

بهینه‌سازی سه سطحی مقاوم مشارکت واحدها مقید به امنیت با هدف تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت با نفوذ بالای منابع اتکاناپذیر

محمد ایمان علیزاده^۱ رضا غفارپور^۲ علی محمد رنجبر^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
m.i.alizadeh@modares.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه امام حسین (ع) - تهران- ایران
rghaffarpour@ihu.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران- ایران
amranjbar@sharif.edu

چکیده: آمادگی سیستم‌های قدرت در مقابله با حوادث به ویژه عوامل خرابکارانه به افزایش تاب‌آوری و کاهش هزینه‌ها و زمان بازیابی خواهد انجامید. در این مقاله، یک مدل تصمیم‌گیری سه سطحی مقاوم ارائه شده است که در آن بهره‌بردار سیستم قدرت منابع تولید را در سطح اول برای یک حالت پایه برنامه‌ریزی می‌کند در حالی که، عامل خرابکار قصد از کار انداختن حساس‌ترین پست را دارد به طوری که تمام واحدهای تولیدی و خطوط متصل به آن پست از مدار خارج شوند. در همین حین، بهره‌بردار سیستم یک بار دیگر سعی در برنامه‌ریزی مجدد واحدهای تولیدی دارد به نحوی که کمترین میزان قطع بار ناخواسته حاصل شود. همچنین، در سیستم‌های قدرت با منابع بالای اتکاناپذیر، بهره‌بردار باید اثرات عدم قطعیت تولیدات این منابع را نیز در تصمیم‌گیری خود لحاظ کند. از این رو، بر خلاف بهینه‌سازی‌های متداول دو سطحی مقاوم که سعی در یافتن کمینه هزینه در بدترین سناریو دارند، روش تولید ستون و قید پیشنهادی منابع را برای یک حالت پایه به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌کند که در صورت بروز حملات خرابکارانه، کمترین قطع بار حاصل شود. نهایتاً، عملکرد مدل پیشنهادی بر روی سیستم تست استاندارد ۱۱۸ باسه مورد آزمون قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، مسئله مشارکت واحدها مقید به امنیت، بهینه‌سازی مقاوم، بهره‌برداری در حضور نفوذ بالای منابع اتکاناپذیر

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۰۸/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رضا غفارپور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- بزرگراه بابایی- دانشگاه جامع امام حسین (ع)

