVaR)، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مدل پیشنهادی از نوع برنامه‌ریزی ترکیبی خطی - عدد صحیح (MILP) است که به صورت برنامه ریزی تصادفی و دربردارنده عبارات مربوط به شاخص ریسک اصلاح شده است. میزان عدم قطعیت توان باد و بار به دو طریق شامل در نظر گرفتن میزان نفوذ توان بادی به صورت ضربی از یک مقدار پایه و همچنین در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های مختلف با استفاده از خطای پیش‌بینی توان باد و بار به صورت توزیع احتمال نرمال با واریانس‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: ارزش در خطر شرطی (CVaR)، امید هزینه، برنامه‌ریزی ترکیبی خطی - عدد صحیح (MILP)، برنامه‌ریزی تصادفی، در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی، ریسک، عدم قطعیت باد و بار.

Evaluating the Operator Risk-taking due to the Wind Resources and Load Uncertainties in Thermal Unit Commitment Problem by using Conditional Value at Risk Measure

S. Saboori¹, MSc Student; R. Kazemzadeh², Associate Professor; H. Saboori³, Lecturer

1- Electrical Engineering Department, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Email: s_saboori@sut.ac.ir

2- Electrical Engineering Department, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Email: r.kazemzadeh@sut.ac.ir

3- Electrical Engineering Department, Faculty of Energy, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: h.saboori@kut.ac.ir

Abstract: The main advantage of employing stochastic programming compare to its deterministic counterpart in wind integrated thermal Unit Commitment (UC) problem is considering probable occurrence wind power and load scenarios by minimizing the expectation of operation cost. However, the major drawback of representing cost function by its expectation is ignoring the other important parameters of cost probability distribution function. One of the best methods to overcome this problem and at the same time maintaining the stochastic structure of the problem is the application of the concept of risk. In this context, in this paper the effect of wind resources and load uncertainties on operator risk-taking in unit commitment problem will be analyzed by using the main risk measure namely Conditional Value at Risk (CVaR). The proposed model is Mixed Integer Linear Programming (MILP) which has been modified in the form of stochastic programming and containing risk measure terms. The wind power and load uncertainties has been considered in two ways including the consideration of wind penetration as a fraction of a basic value and also consideration of wind power and load prediction errors in the form of normal probability distribution with different variances.

Keywords: Conditional value at risk, cost expectation, mixed integer linear programming, risk, stochastic programming, thermal unit commitment, wind uncertainty.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۱۷ و ۱۳۹۴/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۲۴

نام نویسنده مسئول: رسول کاظم‌زاده

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - شهر جدید سهند - دانشگاه صنعتی سهند - دانشکده مهندسی برق - گروه قدرت - مرکز تحقیقات انرژی‌های نو.

واژه‌نامه			
مجموعه‌ها			
J	مجموعه واحدهای تولیدی	$t^{on}(j)$	تعداد بازه‌های زمانی که واحد j قبل از راه‌اندازی در بازه زمانی k خاموش بوده است.
K	مجموعه بازه‌های زمانی	$V(j,k)$	متغیر دودویی که در صورت روشن بودن واحد j در بازه زمانی k برابر با یک و در غیر این صورت صفر است.
ω	مجموعه سناریوها	$\delta(j,k,L,\omega)$	توان تولید شده در بلوک L از تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد j در بازه زمانی k و سناریوی ω
ثابت‌ها		$\mu(\omega)$	متغیر پیوسته کمکی مربوط به محاسبه ریسک
A (j)	ضریب ثابت تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد j		
a (j)	ضریب ثابت تابع هزینه تولید درجه دوم واحد j		
b (j)	ضریب درجه اول تابع هزینه تولید درجه دوم واحد j		
c (j)	ضریب درجه دوم تابع هزینه تولید درجه دوم واحد j		
cc (j)	ضریب مربوط به تابع هزینه راه‌اندازی سرد واحد j		
D (k)	تقاضای بار پیش‌بینی شده (پایه) در بازه زمانی k		
DT (j)	حداقل زمان خاموش بودن واحد j		
FL (j)	شیب بلوک L از تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد j		
G (j)	تعداد دوره‌هایی که واحد j به دلیل قید حداقل زمان روشن بودن، بایستی در ابتدا روشن باشد.		
hc (j)	ضریب مربوط به تابع هزینه راه‌اندازی گرم واحد j		
K (j,t)	هزینه دوره t از تابع هزینه راه‌اندازی پله‌ای واحد j		
L (j)	تعداد دوره‌هایی که واحد j به دلیل قید حداقل زمان خاموش بودن، بایستی در ابتدا خاموش باشد.		
ND (j)	بخش‌های تابع هزینه راه‌اندازی پله‌ای واحد j		
NL (j)	بخش‌های تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد j		
$P_{max}(j)$	حداکثر تولید (ظرفیت) واحد j		
$P_{min}(j)$	حداقل تولید واحد j		
$P(\omega)$	احتمال رخداد سناریوی ω		
PW (k)	توان بادی پیش‌بینی شده (پایه) در بازه زمانی k		
PE(k, ω)	خطای پیش‌بینی توان باد و خطای پیش‌بینی بار در بازه زمانی k و سناریوی ω		
R (k)	ذخیره چرخان مورد نیاز در بازه زمانی k		
RD (j)	حد کاهش تولید واحد j		
RU (j)	حد افزایش تولید واحد j		
$S_0(j)$	تعداد دوره‌هایی که واحد j قبل از اولین بازه زمانی (در انتهای بازه زمانی صفر) خاموش بوده است.		
SD (j)	حد کاهش تولید واحد j در هنگام خاموش شدن آن		
SU (j)	حد افزایش تولید واحد j در هنگام راه‌اندازی آن		
T	تعداد بازه‌های زمانی		
T (j,l)	حد بالای بلوک L در تابع هزینه تولید تکه‌ای - خطی واحد j		
$t^{cold}(j)$	تعداد ساعات لازم برای تغییر روش راه‌اندازی واحد j از گرم به سرد		
$U_0(j)$	تعداد دوره‌هایی که واحد j قبل از اولین بازه زمانی (در انتهای بازه زمانی صفر) روشن بوده است.		
UT (j)	حداقل زمان روشن بودن واحد j		
$V_0(j)$	حالت اولیه در مدار قرار گرفتن واحد j		
α	درصدی از سناریوها با هزینه کمتر از η		
β	ضریب وزن‌دهی به ریسک		
M	ثابت بزرگ		
متغیرها			
$C_d(j,k)$	هزینه خاموش کردن واحد j در بازه زمانی k		
$C_p(j,k,\omega)$	هزینه تولید واحد j در بازه زمانی k و سناریوی ω		
$C_u(j,k)$	هزینه راه‌اندازی واحد j در بازه زمانی k		
$P(j,k,\omega)$	توان خروجی واحد j در بازه زمانی k و سناریوی ω		
P	حداکثر توان خروجی در دسترس واحد j در بازه زمانی k و سناریوی ω		

۱ - مقدمه

پایان‌پذیر بودن سوخت‌های فسیلی، آلودگی‌های فزاینده ناشی از آن‌ها و همچنین پدیده گرم شدن زمین در چند دهه اخیر، توجه سیاست‌گذاران و محققین در زمینه انرژی را به سمت بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف نموده است [۱ و ۲]. مزایای متعددی برای منابع تجدیدپذیر برشمرده‌اند که برخی از معایب منابع انرژی‌های سنتی را نیز برطرف خواهند نمود. از جمله این مزایا می‌توان به تجدیدپذیر بودن و نامحدود بودن آن‌ها و عدم ایجاد آلودگی زیست‌محیطی اشاره نمود [۳]. از حیث گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم انرژی بادی بیش‌تر از سایر منابع انرژی است. نیروگاه‌های بادی کلیه مزایای ذکرشده در مورد منابع تجدیدپذیر را دارا هستند. این نیروگاه‌ها نیاز به سوخت نداشته و هیچگونه آلاینده‌ای ندارند. اما نقطه ناامیدکننده در استفاده از منابع انرژی بادی ساختار غیرقطعی آن‌ها است [۳ و ۴]. با این وجود، بازار نیروگاه‌های بادی در ایران نیز روبه شکوفایی است و ورود به این بازار می‌تواند آینده خوبی را در درازمدت برای سرمایه‌گذاران تضمین کند. در وزارت نیرو، نصب پنج‌هزار مگاوات نیروگاه تجدیدپذیر در قانون برنامه پنجم توسعه هدف‌گذاری شده است که از این میزان چهارهزاروپانصد مگاوات آن برای توسعه باد در نظر گرفته شده است. می‌توان گفت که در پنج سال آینده نزدیک به چهارهزار مگاوات بازار برای توسعه بخش خصوصی وجود خواهد داشت [۵].

از دیگر سو جهت تأمین مطمئن و پایدار بار، بهره‌بردار شبکه سراسری باید زمان‌بندی تولید واحدها را در عین حفظ امنیت سیستم با حداقل هزینه برنامه‌ریزی کند. برای دستیابی به هدف فوق، توان باد و بار باید با حداکثر دقت پیش‌بینی شوند. وارد کردن تعداد زیادی منابع بادی، عدم قطعیت^۱ وسیعی را در برنامه‌ریزی تولید وارد می‌کند که نتیجه طبیعی آن، نیاز به ظرفیت ذخیره گردان^۲ یا نیروگاه‌های با پاسخ سریع^۳ بیش‌تر است [۶].

برنامه‌ریزی تصادفی^۴ یکی از بهترین ابزارها جهت فرمول‌بندی و حل مسائلی با پارامترهای غیرقطعی^۵ است. در قالب مفهوم برنامه‌ریزی تصادفی هر پارامتر غیرقطعی به عنوان یک متغیر تصادفی^۶ مدل‌سازی می‌شود. در مسئله UC با حضور واحدهای بادی، توان باد و بار به عنوان دو فرآیند تصادفی^۷ در نظر گرفته می‌شود. از نظر محاسباتی یک فرآیند تصادفی توسط سناریوها^۸ به صورت مناسبی مشخص می‌شود که هر سناریو تحقیقی منفرد از فرآیند تصادفی است. با افزایش تعداد

تصادفی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های خطوط انتقال ارائه نمودند. در مقاله مذکور واحدهای بادی و پیش‌بینی توان خروجی آن‌ها نیز مدنظر قرار گرفته بودند.