فهرست علائم و نشانه‌ها

M	عدد بزرگ برای خطی‌سازی توابع غیر خطی		
	متغیرها		
EC_{it}	هزینه پیشنهادی واحد ژنراتوری i در زمان t	مجموعه‌ها	
f_{lt}	فلوی عبوری از خط l در زمان t	t	اندیس زمان بر حسب ساعت
lsh_{bt}	جریمه‌ی قطع بار ناخواسته در باس b و زمان t	b	اندیس باس
ws_{bt}	کاهش تولید بادی در باس b و زمان t	l	اندیس خط انتقال
SU_{it}, SD_{it}	هزینه‌ی راه‌اندازی و خاموش شدن واحد i	$to(l),$ $fr(l)$	خط l به باس b ، خط l از باس b
P_{it}^a	باز تنظیم توان تولیدی واحد i و زمان t	i	اندیس واحد ژنراتوری
$r_{it}^{up} / r_{it}^{dn}$	ظرفیت رزرو شیب مشخص شده در دو جهت رو به بالا و پایین	$\omega_{bt} / \bar{\omega}$	تحقق بار خالص در باس b و زمان t بردار شامل تمام اجزای ω_{bt}
dlt_{sit}	توان تولیدی در هر قسمت از تابع تکه‌ای خطی	$\hat{\omega}_{bt} / \bar{\omega}$	حداکثر $\omega_{bt} / \bar{\omega}$
θ_{bt}	پیشنهاد قیمت واحد i	$\bar{\omega}_{bt} / \bar{\omega}$	بار خالص پیش‌بینی شده در باس b و زمان t بردار شامل تمام اجزای $\bar{\omega}_{bt}$
u_{it}	زاویه ولتاژ باس b در زمان t	rx_l	راکتانس خط l
P_{it}	متغیر باینری نشانگر وضعیت روشن و خاموش بودن واحد i در زمان t	s	اندیس اجزای منحنی تکه‌ای خطی هزینه پیشنهادی
\mathbf{k}_i	توان تولیدی ژنراتور i در زمان t	NG	تعداد واحدهای ژنراتوری
\mathbf{k}_i	بردار شامل تمام u_{it}	$NG(b)$	مجموعه واحدهای ژنراتوری متصل به باس b
\mathbf{k}_i	فضای ممکن برای قیود حداقل زمان روشن و خاموش بودن	NB	مجموعه باس‌ها
$\mathbf{z}^+ / \mathbf{z}^-$	بردارهای متغیرهای باینری نشانگر مجموعه عدم قطعیت Ω	NWB	مجموعه باس‌ها با مزارع بادی
x_b	متغیر باینری نشانگر وضعیت خرابی پست متصل به باس b	NT	مجموعه خطوط انتقال
x_i	متغیر باینری نشانگر وضعیت خرابی واحد i	S_i	مجموعه اجزای منحنی تکه‌ای خطی هزینه پیشنهادی
x_l	متغیر باینری نشانگر وضعیت خرابی خط l	T	افق زمانی ۲۴ ساعته
		پارامترها	
		Ξ	سطح زیرین کمینه‌سازی
		$C_{it}^{up} / C_{it}^{dn}$	قیمت پیشنهادی ظرفیت رزرو واحد i در زمان t
		G_b	تعداد ژنراتورهای متصل به باس b
		FT_b	تعداد کل خطوط از باس b و به باس b
		Ω	بودجه عدم قطعیت
		su_i, sd_i	هزینه روشن و خاموش شدن واحد i
		slp_{si}	شیب منحنی تکه‌ای خطی هزینه پیشنهادی
		P_i^{min}, P_i^{max}	کمینه و بیشینه ظرفیت تولید واحد ژنراتوری i
		F_l^{max}	حداکثر فلوی مجاز خط l
		UR_i, DR_i	بیشینه نرخ شیب رو به بالا و پایین واحد i
		$SURR_i / SDRR_i$	نرخ شیب واحد ژنراتوری در زمان راه‌اندازی و خاموش شدن
		F_i^{min}	کمینه هزینه تولید واحد i
		$\bar{R}_{it}^{up} / \bar{R}_{it}^{dn}$	بیشینه ظرفیت شیب رو به بالا و پایین مجاز واحد i در زمان t
		$Voll$	ارزش بار از دست رفته
		W	هزینه جریمه کاهش تولید باد

۱- مقدمه

شرایط وخیم آب و هوایی، زلزله، سونامی و خاموشی‌های خرابکارانه علاوه بر تحمیل خسارت‌های زیرساختی فراوان بسیاری از مشترکین را از خدمت برق محروم می‌سازند [۱]. از این رو، علی‌رغم احتمال بسیار کم وقوع چنین حوادثی، مطالعات گسترده‌ای در زمینه تاب‌آوری سیستم‌های قدرت به دلیل هزینه‌های تحمیلی بالا، مستقل از مطالعات قابلیت اطمینان در حال انجام است. مرجع [۲]، به طور مشخص قابلیت اطمینان را مجزا از مطالعات تاب‌آوری می‌داند به نحوی که، بر خلاف مطالعات قابلیت اطمینان که مجموعه‌ای از حوادث را به طور یکجا مورد مطالعه قرار می‌دهد و رفتار سیستم را توسط شاخص‌های کلی ارائه می‌دهد، مطالعه تاب‌آوری بر روی یک حادثه انجام می‌شود. به طوری که تاب‌آوری بیشتر در یک حادثه، به تاب‌آوری کمتر در حادثه‌ای دیگر منجر شود. در مرجع [۳] کاهش هزینه و دسترسی به نیروی برق دو عامل اصلی در برنامه‌ریزی توسعه تولید با هدف افزایش تاب‌آوری ذکر شده‌اند. همچنین، در مرجع [۴] با استفاده از منطق

فازی، سعی شده است تا دقیق ترین پیش بینی ها برای خروج احتمالی تجهیزات در زمان وقوع حوادث بزرگ حاصل شود. در مرجع [۵] به جهت افزایش تاب آوری در شبکه های هوشمند، از یک مدل تصمیم گیری خاموشی سلسله مراتبی با هدف کنترل هوشمند چند ریزش شبکه ای استفاده شده است. اختصاص منابع برای بازیابی سیستم قدرت، یکی دیگر از محورهای تحقیق در ارتقاء تاب آوری مورد مطالعه قرار می گیرد. به جهت اختصاص واحدهای تعمیرات برای بازیابی سریع تر خطوط انتقال و توزیع، سه مدل بهینه سازی توسط نویسندگان در [۶] ارائه شده که در مدل اول واحدهای تولیدی با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی برنامه ریزی می شوند. در مدل دوم، واحدهای تعمیرات برای کوتاه مدت و در مدل سوم این واحدها برای طولانی مدت طی یک برنامه ریزی استراتژیک جایابی می شوند. در مرجع [۷] مدلی سیستماتیک برای یافتن بهترین برنامه ریزی بازیابی پیشنهاد شده است.

در زمینه ی خرابکاری های عمدی، دو محور عمده تحقیقاتی حمله کننده-مدافع^۱ و مدافع-حمله کننده-مدافع^۲ مد نظر محققین بوده است. مرجع [۸]، با در نظر گرفتن شاخص های پدافند غیر عامل، برنامه ریزی توسعه تولید واحدهای تولید پراکنده را در یک شبکه هوشمند توزیع با مدل بهینه سازی چندهدفه پیشنهاد کرده است. یکی از تحقیقات پیشگام در مدل AD مرجع [۹] است که در یک مدل دو سطحی، حمله کننده در سطح بالایی تلاش می کند خسارات را بیشینه کند و در همین حین مدافع در سطح زیرین تلاش می کند آثار این حملات را کمینه کند. همچنین در مدل [۹] از یک الگوریتم تجزیه ابتکاری استفاده شده است. در مراجع [۱۰] و [۱۱]، مدل دو سطحی AD با استفاده از شرایط کراوش-کان-تاگر تبدیل به یک مدل تک سطحی با عدد صحیح شده است که می تواند با حل کننده های برنامه ریزی خطی با عدد صحیح^۳ حل شود. همانند مدل AD مدل سه سطحی DAD با استفاده از روش های ابتکاری، تئوری بازی ها و روش های تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳]، [۱۲]، [۱۴]. لیکن، حجم بالای محاسباتی استفاده عملی از این روش ها را با چالش مواجه می کند. از این رو، مراجع [۱۷]-[۱۵] روش های مبتنی بر تجزیه را که قابلیت حل با بار محاسباتی پایین را تضمین می کنند ارائه داده اند. از جمله تحقیقات اخیر در این زمینه، نویسندگان [۱۸] یک روش DAD پیشنهاد کرده اند که در آن یک مدل min-max-min سعی در کاهش قطع بار ناخواسته در صورت حملات خرابکارانه به اجزای اصلی سیستم قدرت دارد. مقاله حاضر بر پایه این مرجع، [۱۸]، نوآوری های زیر را ارائه می کند:

۱- در این پژوهش، مسئله ی مشارکت واحدهای مقید به امنیت به صورت یک بهینه سازی مقاوم با محوریت تاب آوری ارائه شده است. بر خلاف مدل های مقاوم دوسطحی معمول، این مقاله برنامه ریزی تولید را برای یک حالت پایه به صورت غیر محافظه کارانه به گونه ای می یابد که تضمین می کند در

صورت بروز حملات خرابکارانه کمترین خاموشی حاصل خواهد شد.

۲- در این مقاله فرض شده است که حمله کننده ی منطقی، سعی دارد که حساس ترین پست انتقال را از کار بی اندازد و همزمان با از کار افتادن حساس ترین پست، خطوط و ژنراتورهای متصل به آن نیز از مدار خارج خواهند شد.

۳- همچنین، در شبکه های قدرت با نفوذ بالای منابع اتکاناپذیر، گاهاً حملات خرابکارانه با توجه به شرایط نامساعد تولیدات اتکاناپذیر به وخیم تر شدن اوضاع خواهد انجامید. از این رو، عدم قطعیت تولیدات اتکاناپذیر نیز در مدل پیشنهادی برای واقعی تر شدن تصمیم گیری گنجانده شده است.

در ادامه به شرح مدل اولیه مسئله مشارکت واحدهای مقید به امنیت به صورت مقاوم خواهیم پرداخت. در بخش بعد، مدل تجزیه محور پیشنهادی برای حل بررسی می شود. نهایتاً مدل پیشنهادی بر روی یک سیستم تست ارزیابی جامع می شود.