علیرغم مزیت‌های فراوان نمایش یک متغیر تصادفی (تابع هزینه) توسط مقدار امید ریاضی آن، عیب اصلی آن این است که دیگر پارامترهای مشخص‌کننده توزیع متغیر تصادفی در نظر گرفته نشده‌اند. به‌عنوان مثال یک متغیر تصادفی بیان‌کننده هزینه‌ای با مقدار امید قابل قبول برای تصمیم‌گیرنده، می‌تواند دربردارنده احتمالی غیرقابل صرف‌نظر برای هزینه‌های بالا و غیرقابل قبول باشد. بنابراین هدف، کنترل ریسک^{۱۳} وجود هزینه‌های بالا در مسئله UC با حضور واحدهای بادی با برنامه‌ریزی تصادفی است. رایج‌ترین روش مدیریت ریسک اضافه کردن عباراتی در فرمول‌بندی مسئله برای اندازه‌گیری ریسک مربوط به هزینه است. این عبارات به‌عنوان معیار یا شاخص ریسک شناخته شده و اصلی‌ترین آن‌ها ارزش در خطر شرطی^{۱۴} (CVaR) است؛ با استفاده از این شاخص ریسک، می‌توان مقدار هزینه در سناریوهای نامطلوب (با هزینه بالا) را با نظر بهره‌بردار و به میزان دلخواه کنترل نمود [۷].

در مطالعات یادشده، اثر میزان عدم قطعیت موجود در منابع بادی و بار بر میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار بررسی نشده است. در این مقاله اثر عدم قطعیت توان باد و بار بر اصلی‌ترین شاخص ریسک (CVaR) در حل مسئله UC با حضور واحدهای بادی موردبررسی قرار خواهد گرفت. در این مطالعه امید هزینه و ریسک هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی با در نظر گرفتن سطوح مختلف عدم قطعیت ناشی از واحدهای بادی و بار به‌صورت هم‌زمان بررسی خواهد شد.

در [۲۰] یک مدل کارآمد از لحاظ زمان محاسبات جهت برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی ارائه شده است. مدل فوق به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی ترکیبی خطی - عدد صحیح^{۱۵} (MILP) و با در نظر گرفتن تمام قیدهای بهره‌برداری از واحدهای حرارتی بوده که یک مدل قطعی و بدون در نظر گرفتن واحدهای بادی و عدم قطعیت ناشی از توان باد و بار است. در این مقاله توان تولیدی توسط واحدهای بادی و مقدار تقاضای بار به‌صورت پارامترهای تصادفی به مدل فوق اضافه شده و کل فرمول‌بندی مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای^{۱۶} اصلاح شده است. علاوه بر این، شاخص ارزش در خطر شرطی به‌صورت عبارتهایی به تابع هدف و قیدها اضافه شده است. میزان عدم قطعیت توان باد و بار به دو صورت و جداگانه لحاظ شده که یکی در نظر گرفتن میزان نفوذ توان بادی به‌صورت ضریبی از یک مقدار پایه و دیگری در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های مختلف برای توان باد و بار با استفاده از توزیع احتمال خطای پیش‌بینی به‌صورت نرمال با میانگین صفر و واریانس‌های مختلف است. پس از این مقدمه و در ادامه مفاهیم ریاضی مربوط به برنامه‌ریزی تصادفی، نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت باد و بار و همچنین مفاهیم مربوط به ریسک و شاخص CVaR ارائه خواهد شد. سپس نتایج شبیه‌سازی‌های اعمال‌شده بر سیستمی متشکل از ده واحد حرارتی و

واحدهای بادی، بخش تصادفی به برنامه‌ریزی سیستم اضافه می‌شود که این موضوع به دلیل عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی توان بادی و همچنین پیش‌بینی بار است؛ در نتیجه اطلاعات ورودی غیرقطعی در مسئله UC با حضور واحدهای بادی با برنامه‌ریزی تصادفی، تابع هدف (هزینه) حاصل غیرقطعی بوده و لازم است به‌عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شود. به دلیل اینکه چنین تابع هدفی، تابعی با مقدار حقیقی نیست، بایستی مقدار امید ریاضی^{۱۷} آن را حداقل نمود. مزیت اصلی مسئله UC تصادفی با حضور واحدهای بادی نسبت به نوع معین آن این است که برنامه‌ریزی بهینه، مقدار امید ریاضی هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی را حداقل خواهند نمود [۷].

در سال ۱۹۹۶، برنامه‌ریزی تصادفی برای اولین بار توسط Takriti و همکارانش [۸] به‌عنوان روشی برای کاهش عدم قطعیت بار و خروج ژنراتورها در قالب مسئله UC مطرح شد. در سال ۲۰۰۷، Wu و همکارانش [۹]، مسئله UC در حضور واحدهای بادی را با در نظر گرفتن قیود امنیتی شامل خارج شدن ژنراتورها و خطوط انتقال و با به‌کارگیری برنامه‌ریزی تصادفی حل نمودند. در سال ۲۰۰۸، Bouffard و همکارانش [۱۰]، با در نظر گرفتن عدم قطعیت باد در مسئله UC از برنامه‌ریزی تصادفی با در نظر گرفتن قیود امنیتی برای حل این مسئله استفاده کردند. در سال ۲۰۰۹، Pappala و همکارانش [۱۱]، از الگوریتم تجمع ذرات^{۱۸} برای مدل‌سازی عدم قطعیت توان بادی و بار در مسئله UC استفاده کرده و مسئله را با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی حل نمودند. در سال ۲۰۱۰، پروانیا و همکارانش [۱۲]، از برنامه‌ریزی تصادفی با قیدهای امنیتی^{۱۹} برای تعیین ذخیره‌های برنامه‌ریزی شده برای تأمین بار در مسئله UC استفاده کردند. در سال ۲۰۱۱، Restrepo و همکارانش [۱۳]، یک روش ترکیبی قطعی - تصادفی را برای بررسی اثر سالیانه توان بادی بر مسئله UC به کار بردند. در سال ۲۰۱۲، Rebennack و همکارانش [۱۴]، از برنامه‌ریزی تصادفی با در نظر گرفتن قیود مربوط به آلودگی هوا برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای آبی و حرارتی استفاده کردند. در سال ۲۰۱۳، Wang و همکارانش [۱۵]، از برنامه‌ریزی تصادفی با در نظر گرفتن قیود قابلیت اطمینان برای حل مسئله UC با در نظر داشتن عدم قطعیت بار استفاده کردند. در همین سال Xiong و همکارانش [۱۶]، مسئله UC را با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از خروج ژنراتورها و پیش‌بینی بار حل نمودند. در سال ۲۰۱۴، انصاری و همکارانش [۱۷]، یک روش برنامه‌ریزی تصادفی جدید با در نظر گرفتن قیدهای امنیتی جهت برنامه‌ریزی واحدهای حرارتی و آبی ارائه نمودند. آن‌ها همچنین عدم قطعیت ناشی از پیش‌بینی بار و در دسترس نبودن واحدها را نیز در نظر گرفته بودند. در [۱۸]، Zhao و همکارانش یک روش برنامه‌ریزی تصادفی و شانس محدود را برای حل مسئله UC در حضور واحدهای بادی با خروجی متغیر پیشنهاد کردند. در این روش میزان بهره‌برداری از توان بادی قابلیت تنظیم را دارا بود. در سال ۲۰۱۵ نیز Dvorkin و همکارانش [۱۹]، یک روش برنامه‌ریزی ترکیبی با استفاده از برنامه‌ریزی

یک واحد بادی موردبررسی قرار گرفته و نتیجه‌گیری‌های مربوطه ارائه خواهند شد.

۲- مفاهیم ریاضی

در این مطالعه از فرمول‌بندی ترکیبی خطی - عدد صحیح برای مدل‌سازی مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی استفاده شده است. این فرمول‌بندی با استفاده از یک متغیر دودویی و محدودیت‌های کم‌تر نسبت به مدل‌های قبلی، به صرفه‌جویی قابل‌توجهی از نظر محاسباتی می‌رسد. به علاوه فرمول‌بندی مذکور اجازه می‌دهد تا شرح دقیقی از هزینه‌های راه‌اندازی وابسته به زمان و محدودیت‌هایی مانند: تأمین بار درخواستی، تأمین حداقل ذخیره چرخان، محدودیت‌های تولید واحدها، حداقل زمان روشن و خاموش بودن و ... مهیا شود [۲۰]. برای مدل‌سازی اثر عدم قطعیت واحدهای بادی و بار در مسئله UC نیز از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده است. در این راستا و به منظور در نظر گرفتن طبیعت تصادفی توان باد و بار، انرژی باد و بار به شکل متغیرهای تصادفی به مدل ارائه شده در [۲۰] افزوده شده و فرمول‌بندی به صورت برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای اصلاح شده است. همچنین برای کنترل ریسک هزینه بهره‌برداری از واحدها، عباراتی به عنوان شاخص ریسک به فرمول‌بندی مسئله اضافه خواهند گشت.

۲-۱- برنامه‌ریزی تصادفی

برنامه‌ریزی تصادفی برای فرمول‌بندی و حل مسائلی با پارامترهای غیرقطعی به کار می‌رود. در مفهوم برنامه‌ریزی تصادفی هر پارامتر غیرقطعی به عنوان یک متغیر تصادفی مدل‌سازی می‌شود. این متغیرهای تصادفی معمولاً به وسیله مجموعه‌ای محدود از سناریوها بیان می‌شوند. یک سناریو تحقق منفرد از فرآیند تصادفی (توان باد و بار) است. برای بیان مناسب یک فرآیند تصادفی، تولید تعداد کافی از سناریوها ضروری است که این سناریوها محتمل‌ترین تحقق‌ها از فرآیند تصادفی موردنظر را پوشش می‌دهند. در حالت کلی برای دست یافتن به این موضوع نیاز است تعداد زیادی سناریو تولید شوند که ممکن است مسئله برنامه‌ریزی تصادفی موردنظر را از نظر محاسباتی غیرقابل حل کنند. این سناریوها با استفاده از اطلاعات پیش‌بینی شده، میانگین و انحراف معیار استاندارد خطای پیش‌بینی در هر مرحله زمانی تولید می‌شوند [۷]. به عنوان مثال متغیر تصادفی λ می‌تواند به صورت $\lambda(\omega)$ نشان داده شود که ω مجموعه سناریوها بوده و برابر است با N_Ω و $2, \dots, 1, \omega$ و نیز تعداد سناریوها است. همچنین هر سناریوی $\lambda(\omega)$ دارای احتمال وقوع $\pi(\omega)$ بوده و رابطه (۱) برقرار است:

$$\pi(\omega) = P(\omega | \lambda = \lambda(\omega)) , \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) = 1 \quad (1)$$

در مسائل تصمیم‌گیری دارای عدم قطعیت همچون مسئله UC با حضور واحدهای بادی مراحل در بهره‌برداری سیستم قابل تعریف می‌باشند. هر مرحله نشان‌دهنده نقطه‌ای از زمان است که تصمیمات گرفته شده‌اند یا عدم قطعیت به صورت جزئی یا کلی در مسئله ظاهر شده است. معمولاً

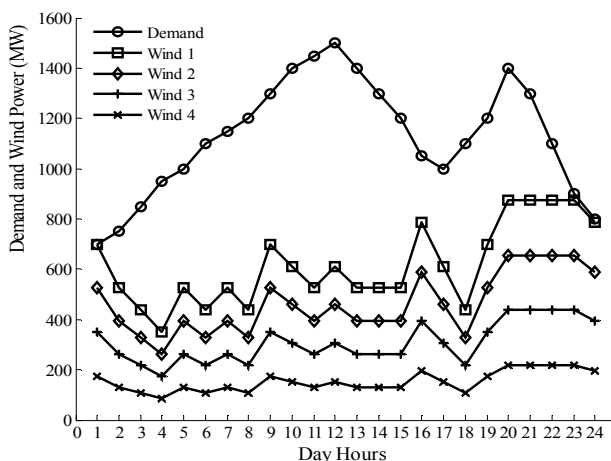
مقدار اطلاعات در دسترس تصمیم‌گیرنده از هر مرحله به مرحله دیگر متفاوت است. بنا بر تعداد مرحله‌های در نظر گرفته شده در مسئله، می‌توان میان مسائل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و چندمرحله‌ای تمایز قائل شد. برنامه‌ریزی تصادفی به کاررفته در این مقاله دارای دو مرحله تصمیم‌گیری است. تصمیم‌گیری مرحله اول بایستی در ابتدای مسئله و با تخمین مقدار متغیرهای تصادفی انجام شود. تصمیم‌گیری مرحله دوم نیز پس از تصمیم‌گیری مرحله اول و مشخص شدن مقدار واقعی متغیرهای تصادفی انجام خواهد گرفت. در این مقاله تصمیم‌گیری مرحله اول، تعیین وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها و تصمیم‌گیری مرحله دوم، تعیین توان تولیدی واحدها می‌باشد. شکل کلی مسئله برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای به صورت روابط (۲) است. در این روابط، x و y متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله اول و دوم بوده و $c, q(\omega), b, A, h(\omega), T(\omega)$ و $W(\omega)$ بردارها و ماتریس‌های معلوم با اندازه مناسب هستند. در سطر اول این رابطه، تابع هدف (هزینه) شامل عبارت $c^T x$ جهت نشان دادن هزینه مربوط به تصمیم‌گیری‌های مرحله اول و عبارت $\varepsilon \{Q(\omega)\}$ جهت نشان دادن مقدار امید ریاضی هزینه مربوط به متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله دوم، حداقل شده است.

$$\begin{aligned} \text{Minimize}_x \quad & z = c^T x + \varepsilon \{Q(\omega)\} \\ \text{Subject to} \quad & A x = b \quad x \in X \\ Q(\omega) = & \{ \text{Minimize}_{y(\omega)} \quad q(\omega)^T y(\omega) \} \\ \text{Subject to} \quad & T(\omega) x + W(\omega) y(\omega) = h(\omega) \\ & y(\omega) \in Y \quad \forall \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

۲-۲- نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت توان باد و بار

میزان عدم قطعیت توان باد و بار در این مقاله به دو صورت لحاظ می‌شود که یکی در نظر گرفتن میزان نفوذ توان بادی به صورت ضربی از یک مقدار پایه و دیگری در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های مختلف برای توان باد و بار با استفاده از تابع توزیع احتمال خطای پیش‌بینی به صورت نرمال با میانگین صفر و واریانس‌های مختلف است. روش اول برای بررسی میزان عدم قطعیت توان باد و بار، در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های مختلف برای توان باد و بار با استفاده از خطای پیش‌بینی به صورت نرمال با میانگین صفر و واریانس‌های مختلف است. با توجه به شکل ۱ می‌توان توزیع احتمالی با واریانس‌های $0.25, 0.5, 0.75$ و 1 را در نظر گرفت؛ سپس با گسسته‌سازی هر توزیع و تقسیم آن به سیزده بخش مساوی، سیزده مقدار خطا نسبت به مقدار میانگین، با احتمال مشخص برای هر خطا و برای هر واریانس به دست آورد. بدین ترتیب می‌توان سیزده سناریو با احتمال مشخص برای توان باد و بار در نظر گرفت. اطلاعات مربوط به تولید این سناریوها از [۲۱] تا [۲۴] گردآوری شده است.

روش دیگر برای بررسی میزان عدم قطعیت توان بادی، در نظر گرفتن میزان نفوذ توان بادی به صورت ضریبی از یک مقدار پایه است. مقدار بار [۲۰] و توان بادی در حالت پایه [۲۵] در طول ساعت‌های روز در شکل ۲ نشان داده شده است. این نمودارها جهت مدل‌سازی بار و ضرایب نفوذ مختلف توان بادی در مقاله حاضر به کار برده شده‌اند. با توجه به شکل می‌توان ضریب نفوذ توان بادی در حالت پایه را یک در نظر گرفته و سپس با کاهش این ضریب و در نظر گرفتن ضرایب ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ میزان نفوذ توان بادی در مسئله را کاهش داد. به عبارت دیگر ضرایب نفوذ اعمال شده به صورت ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از توان بادی در حالت پایه در نظر گرفته شده‌اند.



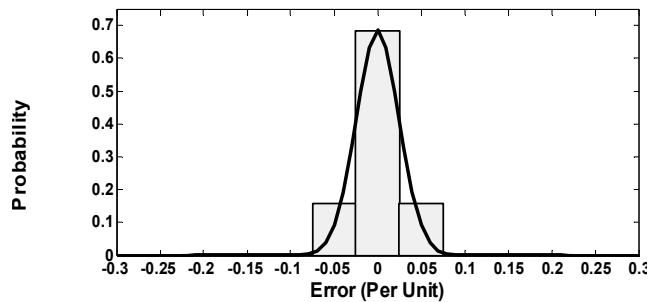
شکل ۲: مقدار بار و توان باد با ضرایب نفوذ مختلف [۲۵] و [۲۰]

۲-۳- مفهوم ریسک و شاخص ارزش در خطر شرطی

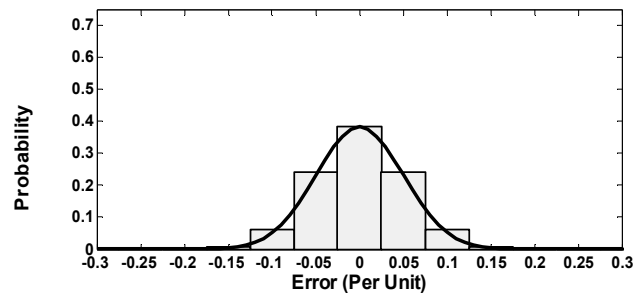
علیرغم مزیت‌های فراوان نمایش یک متغیر تصادفی (تابع هزینه) توسط مقدار امید ریاضی آن، عیب اصلی آن این است که دیگر پارامترهای مشخص‌کننده تابع توزیع احتمال متغیر تصادفی در نظر گرفته نخواهند شد. مشکل اصلی صرف‌نظر نمودن از ریسک در مسائل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مانند مسئله UC این است که مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله اول و دوم ممکن است حداقل هزینه را به قیمت وجود هزینه‌های بسیار بالا در بعضی از سناریوهای نامطلوب نتیجه دهند. برای اجتناب از چنین شرایطی توصیه می‌شود که فرمول‌بندی مسئله شامل عباراتی برای مدل‌سازی ریسک هزینه باشد. بنابراین تابع $r_{\omega}\{f(x, \omega)\}$ که مربوط به متغیر تصادفی نشان‌دهنده هزینه $f(x, \omega)$ است، یک عدد حقیقی بیان‌کننده ریسک هزینه است. تابع $r_{\omega}\{f(x, \omega)\}$ به عنوان شاخص ریسک شناخته می‌شود که رایج‌ترین آن‌ها شاخص ارزش در خطر شرطی (CVaR) می‌باشد. با در نظر گرفتن مسئله برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و ریسک می‌توان از رابطه (۳) استفاده نمود.

$$\text{Minimize}_{x,y(\omega)} (1-\beta) \cdot \varepsilon_{\omega}\{f(x, \omega)\} + \beta \cdot r_{\omega}\{f(x, \omega)\} \quad (3)$$