۲- مدل مشارکت واحدها مقید به امنیت (SCUC^۴) مقاوم با محوریت تاب آوری

به جهت مقابله با عدم قطعیت در سیستم های قدرت می توان از برنامه ریزی تصادفی^۵ یا بهینه سازی مقاوم^۶ بهره جست. با وجود مزایای برنامه ریزی تصادفی در مقابله با عدم قطعیت و مطالعات ریسک، به دلیل بار محاسباتی بالای این روش، پیاده سازی در واقعیت با محدودیت هایی همراه خواهد بود [۱۹]. لیکن بهینه سازی مقاوم به عنوان جایگزین، جواب بهینه را بدون نیاز به تابع توزیع متغیر تصادفی با بار محاسباتی کمتر برمی گرداند. از سوی دیگر، مدل های بهینه سازی مقاوم موجود، فوق محافظه کارانه بوده و بار محاسباتی به نسبت بالایی دارند. کاهش زمان حل این روش با استفاده از تکنیک های مبتنی بر تجزیه در تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته است که از آن جمله می توان به مقالات اشاره کرد [۲۲]، [۲۱]، [۲۰]. در این مقالات، تجزیه بندری^۷ و ساخت ستون و قید^۸، [۲۴]، [۲۳] به عنوان دو روش کلی به کار رفته اند که با توجه به ارجحیت مدل CCG [۲۳] از این روش در مقاله حاضر استفاده شده است.

۳- مدل سه سطحی مقاوم SCUC

همان طور که قبلاً ذکر شد، هدف از مدل DAD کاهش اثرات حملات خرابکارانه به پست انتقال در یک برنامه ریزی تولید روزانه است. از این رو، مدل سه سطحی مقاوم به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min}_{u_{it}, P_{it}^{up}, r_{it}^{dn}} \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NG} [EC_{it} + SU_{it} + SD_{it}] \right. \\ \left. + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NG} [C_{it}^{dn} r_{it}^{dn} + C_{it}^{up} r_{it}^{up}] \right\} \quad (1)$$

$$(u_{it}, P_{it}): \forall \omega_{bt} \in US, \exists (P_{it}^a),$$

$$\sum_{i=1}^{NG_b} P_{it}^a + \sum_{to(l)=b}^{NT_b} f_{lt}^a - \sum_{fr(l)=b}^{NT_b} f_{lt}^a + lsh_{bt} = \quad (30)$$

$$\bar{\omega}_{bt} + \omega_{bt} + ws_{bt} : \alpha_{bt} \quad \forall b, t$$

$$f_{lt}^a = \frac{x_l}{rx_l} (\theta_{fr(l)t} - \theta_{fr(l)t}) : \beta_{lt} \quad \forall l, t \quad (31)$$

$$f_{lt}^a \leq F_l^{\max} : \gamma_{lt}^+ \quad \forall l, t \quad (32)$$

$$f_{lt}^a \geq -F_l^{\max} : \gamma_{lt}^- \quad \forall l, t \quad (33)$$

$$lsh_{bt} \leq \bar{\omega}_{bt} : \eta_{bt} \quad \forall b, t \quad (34)$$

$$ws_{wb} \leq \hat{\omega}_{wb} : \mu_{wb} \quad \forall wb, t \quad (35)$$

$$P_{it}^a \leq x_i (P_{it} + r_{it}^{up}) : \chi_{it} \quad \forall i, t \quad (36)$$

$$P_{it}^a \geq x_i (P_{it} - r_{it}^{dn}) : \varphi_{it} \quad \forall i, t \quad (37)$$