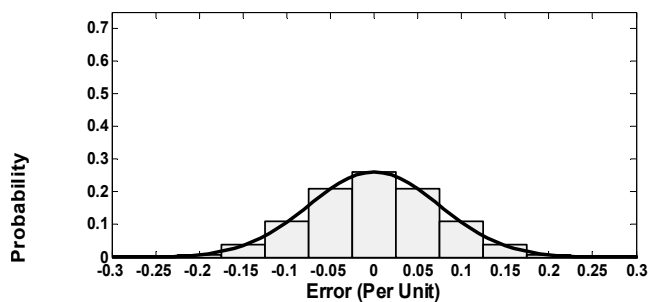
در این رابطه ε_{ω} عملگر امید ریاضی، x متغیر تصمیم‌گیری مرحله اول و X مجموعه تصمیم‌گیری‌های مرحله اول ممکن است. $\beta \in [0, 1]$ یک پارامتر وزن‌دهی است که برای بررسی تأثیر متقابل امید هزینه و ریسک



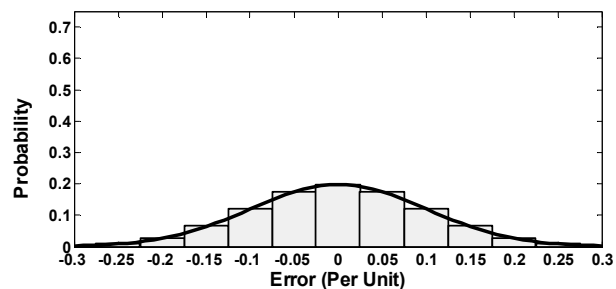
شکل ۱-الف: توزیع احتمال خطای پیش‌بینی با واریانس ۰/۰۲۵



شکل ۱-ب: توزیع احتمال خطای پیش‌بینی با واریانس ۰/۰۵



شکل ۱-ج: توزیع احتمال خطای پیش‌بینی با واریانس ۰/۰۷۵



شکل ۱-د: توزیع احتمال خطای پیش‌بینی با واریانس ۱/۰

لازم به ذکر است که تابع توزیع احتمال نرمال در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی خطای پیش‌بینی بار جهت توصیف عدم قطعیت آن با تابع توزیع احتمال نرمال در نظر گرفته شده برای خطای پیش‌بینی توان بادی یکسان خواهد بود [۲۱]. بنابراین تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده برای خطای پیش‌بینی می‌تواند به صورت یک تابع توزیع احتمال نرمال (مجموع توابع توزیع احتمال نرمال خطاهای پیش‌بینی برای واحد بادی و بار) در نظر گرفته شود؛ زیرا مجموع چند تابع توزیع احتمال نرمال خود یک تابع توزیع احتمال نرمال است.

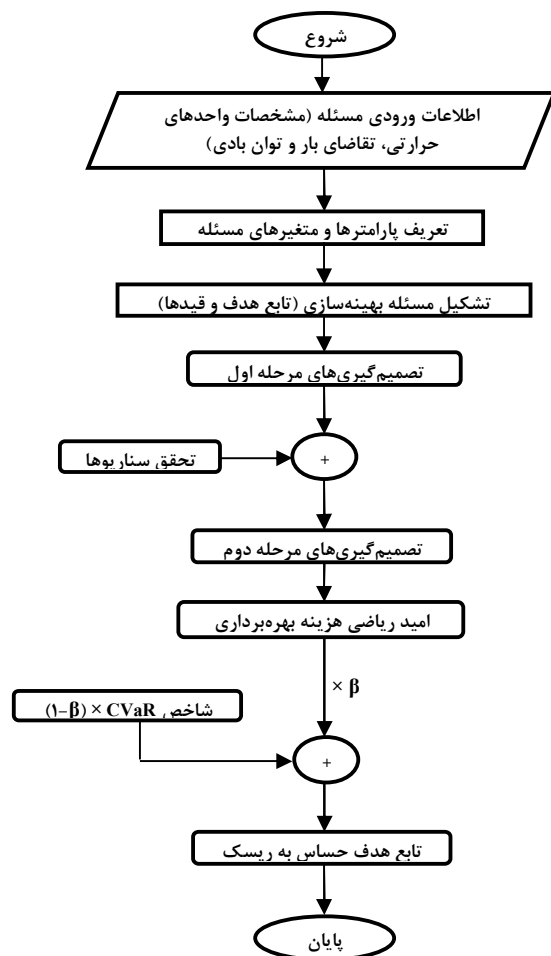
یکی از مهم‌ترین مزیت‌های CVaR که باعث برتری آن بر دیگر شاخص‌های ریسک می‌شود، توانایی آن برای تعیین کردن میانگین هزینه‌های بالاتر از η است. علاوه بر این هیچ متغیر دودویی برای محاسبه CVaR لازم نیست [۷].

۳- مدل پیشنهادی

فلوچارت حل مسئله در حالت کلی به صورت شکل ۳ است. هدف در مسئله UC حداقل نمودن هزینه بهره‌برداری از واحدها است؛ تابع هدف پیشنهادی بدون در نظر گرفتن شاخص ریسک و فقط به صورت برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای به صورت رابطه (۷) است.

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} [C_u(j,k) + C_d(j,k) + \sum_{\omega \in \Omega} P(\omega)(C_p(j,k,\omega))] \quad (7)$$

در رابطه (۷) تابع هدف به صورت مجموع هزینه راه‌اندازی، هزینه خاموش نمودن و امید ریاضی هزینه‌های تولید واحدها تعریف می‌شود.



شکل ۳: فلوچارت حل مسئله

با در نظر گرفتن مفهوم ریسک، تابع هدف مسئله تغییر و قیدهایی نیز به آن اضافه خواهند شد. شاخص ریسک استفاده شده (CVaR) می‌تواند طبق روابط (۸) و (۹) به مسئله تصادفی اصلی اضافه شود. به عبارت دیگر:

$$\min (1-\beta) \left\{ \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} [C_u(j,k) + C_d(j,k)] + \sum_{\omega \in \Omega} P(\omega)(C_p(j,k,\omega)) \right\} + \beta \left(\eta + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega \in \Omega} P(\omega) \mu(\omega) \right) \quad (8)$$

هزینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیار تعیین پارامتر β اهمیت مفهوم ریسک برای بهره‌بردار سیستم است. هرچه مقدار پارامتر β بیش‌تر شود اهمیت ریسک هزینه برای بهره‌بردار بیش‌تر خواهد شد. اگر β صفر باشد، از عبارت ریسک در تابع هدف صرف‌نظر شده و مسئله حاصل به مسئله‌ای بدون ریسک تبدیل می‌شود. با افزایش β عبارت امید هزینه نسبت به عبارت ریسک، دارای اهمیت کم‌تری می‌گردد و در نتیجه اهمیت ریسک در بهره‌برداری سیستم بیش‌تر می‌شود.

به ازای $\alpha \in (0, 1)$ مقدار در خطر شرطی (CVaR) به صورت مقدار امید ریاضی هزینه‌های با مقدار بیش‌تر از η تعریف می‌شود. اگر تمام سناریوهای مربوط به هزینه‌ها هم احتمال باشند، CVaR به صورت مقدار امید $\{ (1-\alpha) \times 100\} \%$ بدترین سناریوها محاسبه می‌شود. انتخاب پارامتر α طبق نظر بهره‌بردار صورت خواهد گرفت. به عنوان مثال اگر بهره‌بردار بخواهد هزینه ۴۰ درصد از بدترین سناریوها را کنترل کند پارامتر α را برابر با 0.6 قرار خواهد داد. CVaR برای یک توزیع گسسته به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود [۷]:

$$CVaR(x, \alpha) = \min \left\{ \eta + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega \in \Omega} \max \{ \eta - f(x, \omega), 0 \} \right\} \quad (9)$$

توضیح اینکه عبارت $\max \{ \eta - f(x, \omega), 0 \}$ در رابطه (۹) جهت مشخص نمودن اختلاف هزینه مثبت میان هزینه هر یک از سناریوها و هزینه η در نظر گرفته شده است. همچنین $CVaR(\alpha, x)$ می‌تواند طبق روابط (۵) و (۶) در مسئله بدون ریسک در نظر گرفته شود. در این روابط η یک متغیر کمکی و $\mu(\omega)$ یک متغیر پیوسته غیر منفی بوده که بیانگر اختلاف هزینه هر یک از سناریوها و هزینه η است. در نتیجه متغیر $\mu(\omega)$ برابر است با عبارت $\eta - f(x, \omega)$. در رابطه (۵) حاصل ضرب شاخص CVaR (رابطه (۹)) در ضریب وزن دهی β و حاصل ضرب امید ریاضی هزینه‌ها (رابطه (۲)) در ضریب $(1-\beta)$ با یکدیگر جمع شده و تابع هدف را تشکیل داده‌اند. لازم به ذکر است که در این رابطه عبارت $\sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \times \{ \dots \}$ امید ریاضی (E_ω) را محاسبه خواهد کرد. در رابطه (۶) نیز قیدهای مربوط به متغیرهای تصمیم‌گیری مرحله اول و دوم در حالت کلی نشان داده شده‌اند. همچنین در این رابطه غیر منفی بودن متغیر کمکی $\mu(\omega)$ و برابری آن با اختلاف هزینه هر یک از سناریوها و هزینه η نشان داده شده است.

$$\text{Minimize}_{x, y(\omega), \theta(\omega), \eta} (1-\beta) [c^T x + \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) q(\omega)^T y(\omega)] + \beta \left[\eta + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \mu(\omega) \right] \quad (10)$$

$$\text{Subject to} \quad A \cdot x = b \\ T(\omega) \cdot x + W(\omega) \cdot y(\omega) = h(\omega) \\ (c^T \cdot x + q(\omega)^T \cdot y(\omega)) - \eta \leq \mu(\omega) \\ \mu(\omega) \geq 0 \quad (11)$$

$$\sum_{\forall j \in J} P(j, k, \omega) = [D(k) - P_W(k)] [1 + P_E(k, \omega)] \quad (19)$$

$$\sum_{\forall j \in J} P_{avail}(j, k, \omega) \geq R(k) + D(k) [1 + P_E(k, \omega)] \quad (20)$$

$$R(k) = P_{avail}(j, k, \omega) - P(j, k, \omega) \quad (21)$$

قیدهای مربوط به تولید توان هر واحد به صورت زیر می‌باشند:

$$P_{min}(j) V(j, k) \leq P(j, k, \omega) \leq P_{max}(j) V(j, k) \quad (22)$$

$$0 \leq P_{avail}(j, k, \omega) \leq P_{max}(j) V(j, k) \quad (23)$$

قیدهای مربوط به حد افزایش و کاهش تولید واحدها به ترتیب به صورت روابط (۲۴) و (۲۵) و (۲۶) می‌باشند [۲۰].

$$P_{avail}(j, k, \omega) \leq P(j, k-1, \omega) + RU(j) V(j, k) + SU(j) [V(j, k) - V(j, k-1)] + P_{max}(j) [1 - V(j, k)] \quad (24)$$

$$P_{avail}(j, k, \omega) \leq P_{max}(j) V(j, k+1) + SD(j) [V(j, k) - V(j, k+1)] \quad (25)$$

$$P(j, k-1, \omega) - P(j, k, \omega) \leq RD(j) V(j, k) + SD(j) [V(j, k-1) - V(j, k)] + P_{max}(j) [1 - V(j, k-1)] \quad (26)$$

قیدهای مربوط به حداقل زمان روشن بودن هر واحد به صورت زیر می‌باشند [۲۰]

$$G(j) = \min \{T, [UT(j) - U_0(j)] V_0(j)\} \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^{G(j)} [1 - V(j, k)] = 0, \quad \forall j \in J \quad (28)$$

$$\sum_{n=k}^{k+UT(j)-1} V(j, n) \geq UT(j) [V(j, k) - V(j, k-1)] \quad (29)$$

$$\sum_{n=k}^T (V(j, n) - [V(j, k) - V(j, k-1)]) \geq 0 \quad (30)$$

قیدهای مربوط به حداقل زمان خاموش بودن هر واحد به صورت زیر می‌باشند:

$$L(j) = \min \{T, [DT(j) - S_0(j)] [1 - V_0(j)]\} \quad (31)$$

$$\sum_{k=1}^{L(j)} V(j, k) = 0, \quad \forall j \in J \quad (32)$$

$$\sum_{n=k}^{k+DT(j)-1} [1 - V(j, n)] \geq DT(j) [V(j, k-1) - V(j, k)] \quad (33)$$

$$\sum_{n=k}^T (1 - V(j, n) - [V(j, k-1) - V(j, k)]) \geq 0 \quad (34)$$

۴- شبیه‌سازی

مدل ارائه شده در بخش قبل به سیستمی متشکل از ده واحد حرارتی و یک واحد بادی بر روی یک شین اعمال شده است. مشخصات مربوط به واحدهای حرارتی در جدول ۱ آمده است. بازه‌های زمانی برابر یک ساعت و کل دوره زمانی برنامه‌ریزی یک شبانه‌روز متشکل از ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. میانگین بار پیش‌بینی شده ساعتی نیز در جدول ۲ آورده شده است. همچنین میزان میانگین توان باد پیش‌بینی شده در حالت پایه در جدول ۳ آمده است. ضرایب نفوذ اعمال شده برای توان بادی به صورت ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از مقادیر ارائه شده در جدول ۳ در نظر گرفته شده‌اند. به علاوه، ضرایب احتمال مربوط به هر واریانس خطای پیش‌بینی توان باد و بار برای هر سناریو در جدول ۴ ارائه شده است. توضیح این‌که سناریوی هفت (سناریوی اصلی) برای بار و

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} [C_p(j, k, \omega) + C_u(j, k) + C_d(j, k)] - \eta \leq \mu(\omega) \quad (9)$$

در این رابطه $\mu(\omega)$ یک متغیر پیوسته غیر منفی است و برابر است با اختلاف هزینه با مقدار هزینه η در هر سناریو. تابع هزینه تولید هر واحد معمولاً به صورت یک تابع غیر خطی و درجه دوم از توان خروجی واحد بیان می‌شود، درحالی‌که تابع هزینه راه‌اندازی واحد عموماً به صورت یک تابع غیر خطی و نمایی از ساعت‌های خاموشی قبل از راه‌اندازی واحد مدل می‌شود. بنابراین تابع هدف فوق غیر خطی بوده و حل آن با روش‌های معمول دشوار است. در نتیجه یک تقریب خطی از توابع غیر خطی هزینه تولید و راه‌اندازی واحدها در نظر گرفته می‌شود.

تابع هزینه تولید درجه دوم هر واحد معمولاً به صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود.

$$C_p(j, k, \omega) = a(j) V(j, k) + b(j) P(j, k, \omega) + c(j) P^2(j, k, \omega) \quad (10)$$

تابع هزینه فوق می‌تواند با یک تابع تکه‌ای - خطی تقریب زده شود و اگر تعداد تکه خطاها به اندازه کافی باشند تقریب به‌طور مناسبی انجام خواهد شد. روابط مربوط به این تقریب خطی در زیر آمده‌اند:

$$C_p(j, k, \omega) = A(j) V(j, k) + \sum_{L=1}^{NL_j} F(j, L) \delta(j, L, k, \omega) \quad (11)$$

$$P(j, k, \omega) = P_{min}(j) V(j, k) + \sum_{L=1}^{NL_j} \delta(j, L, k, \omega) \quad (12)$$

$$A(j) = a(j) + b(j) P_{min}(j) + c(j) P_{min}^2(j) \quad (13)$$

تابع هزینه راه‌اندازی معمولاً به صورت تابعی نمایی از ساعات خاموشی قبل از راه‌اندازی هر واحد در نظر گرفته می‌شود. این تابع هزینه می‌تواند به صورت مناسبی با یک تابع پله‌ای تقریب زده شود. روابط مربوط به این تقریب به صورت زیر می‌باشند:

$$C_u(j, k) \geq K(j, t) \left[V(j, k) - \sum_{n=1}^t V(j, k-n) \right] \quad (14)$$

$$\forall j \in J, \quad \forall k \in K, \quad \forall t = 1, \dots, ND_j \quad (15)$$

$$C_u(j, k) \geq 0, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (16)$$

در صورت خاموشی یک واحد، هزینه خاموش کردن آن واحد $(C_{sh}(j))$ به دلیل تلفات سوخت، معمولاً ثابت در نظر گرفته می‌شود. با این وجود می‌توان از روابط زیر هم برای فرمول‌بندی هزینه خاموشی استفاده نمود:

$$C_d(j, k) \geq C_{sh}(j) [V(j, k-1) - V(j, k)] \quad (17)$$

$$C_d(j, k) \geq 0, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (18)$$

قیدهای مساوی و نامساوی متعددی از جمله تعادل توان‌های تولیدی و مصرفی، ذخیره چرخان، تولید توان واحدها، حد تغییر تولید آن‌ها، حداقل زمان روشن و خاموش بودن و ... در مسئله UC با حضور واحدهای بادی بایستی رعایت شوند. قید مربوط به تعادل توان‌های تولیدی و مصرفی و قیدهای ذخیره چرخان، به ترتیب به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) و (۲۱) می‌باشند.

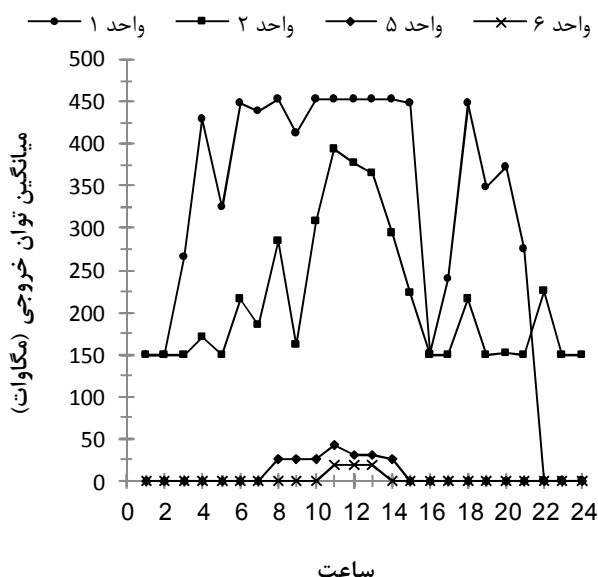
جدول ۳: میانگین توان بادی پیش‌بینی شده در ۲۴ ساعت [۲۵]

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
توان	۷۰۰	۵۲۵	۴۳۵	۳۵۰	۵۲۵	۴۳۵	۵۲۵	۴۳۵
ساعت	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
توان	۷۰۰	۶۱۰	۵۲۵	۶۱۰	۵۲۵	۵۲۵	۵۲۵	۷۸۵
ساعت	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
توان	۶۱۰	۴۳۵	۷۰۰	۸۷۵	۸۷۵	۸۷۵	۸۷۵	۷۸۵

جدول ۴: خطاهای پیش‌بینی با واریانس‌های متفاوت و احتمال مربوطه

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶
درصد خطا	-۰/۳	-۰/۲۵	-۰/۲	-۰/۱۵	-۰/۱	-۰/۰۵
واریانس ۱	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۱۳	۰/۱۵۷۳
واریانس ۲	۰	۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶
واریانس ۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۳۸	۰/۱۱۰۹	۰/۲۱۰۸
واریانس ۴	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۲۷۸	۰/۰۰۶۵۶	۰/۱۲۱۰	۰/۱۷۴۷
سناریو	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
درصد خطا	-۰/۵	-۰/۱	-۰/۱۵	-۰/۲	-۰/۲۵	-۰/۳
واریانس ۱	۰/۱۵۷۳	۰/۰۰۱۳	۰	۰	۰	۰
واریانس ۲	۰/۲۴۱۷	۰/۰۰۶۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۰	۰
واریانس ۳	۰/۲۱۰۸	۰/۱۱۰۹	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱
واریانس ۴	۰/۱۷۴۷	۰/۱۲۱۰	۰/۰۰۶۵۶	۰/۰۰۲۷۸	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۳۰

برنامه‌ریزی بهینه در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی در طول ساعات روز به ازای واریانس‌ها (Var) و ضرایب نفوذ (PL) مختلف و پارامترهای α و β به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۰/۵، در جدول‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. در این جدول‌ها خانه‌های تیره نشان‌دهنده روشن بودن واحدها هستند. با توجه به نتایج حاصل‌شده با افزایش ضریب نفوذ توان بادی، تعداد خانه‌های تیره در جدول‌ها کاهش می‌یابد که این موضوع نشان‌دهنده تولید کمتر واحدهای حرارتی است. همچنین میانگین (امید) توان خروجی واحدهای اول، دوم، پنجم و ششم به ازای ضریب نفوذ ۱ و واریانس ۰/۱ در هر بازه زمانی به صورت شکل ۴ است.