هدف از سطح اول (۱)، کمینه کردن برنامه‌ریزی تولید روزانه برای یک حالت پایه است که بدون وابستگی به عدم قطعیت‌ها و یا خروج تجهیزات در نظر گرفته می‌شود. در (۱)، سطر اول نشان‌دهنده هزینه‌های سوخت، راه‌اندازی و خاموش شدن واحد ژنراتوری ست و سطر دوم به هزینه‌های تأمین ظرفیت رزرو رو به بالا و پایین تعلق دارد. در روابط (۲) و (۳) مدل تکه‌ای خطی توابع هزینه لحاظ شده است. همچنین، قیود کمینه زمان روشن و خاموش بودن واحدها به طور خلاصه در رابطه‌ی (۴) آورده شده، که جزئیات آن را می‌توان در [۲۵] یافت. قیود (۵) و (۶) به ترتیب هزینه‌های اختصاص‌یافته به روشن شدن و خاموش شدن واحدها را نشان می‌دهند. قید (۷) توازن گره‌ای را مشخص می‌کند. و قید (۸) مربوط به معادلات پخش بار DC است. همچنین، قید (۹) محدوده فلوی خطوط انتقال را معین می‌کند. قیود شیب ساعتی نیز برای شیب رو به بالا و پایین به ترتیب در (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌اند. قیود (۱۲) و (۱۳) نیز به ترتیب مربوط به کمینه و بیشینه ظرفیت تولید ساعتی واحدهای ژنراتوری‌اند. ظرفیت رزروها نیز در روابط (۱۴) و (۱۵) گنجانده شده‌اند.

در سطح سوم (۲۹)، بهره‌بردار با برنامه‌ریزی مجدد تولید، سعی دارد قطع بار اجباری و هدر رفت تولید باد را کمینه‌سازی کند. توازن تولید و بار در تمام تحقق‌ها در رابطه (۳۰) نشان داده شده است. همچنین، یک پخش بار DC امکان‌پذیر بودن برنامه‌ریزی مجدد تولید را بررسی می‌کند (۳۳)-(۳۱). قطع بار اجباری به بار خالص و کاهش تولید اجباری باد به میزان تولید باد به ترتیب با قیود (۳۴) و (۳۵) محدود می‌شوند. نهایتاً تولید بازبینی شده واحد ژنراتوری باید در محدوده مجاز باشد که توسط روابط (۳۶) و (۳۷) معین شده است. لازم به ذکر است که متغیرهای دوگان تمام روابط (۳۷)-(۳۰) با علامت " : " مشخص شده‌اند.

$$EC_{it} = F_i^{\min} u_{it} + \sum_{s=1}^{S_i} slp_{si} dlt_{sit} \quad \forall i, \forall t \quad (2)$$

$$P_{it} = P_i^{\min} u_{it} + \sum_{s=1}^{S_i} dlt_{sit} \quad \forall i, \forall t \quad (3)$$

$$\kappa_i \in \{0,1\} \cap \mathbf{k}_i \quad \forall i, \forall t \quad (4)$$

$$SU_{it} \geq su_i (u_{it} - u_{it-1}), \quad SU_{it} \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (5)$$

$$SD_{it} \geq sd_i (u_{it-1} - u_{it}), \quad SD_{it} \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{NG_b} P_{it} + \sum_{to(l)=b}^{NT_b} f_{lt} - \sum_{fr(l)=b}^{NT_b} f_{lt} = \bar{\omega}_{bt} \quad \forall b, t \quad (7)$$

$$f_{lt} = \frac{1}{rx_l} (\theta_{fr(l)t} - \theta_{fr(l)t}) \quad \forall l, t \quad (8)$$

$$-F_l^{\max} \leq f_{lt} \leq F_l^{\max} \quad \forall l, t \quad (9)$$

$$P_{it} - P_{it-1} \leq d_t UR_i u_{it-1} + SURR_i (u_{it} - u_{it-1}) + P_i^{\max} (1 - u_{it}) \quad \forall i, \forall t \quad (10)$$

$$P_{it-1} - P_{it} \leq d_t DR_i u_{it} + SDRR_i (u_{it-1} - u_{it}) + P_i^{\max} (1 - u_{it-1}) \quad \forall i, \forall t \quad (11)$$

$$P_{it} + r_{it\tau}^{up} \leq P_i^{\max} u_{it} \quad \forall i, \forall \tau \in R_t, \forall t \quad (12)$$

$$P_{it} - r_{it\tau}^{dn} \geq P_i^{\min} u_{it} \quad \forall i, \forall \tau \in R_t, \forall t \quad (13)$$

$$0 \leq r_{it\tau}^{up} \leq \bar{R}_{it\tau}^{up} u_{it} \quad \forall i, \forall \tau \in R_t, \forall t \quad (14)$$