شکل ۴: میانگین توان خروجی واحدهای حرارتی در بازه‌های زمانی

توان باد به ترتیب به صورت جدول‌های ۲ و ۳ بوده و سایر سناریوها دارای درصدی خطا نسبت به سناریوی اصلی هستند. مدل مسئله در محیط نرم‌افزار GAMS نسخه ۲۴ پیاده شده و توسط حل‌گر CPLEX نسخه ۱۱ حل شده است.

جدول ۱: مشخصات واحدهای حرارتی [۲۰]

مشخصات	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵
P_{min}	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۲۵
P_{max}	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۰
UT	۸	۸	۵	۵	۶
DT	۸	۸	۵	۵	۶
Ini	+۸	+۸	-۵	-۵	-۶
a	۱۰۰۰	۹۷۰	۷۰۰	۶۸۰	۴۵۰
b	۱۶	۱۷	۱۶	۱۶	۱۹
c	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳۹۸
hc	۴۵۰۰	۵۰۰۰	۵۵۰	۵۶۰	۹۰۰
cc	۹۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۱۰۰	۱۱۲۰	۱۸۰۰
t^{cold}	۵	۵	۴	۴	۴
C_{sh}	۴۵۰۰	۵۰۰۰	۵۵۰	۵۶۰	۹۰۰
RU	۲۲۵	۲۲۵	۵۰	۵۰	۶۰
RD	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۰
SU	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۲۵
SD	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۲۵

مشخصات	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰
P_{min}	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۱۰
P_{max}	۸۰	۸۵	۵۵	۵۵	۵۵
UT	۳	۳	۱	۱	۱
DT	۳	۳	۱	۱	۱
Ini	-۳	-۳	-۱	-۱	-۱
a	۳۷۰	۴۸۰	۶۶۰	۶۶۵	۶۷۰
b	۲۲	۲۷	۲۵	۲۷	۲۷
c	۰/۰۰۷۱۲	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۴۱۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۷۳
hc	۱۷۰	۲۶۰	۳۰	۳۰	۳۰
cc	۳۴۰	۵۲۰	۶۰	۶۰	۶۰
t^{cold}	۲	۲	۰	۰	۰
C_{sh}	۱۷۰	۲۶۰	۳۰	۳۰	۳۰
RU	۶۰	۶۰	۱۳۵	۱۳۵	۱۳۵
RD	۸۰	۸۵	۵۵	۵۵	۵۵
SU	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۱۰
SD	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۱۰

جدول ۲: میانگین تقاضای بار ۲۴ ساعته [۲۰]

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
بار	۷۰۰	۷۵۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۱۵۰	۲۰۰
ساعت	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
بار	۱۳۰۰	۱۴۰۰	۱۴۵۰	۱۵۰۰	۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۰۵۰
ساعت	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
بار	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰	۹۰۰	۸۰۰

جدول ۵: برنامه‌ریزی بهینه در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی در طول ساعات روز به ازای واریانس ۰/۰۲۵ و ضرایب نفوذ مختلف

[illegible][illegible]

جدول ۶: برنامه‌ریزی بهینه در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی در طول ساعات روز به ازای واریانس ۰/۰۵ و ضرایب نفوذ مختلف

[illegible][illegible]

جدول ۱۱: مقادیر امید هزینه با لحاظ شدن و بدون لحاظ شدن ریسک و شاخص CVaR برای ضرایب نفوذ مختلف و واریانس ۰/۰۷۵

ضریب نفوذ	امید هزینه (بدون ریسک)	امید هزینه (با ریسک)	CVaR
۱	۲۷۵۷۹۹	۲۷۸۸۷۲	۲۹۱۵۸۰
۰/۷۵	۳۳۹۲۱۹	۳۴۰۹۶۷	۳۶۱۵۱۴
۰/۵۰	۴۱۱۶۷۶	۴۱۲۹۹۰	۴۴۰۵۵۶
۰/۲۵	۴۹۵۳۸۴	۴۹۵۹۴۶	۵۳۲۵۴۴

جدول ۱۲: مقادیر امید هزینه با لحاظ شدن و بدون لحاظ شدن ریسک و شاخص CVaR برای ضرایب نفوذ مختلف و واریانس ۰/۱

ضریب نفوذ	امید هزینه (بدون ریسک)	امید هزینه (با ریسک)	CVaR
۱	۲۷۶۹۹۸	۲۸۰۲۵۹	۲۹۹۰۵۰
۰/۷۵	۳۴۱۹۸۷	۳۴۳۰۶۱	۳۷۱۲۴۸
۰/۵۰	۴۱۶۲۳۴	۴۱۶۷۱۵	۴۵۴۸۹۰
۰/۲۵	۵۰۲۰۶۵	۵۰۳۵۱۸	۵۵۰۹۴۹

با توجه به نتایج می‌توان منحنی‌های تغییرات CVaR بر حسب امید هزینه را با تغییر واریانس و ضریب نفوذ مطابق با شکل‌های ۵ و ۶ رسم نمود. در شکل ۵ با افزایش واریانس خطای پیش‌بینی و به تبع آن کاهش دقت پیش‌بینی توان باد و بار، مقدار هزینه بهره‌برداری از واحدها در هر یک از سناریوها افزایش می‌یابد. از آنجایی که مقدار امید هزینه و شاخص CVaR هر دو به مقدار هزینه در هر یک از سناریوها بستگی دارند، در نتیجه هر دوی این مقادیر افزایش می‌یابند. به طریق مشابه در شکل ۶ با کاهش ضریب نفوذ توان بادی در مسئله، واحدهای حرارتی بایستی تولید خود را جهت تأمین بار افزایش دهند. با افزایش توان تولیدی واحدهای حرارتی، هزینه بهره‌برداری از آن‌ها در هریک از سناریوها نیز افزایش می‌یابد. با افزایش هزینه بهره‌برداری در هر یک از سناریوها، مقدار امید ریاضی هزینه بهره‌برداری از آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش هزینه بهره‌برداری در هر یک از سناریوها، مقدار شاخص CVaR نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به اهمیت متغیر CVaR، می‌توان رفتار آن نسبت به تغییرات پارامتر α را نیز بررسی نمود. همان‌گونه که بیان شد اگر تمام سناریوهای مربوط به هزینه‌ها هم احتمال باشند، متغیر CVaR به صورت مقدار امید $\{(\alpha - 1) \times 100\}$ بدترین سناریوها محاسبه می‌شود. با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که با افزایش پارامتر α ، مقدار CVaR افزایش می‌یابد. در این نمودار تغییرات پارامتر α و واریانس به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در شکل ۸ بررسی تغییرات CVaR بر حسب تغییرات پارامتر α و ضریب نفوذ به صورت هم‌زمان انجام شده است.

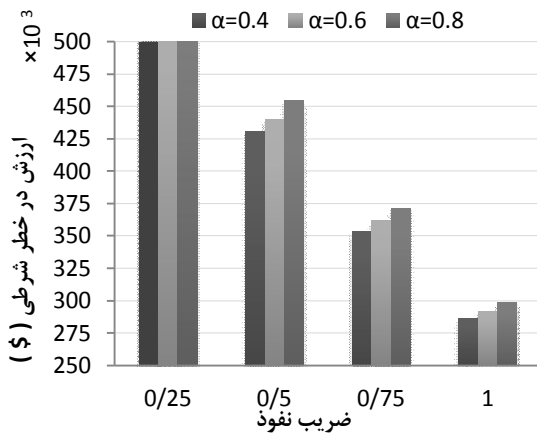
می‌توان مقادیر امید هزینه بدون در نظر گرفته شدن مفهوم ریسک (ستون دوم جدول‌های ۹ تا ۱۲)، مقادیر امید هزینه با در نظر گرفته شدن مفهوم ریسک (ستون سوم جدول‌های ۹ تا ۱۲) و مقادیر شاخص CVaR (ستون چهارم جدول‌های ۹ تا ۱۲) را برای ضرایب نفوذ توان بادی و واریانس‌های خطای پیش‌بینی توان باد و بار مختلف محاسبه نمود. در اینجا هدف بررسی اثر تغییرات ضریب نفوذ و واریانس بر مقادیر امید هزینه و CVaR بوده، بنابراین پارامترهای α و β ثابت و به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۰/۵ در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به این مقادیر مشاهده می‌شود که امید هزینه بهره‌برداری از واحدها بدون لحاظ شدن ریسک نسبت به حالت لحاظ شدن ریسک کمتر بوده اما احتمال وجود هزینه‌های بالاتر در برخی از سناریوهای نامطلوب بیشتر است. زیرا شاخص CVaR هزینه‌های بالا را در سناریوهای نامطلوب کنترل می‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده در هر یک از جدول‌های ۹ تا ۱۲ با کاهش ضریب نفوذ توان بادی از مقدار پایه تا ۲۵ درصد آن، مقادیر امید هزینه و CVaR هر دو افزایش می‌یابند. به عنوان مثال و با در نظر گرفتن جدول ۹، با کاهش ضریب نفوذ از ۱ به ۰/۲۵ و به ازای واریانس ثابت ۰/۰۲۵، مقدار امید هزینه از ۲۷۳۹۲۱ به ۴۸۶۴۸۸ و مقدار CVaR از ۲۷۷۹۶۹ به ۴۹۵۴۰۴ افزایش می‌یابند. همچنین با مقایسه جدول‌های ۹ تا ۱۲ با یکدیگر مشاهده می‌شود که با افزایش واریانس خطای پیش‌بینی مقادیر امید هزینه و CVaR هر دو افزایش می‌یابند. به طور نمونه و با مقایسه جدول‌های ۹ و ۱۲، با افزایش واریانس از ۰/۰۲۵ به ۰/۱ و به ازای ضریب نفوذ ثابت یک، مقدار امید هزینه از ۲۷۳۹۲۱ به ۲۷۷۲۵۹ و مقدار CVaR از ۲۷۷۹۶۹ به ۲۹۹۰۵۰ افزایش می‌یابند.

جدول ۹: مقادیر امید هزینه با لحاظ شدن و بدون لحاظ شدن ریسک و شاخص CVaR برای ضرایب نفوذ مختلف و واریانس ۰/۰۲۵

ضریب نفوذ	امید هزینه (بدون ریسک)	امید هزینه (با ریسک)	CVaR
۱	۲۷۳۱۹۱	۲۷۳۹۲۱	۲۷۷۹۶۹
۰/۷۵	۳۳۴۰۳۰	۳۳۴۳۹۰	۳۴۰۷۳۴
۰/۵۰	۴۰۴۴۰۸	۴۱۰۷۳۹	۴۱۲۴۷۱
۰/۲۵	۴۸۵۵۴۶	۴۸۶۴۸۸	۴۹۵۴۰۴

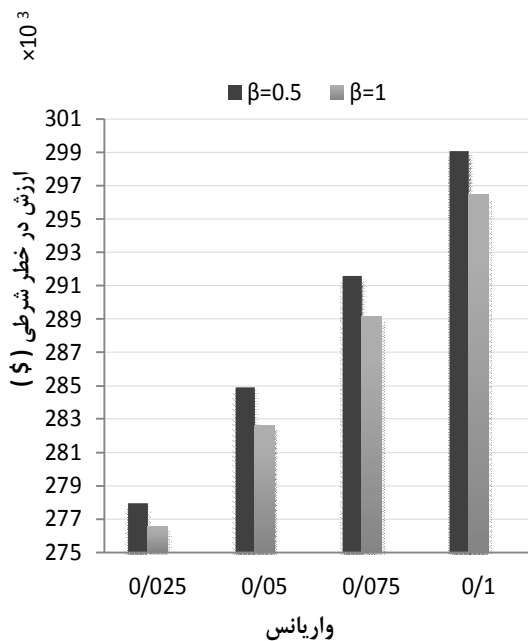
جدول ۱۰: مقادیر امید هزینه با لحاظ شدن و بدون لحاظ شدن ریسک و شاخص CVaR برای ضرایب نفوذ مختلف و واریانس ۰/۰۵

ضریب نفوذ	امید هزینه (بدون ریسک)	امید هزینه (با ریسک)	CVaR
۱	۲۷۴۳۷۸	۲۷۶۶۶۳	۲۸۴۹۰۲
۰/۷۵	۳۳۶۶۸۴	۳۳۷۶۰۴	۳۵۱۰۱۶
۰/۵۰	۴۰۶۹۶۵	۴۱۱۰۵۲	۴۲۵۹۴۲
۰/۲۵	۴۸۹۱۳۴	۴۸۹۴۴۹	۵۱۲۸۹۴

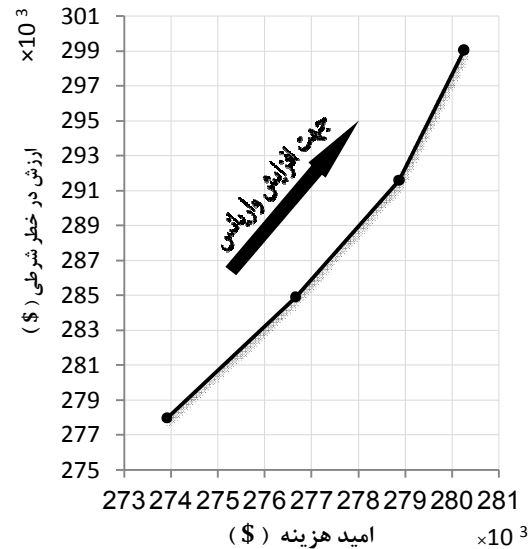


شکل ۸: تغییرات CVaR با تغییر ضریب نفوذ و پارامتر α

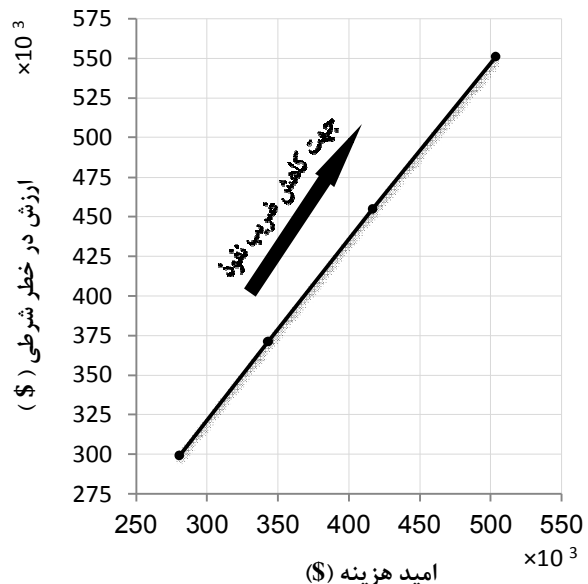
به صورت مشابه می‌توان تغییرات CVaR نسبت به تغییرات پارامتر β را نیز بررسی نمود. β یک پارامتر وزن‌دهی است که برای بررسی تأثیر متقابل امید هزینه و ریسک هزینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که با افزایش پارامتر β ، مقدار CVaR کاهش می‌یابد. در این نمودار تغییرات پارامتر β و واریانس به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در شکل ۱۰ بررسی تغییرات CVaR بر حسب تغییرات پارامتر β و ضریب نفوذ به صورت هم‌زمان انجام شده است.



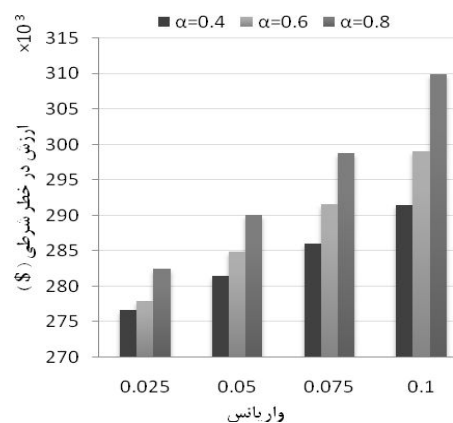
شکل ۹: تغییرات CVaR با تغییر واریانس و پارامتر β



شکل ۵: تغییرات CVaR بر حسب امید هزینه با تغییر واریانس



شکل ۶: تغییرات CVaR بر حسب امید هزینه با تغییر ضریب نفوذ



شکل ۷: تغییرات CVaR با تغییر واریانس و پارامتر α

جدول ۱۳: میانگین توان خورشیدی پیش‌بینی شده در ۲۴ ساعت [۲۶]

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
توان	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵۰	۳۰۰
ساعت	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
توان	۳۵۰	۴۰۰	۵۵۰	۶۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۷۰۰	۵۵۰
ساعت	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
توان	۴۰۰	۳۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۴: مقادیر امید هزینه و CVaR برای ضرایب نفوذ مجموع توان بادی و خورشیدی و واریانس ۰/۰۲۵ در سیستمی با ۵۰ عدد ژنراتور

ضریب نفوذ	امید هزینه	CVaR
۱	۱۹۴۷۳۹۶	۱۹۶۶۸۵۲
۰/۷۵	۲۵۳۱۰۷۱	۲۵۵۸۳۹۲
۰/۵۰	۳۱۵۴۴۶۹	۳۱۹۵۷۳۱
۰/۲۵	۳۸۳۴۵۸۰	۳۸۹۶۱۶۲

جدول ۱۵: مقادیر امید هزینه و CVaR برای ضرایب نفوذ مجموع توان بادی و خورشیدی و واریانس ۰/۰۵ در سیستمی با ۵۰ عدد ژنراتور

ضریب نفوذ	امید هزینه	CVaR
۱	۱۹۵۰۷۱۲	۱۹۷۷۴۹۶
۰/۷۵	۲۵۳۴۷۳۷	۲۵۶۵۰۵۱
۰/۵۰	۳۱۵۶۳۴	۳۲۰۲۹۶۱
۰/۲۵	۳۸۳۶۸۴۰	۳۹۰۱۵۹۶

جدول ۱۶: مقادیر امید هزینه و CVaR برای ضرایب نفوذ مجموع توان بادی و خورشیدی و واریانس ۰/۰۷۵ در سیستمی با ۵۰ عدد ژنراتور

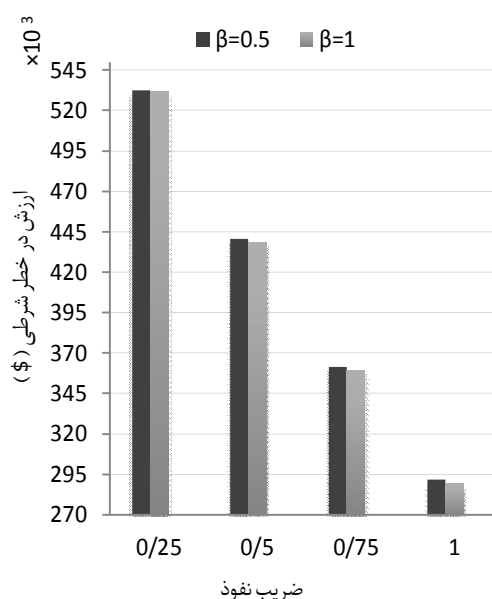
ضریب نفوذ	امید هزینه	CVaR
۱	۱۹۵۴۵۲۷	۱۹۹۰۰۱۸
۰/۷۵	۲۵۳۷۹۸۲	۲۵۷۵۶۵۰
۰/۵۰	۳۱۵۸۶۶۱	۳۲۱۰۷۰۵
۰/۲۵	۳۸۳۸۲۲۹	۳۹۰۷۸۳۷