$$0 \leq r_{it\tau}^{dn} \leq \bar{R}_{it\tau}^{dn} u_{it} \quad \forall i, \forall \tau \in R_t, \forall t \quad (15)$$

$$\text{Max} \left\{ \Xi \right. \quad (16)$$

$$-\hat{\omega} \leq \hat{\omega}(\mathbf{z}^+ - \mathbf{z}^-) \leq \hat{\omega}, \quad (17)$$

$$\mathbf{z}^+ + \mathbf{z}^- \leq 1, \quad (18)$$

$$\sum_{wb} (\mathbf{z}^+ + \mathbf{z}^-) \leq \Omega \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_{wb,t})_{wb,t \in (NWB,T)} = \hat{\boldsymbol{\omega}}(\mathbf{z}^+ - \mathbf{z}^-) \quad (20)$$

$$(\mathbf{z}^+, \mathbf{z}^-) \in \{0,1\}, \mathbf{z}^{+/-} = (z_{wb,t}^{+/-})_{wb,t \in (NWB,T)} \quad (21)$$

$$\sum_b x_b = NB - 1 \quad (22)$$

$$\sum_i x_i = NG - \sum_b G_b (1 - x_b) \quad (23)$$

$$\sum_l x_l = NT - \sum_b FT_b (1 - x_b) \quad (24)$$

$$x_i \leq x_b \quad \forall i \in NG_b, b \quad (25)$$

$$x_l \leq x_b \quad \forall l \in NT_{fr(b)}, b \quad (26)$$

$$x_l \leq x_b \quad \forall l \in NT_{to(b)}, b \quad (27)$$

$$x_i, x_l, x_b \in \{0,1\} \quad (28)$$

$$\Xi = \text{Min} \left[\sum_t \sum_b V_{oll} . lsh_{bt} + W ws_{bt} \right. \quad (29)$$

همان‌طور که ذکر شد مدل سه سطحی مقاوم به صورت مستقیم قابل حل نیست. از این رو، از مدل تجزیه محور ساخت ستون و قید (CCG) بهره گرفته می‌شود.

۴- استراتژی حل تولید ستون و قید^۱

مدل خلاصه شده مسئله مشارک واحدهای مقید به امنیت با محوریت تاب‌آوری را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

تابع هدف:

$$\min_{x,p} \{c_b^T x + c_g^T p\}$$

قیود:

سری اول: شامل قیود حالت پایه برای متغیرهای مستقل از عدم قطعیت (Here-and-now)

سری دوم: {قیود وابسته به تحقق سناریو (Wait-and-see)}

$$\forall \varepsilon \in US$$

که تابع هدف شامل عبارت‌های هزینه‌ای (C_b) وضعیت روشن و خاموش بودن به صورت باینری (x) و همچنین هزینه سوخت (C_g) واحدهای ژنراتوری به صورت (p) در نظر گرفته شده است. همچنین، قیود مرتبط با متغیرهای مستقل از عدم قطعیت (*here-and-now*) شامل قیود کمینه زمان روشن و خاموش بودن، توازن تولید و تقاضا، شیب ساعتی و همچنین قیود روشن و خاموش شدن به همراه قیود کمکی باینری در سری اول خلاصه شده اند. در قیود سری دوم، تغییرات در شرایط بهره‌برداری وابسته به تحقق هر سناریو در خرابی پست به همراه عدم قطعیت ناشی از تولیدات اتکاناپذیر (باد) لحاظ شده است. حل این مسئله به صورت مطرح شده به دلیل قیود بیشمار سری دوم نا ممکن خواهد بود. از این رو، قیود سری دوم را با یک مسئله max-min به صورت زیر جایگزین کرده که با تجزیه به دو مسئله پایه (MP) و پیرو (SP) به صورت تکراری زیر قابل حل خواهند بود [۲۶]:

تابع هدف:

$$(MP) \min_{x,p} \{c_b^T x + c_g^T p\}$$

قیود:

سری اول: شامل قیود حالت پایه برای متغیرهای مستقل از عدم قطعیت (Here-and-now)

(SP) Max-min {جریمه تخطی از قید}

{قیود وابسته به تحقق سناریو (Wait-and-see)}

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل پیشنهادی، مسئله بهینه‌سازی در مقابل تهدیدات خرابکارانه برای یک حالت پایه بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت به گونه ای حل می‌شود که، اولاً قادر خواهد بود، بر خلاف مدل‌های دوسطحی مقاوم با بازبینی کامل^۱ معمول، یک جواب بهینه برای یک حالت پایه در اختیار بهره‌بردار قرار دهد. این در حالی است