جدول ۱۷: مقادیر امید هزینه و CVaR برای ضرایب نفوذ مجموع توان بادی و خورشیدی و واریانس ۰/۱ در سیستمی با ۵۰ عدد ژنراتور

ضریب نفوذ	امید هزینه	CVaR
۱	۱۹۶۰۸۴۵	۲۲۰۵۷۲۸
۰/۷۵	۲۵۴۲۱۶۰	۲۵۸۷۷۷۳
۰/۵۰	۳۱۶۱۱۴۶	۳۲۱۸۰۷۲
۰/۲۵	۳۸۴۰۵۹۵	۳۹۱۵۳۷۴

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر عدم قطعیت توان بادی و بار پیش‌بینی شده بر اصلی‌ترین شاخص ریسک (CVaR) در حل مسئله UC مورد مطالعه واقع شد. در این مطالعه، امید هزینه و ریسک هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی


 شکل ۱۰: تغییرات CVaR با تغییر ضریب نفوذ و پارامتر β

برای بررسی نتایج روی یک سیستم بزرگ‌تر سیستمی متشکل از پنجاه عدد ژنراتور و پنج واحد بادی و پنج واحد خورشیدی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر از هر یک از ده ژنراتور با مشخصات قید شده در جدول ۱، تعداد پنج عدد را در نظر گرفته و بدین ترتیب در مجموع پنجاه عدد ژنراتور در مسئله در نظر گرفته خواهد شد. پنج واحد بادی هر یک با میانگین توان تولیدی قید شده در جدول ۳ نیز در نظر گرفته خواهد شد. همچنین در این حالت پنج واحد خورشیدی هر یک با میانگین توان تولیدی قید شده در جدول ۱۳ به شین شامل ژنراتورها و واحدهای بادی و بار اضافه می‌گردند. ساختار و نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در توان خروجی واحدهای بادی و خورشیدی کاملاً یکسان است و تنها تفاوت در مقداردهی میانگین توان تولیدی واحدهای بادی و خورشیدی در ساعت‌های مختلف است. بنابراین مدل‌سازی عدم قطعیت توان خروجی واحدهای خورشیدی با در نظر گرفتن یک تابع توزیع احتمال نرمال برای خطای پیش‌بینی توان خورشیدی انجام خواهد شد. لازم به ذکر است که مقدار بار در نظر گرفته شده نیز پنج برابر خواهد شد. با توجه به نتایج درج شده در جدول‌های ۱۴ تا ۱۷ برای واریانس‌ها و ضرایب نفوذ مختلف مربوط به مجموع توان بادی و خورشیدی، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد ژنراتورها و واحدهای بادی و مقدار بار و همچنین اضافه شدن واحدهای خورشیدی، امید هزینه بهره‌برداری از واحدها و مقدار شاخص CVaR افزایش چشم‌گیری خواهد داشت که دلیل اصلی این موضوع وجود رابطه غیرخطی (توان دوم) میان هزینه تولید و مقدار توان تولیدی هر یک از واحدها است. لازم به ذکر است که اضافه شدن واحدهای خورشیدی به مسئله باعث کاهش نسبی هزینه بهره‌برداری از واحدها نسبت به حالت بهره‌برداری بدون استفاده از واحدهای خورشیدی خواهد شد.

IEEE Trans. on Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 306-316, 2008.

[11] V.S. Pappala, I. Erlich, K. Rohrig and J. Dobschinski, "A stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 940-950, 2009.

[12] M. Parvania and M. Fotuhi, "Demand response scheduling by stochastic SCUC," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 89-98, 2010.

[13] J.F. Restrepo and F.D. Galiana, "Assessing the yearly impact of wind power through a new hybrid deterministic/stochastic unit commitment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 401-410, 2011.

[14] S. Rebennack, B. Flach, M.V.F. Pereira and P.M. Pardalos, "Stochastic hydro-thermal scheduling under CO₂ emissions constraints," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 58-68, 2012.

[15] Q. Wang, J. Wang and Y. Guan, "Stochastic unit commitment with uncertain demand response," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 562-563, 2013.

[16] P. Xiong and P. Jirutitijaroen, "A Stochastic optimization formulation of unit commitment with reliability constraints," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2200-2208, 2013.

[17] M.R. Ansari, N. Amjady and B. Vatani, "Stochastic security-constrained hydrothermal unit commitment considering uncertainty of load forecast, inflows to reservoirs and unavailability of units by a new hybrid decomposition strategy," *IET Journals of Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 12, pp. 1900-1915, 2014.

[18] C. Zhao, Q. Wang, J. Wang and Y. Guan, "Expected value and chance constrained stochastic unit commitment ensuring wind power utilization," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 2696-2705, 2014.

[19] Y. Dvorkin, H. Pandzic, M.A. Ortega-Vazquez and D.S. Kirschen, "A hybrid stochastic/interval approach to transmission-constrained unit commitment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 621-631, 2015.

[20] M. Carrión and J.M. Arroyo, "A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1371-1378, 2006.

[21] 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. 1-11, 2008.

[22] J.M. Morales, A.J. Conejo and J. Perez-Ruiz, "Economic valuation of reserves in power systems with high penetration of wind power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 900-910, 2009.

[23] S.S. Reddy, P.R. Bijwe and A.R. Abhyankar, "Joint Energy and Spinning Reserve Market Clearing Incorporating Wind Power and Load Forecast Uncertainties," *IEEE Systems Journals*, vol. pp, no. 99, 2013.

[24] A.L. Garcia, *Probability, Statistics and Random Processes for Electrical Engineering*, Pearson Education, Inc, 2009.

[25] Y.H. Wan, *Wind Power Plant Behaviors: Analyses of Long-Term Wind Power Data*, National Renewable Energy Laboratory (NREL) Report, 2004.

[26] M. Hummon, J. Cochran, A. Weekley, A. Lopez, J. Zhang and B. Stoltenberg, *Variability of Photovoltaic Power in the State of Gujarat Using High Resolution Solar Data*, National Renewable Energy Laboratory (NREL) Report, 2014.

با در نظر گرفتن سطوح مختلف عدم قطعیت ناشی از واحدهای بادی و بار به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت که با افزایش واریانس خطای پیش بینی و به تبع آن افزایش میزان عدم قطعیت توان بادی و بار، مقادیر امید هزینه بهره برداری از واحدها و شاخص CVaR افزایش می یابد که هر دو مورد برای بهره بردار نامطلوب هستند؛ ضمناً افزایش شاخص CVaR به معنای افزایش ریسک پذیری بهره بردار خواهد بود. همچنین کاهش ضریب نفوذ توان بادی در مسئله، باعث اجبار در استفاده بیشتر از واحدهای حرارتی و در نتیجه افزایش مقادیر امید هزینه و شاخص CVaR می شود. از دیگر سو تأثیر تغییر پارامترهای α و β بر مقادیر امید هزینه بهره برداری از واحدها و شاخص CVaR نیز حائز اهمیت است. با استناد به نتایج حاصل شده، تغییرات امید هزینه و شاخص CVaR با تغییرات پارامتر α رابطه مستقیم دارند؛ به عبارت دیگر با افزایش پارامتر α ، مقادیر امید هزینه و CVaR نیز افزایش می یابد. همچنین تغییرات امید هزینه با تغییرات پارامتر β رابطه مستقیم و تغییرات شاخص CVaR با تغییرات پارامتر β رابطه عکس دارد؛ بدین معنا که با افزایش پارامتر β ، مقدار امید هزینه افزایش و شاخص CVaR کاهش می یابد. در نتیجه می توان با انتخاب حداقل واریانس خطای پیش بینی ممکن، حداکثر ضریب نفوذ توان بادی ممکن و مقادیر بهینه پارامترهای α و β با توجه به مسئله مورد مطالعه، با حفظ مقدار امید ریاضی هزینه بهره برداری در یک سطح مطلوب، ریسک موجود در مسئله را به حداقل رساند.

مراجع

[1] M. Zhao, Z. Chen and F. Blabjerg, "Probabilistic capacity of a grid connected wind farm based on optimization method," *Renewable Energy Journal*, vol. 31, no. 13, pp. 2171-2187, 2006.

[2] T. Senjyu, K. Shimabukuro, K. Uezato and T. Funabashi, "A fast technique for unit commitment problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 882-888, 2003.

[3] I. Dincer, "Renewable energy and sustainable development: a crucial review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, no. , pp. 157-175, 2000.

[4] S.R. Bull, "Renewable energy today and tomorrow," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, pages 1216-1226, 2001.

[۵] سایت اینترنتی سازمان انرژی نو ایران (سانا) به آدرس:

<http://www.suna.org.ir>

[6] S.J. Watson, L. Landberg and J.A. Halliday, "Application of wind speed forecasting to the integration of wind energy into a large scale power system," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, no. 4, pp. 357-362, 1994.

[7] A.J. Conejo, M. Carrión, J.M. Morales, *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, Springer, New York, 2010.

[8] S. Takriti, J.R. Birge and E. Long, "A stochastic model for the unit commitment problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1497-1508, 1996.

[9] L. Wu, M. Shahidehpour and T. Li, "Stochastic security-constrained unit commitment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 800-811, 2007.

[10] F. Bouffard and F.D. Galiana, "Stochastic security for operations planning with significant wind power generation,"

زیرنویس‌ها

⁸ Scenarios

⁹ Deterministic

¹⁰ Expectation

¹¹ Particles swarm

¹² Security constraints

¹³ Risk

¹⁴ Conditional Value at Risk

¹⁵ Mixed integer linear programming

¹⁶ Two stage stochastic programming

¹ Uncertainty

² Spinning reserve

³ Fast response units

⁴ Stochastic programming

⁵ Non-deterministic

⁶ Random variable

⁷ Random process