که مدل‌های موجود دو سطحی مقاوم [۱۸]، صرفاً متغیرهای مستقل از عدم قطعیت برای بهره‌بردار قابل استفاده خواهند بود (مانند وضعیت صفر و یک واحدهای ژنراتوری در یک مسئله مشارکت واحدها و این در حالیست که مدل پیشنهادی علاوه بر صفر و یک وضعیت واحدها تولید ساعتی مشخصی را نیز برای یک حالت پایه ارائه می‌کند) [۲۷].

ثانیاً، قادر خواهد بود یک جواب بهینه برای یک حالت پایه به گونه‌ای بیابد که با تحقق هر سناریویی در محدوده ریسک مشخص شده بتواند تغییرات را در چینش تولید^{۱۱} به گونه ای اعمال کند تا کمترین خاموشی تضمین شود [۲۶]، [۲۷].

در ادامه، مسئله پیرو (SP)، max-min داخلی با استفاده از تئوری دوگان به یک مسئله max-max تبدیل می‌شود [۲۴]. سپس، مسئله غیر خطی max-max حاصل شده با تئوری عدد بزرگ-M به یک مسئله بیشینه سازی با عدد صحیح تبدیل می‌شود که به آن مسئله پیرو (SP) گفته می‌شود. با حل مسئله پیرو در هر تکرار نقاط حدی به صورت پارامترهای معین به مسئله پایه (MP) توسط برش‌های بهینگی اولیه^{۱۲} اضافه می‌شوند. این روند تا همگرایی کامل ادامه می‌یابد. در مدل پیشنهادی روابط (۴۵)-(۳۸) متعلق به مسئله پایه بوده که تابع هدف آن عیناً مانند مدل سه سطحی ست. علاوه بر این متغیر π شامل تمام هزینه‌های قطع اجباری باد و بار که به صورت تکراری اضافه می‌شوند به مسئله پایه افزوده می‌شود. قیود مسئله پایه شامل قیود (۱۵)-(۲) و همچنین برش‌های بهینگی اولیه در هر تکرار به صورت (۴۵)-(۴۱) هستند. در هر تکرار m برش‌های بهینگی همان قیود سطح زیرین (۳۷)-(۳۰) هستند که در آنها نقاط حدی $z_{wb}^{+*}, z_{wb}^{-*}, x_i^*, x_l^*, x_b^*$ که در تکرار قبلی مسئله پیرو به دست آمده‌اند ثابتند. لازم به ذکر است که بالانویس (*) دلالت بر ثابت بودن پارامترهایی دارد که دیگر متغیر نیستند.

$$(MP) \quad \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NG} [EC_{it} + SU_{it} + SD_{it}] + \pi \right\} \quad (38)$$

$$\pi \geq \sum_t \sum_b^{NB} \text{Voll} \cdot lsh_{bt} + W \cdot ws_{bt} \quad \forall m \quad (39)$$

$$(2)-(15) \quad (40)$$

$$\sum_{i=1}^{NG_b} P_{it}^a + \sum_{to(l)=b}^{NT_b} f_{lt}^a - \sum_{fr(l)=b}^{NT_b} f_{lt}^a + lsh_{bt} = \quad (41)$$

$$\bar{\omega}_{bt} + \hat{\omega}_{bt} (z_{bt}^{+*} - z_{bt}^{-*}) + ws_{bt} \quad \forall b, t, m$$

$$f_{lt}^a = \frac{x_l}{rx_l} (\theta_{fr(l)t} - \theta_{fr(l)t}) \quad \forall l, t, m \quad (42)$$

$$(32)-(35) \quad (43)$$

$$P_{it}^a \leq x_i^* (P_{it} + r_{it}^{up}) \quad \forall i, t, m \quad (44)$$

$$P_{it}^a \geq x_i^* (P_{it} - r_{it}^{dn}) \quad \forall i, t, m \quad (45)$$

مسئله پیرو، (۷۰)-(۴۶)، شامل دوگان مسئله کمینه‌سازی لایه زیرین و قیود بیشینه‌سازی لایه میانی است (۲۸)-(۱۷). همچنین متغیرهای

۵- نتایج عددی

در این بخش عملکرد مدل پیشنهادی بر روی سیستم تست ۱۱۸ باسه IEEE آزمایش شده است. اطلاعات واحدهای ژنراتوری، خطوط و بار از مرجع [۲۸] اخذ شده‌اند. این سیستم تست شامل ۵۴ واحد ژنراتوری، ۱۶۸ خط انتقال با بار بیشینه ۶۶۰ MW است. همچنین ده مزرعه بادی با ظرفیت تولید معادل ۲۰٪ بار هر گره در پر بار ترین باس ها (۱۱، ۱۵، ۴۹، ۵۴، ۵۶، ۵۹، ۶۰، ۶۲، ۸۰، ۹۰) گنجانده شده اند که دارای محدوده تغییراتی معادل ۹۰٪ بازه اطمینان دارند. الگوی تولید باد نیز از [۲۹] در روز ۱۳ ژوئن ۲۰۱۶ استخراج شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار حلال GAMS با پردازنده Core i3-3 GB RAM انجام شده اند. جهت بررسی جامع مدل پیشنهادی سه مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است.

مورد مطالعاتی اول: در این آزمون میزان محافظه کارانه بودن مدل پیشنهادی توسط معیار بودجه عدم قطعیت نرمالیزه شده (NBU) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. معیار NBU به این صورت تعریف می‌شود Ω/Ω^{\max} . پاسخ با NBU=0 همان برنامه‌ریزی قطعی^{۱۴} مسئله مشارکت واحدها بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت است و NBU=1 نشان‌گر محافظه کارانه ترین تصمیم‌گیری است.

مورد مطالعاتی دوم: برای در نظر گرفتن کارایی مدل پیشنهادی در این شبیه‌سازی تنها یک تجهیز می‌تواند از مدار خارج شود و سپس عملکرد مدل پیشنهادی در طولانی مدت با روش خارج از نمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مورد مطالعاتی سوم: در این مورد، حمله کننده سعی دارد حساس‌ترین پست انتقال را از مدار خارج کند. علاوه بر آن، تأثیرات عدم قطعیت تولید بادی نیز در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱): نتایج مدل پیشنهادی برای مقادیر مختلف NBU

NBU	هزینه کل	باس متصل به مزرعه باد انتخاب شده	PoR (%)
۰	۱.۷۷۶.۸۷۶	-	۰
۰.۱	۱.۷۸۱.۸۷۵	۵۹	۰.۲۸
۰.۲	۱.۷۸۴.۲۹۲	۵۹.۸۰	۰.۴۲
۰.۳	۱.۷۸۶.۷۶۹	۵۴.۵۹.۸۰	۰.۵۶
۰.۴	۱.۷۸۸.۹۷۳	۱۵.۵۴.۵۹.۸۰	۰.۶۸
۰.۵	۱.۷۹۰.۷۲۸	۱۵.۴۹.۵۴.۵۹.۸۰	۰.۷۸
۰.۶	۱.۷۹۳.۰۰۸	۱۵.۴۹.۵۴.۵۶.۵۹.۸۰	۰.۹۱
۰.۷	۱.۷۹۵.۲۴۳	۱۵.۴۹.۵۴.۵۶.۵۹.۸۰.۹۰	۱.۰۳
۰.۸	۱.۷۹۷.۹۲۳	۱۵.۴۹.۵۴.۵۶.۵۹.۶۰.۸۰.۹۰	۱.۱۸
۰.۹	۱.۷۹۹.۹۸۸	۱۵.۴۹.۵۴.۵۶.۵۹.۶۰.۶۲.۸۰.۹۰	۱.۳
۱	۱.۸۰۲.۴۶۷	۱۱.۱۵.۴۹.۵۴.۵۶.۵۹.۶۰.۶۲.۸۰.۹۰	۱.۴۴

کمکی $\rho_{wbt}, u_{wbt}, \zeta_{it}$ به ترتیب جهت خطی‌سازی عبارات غیر خطی $\alpha_{wbt} z_{wbt}^+, \alpha_{wbt} z_{wbt}^-, \chi_{it} x_i$ و $\varphi_{it} x_i$ معرفی شده‌اند. متغیرهای تصمیم در مسئله پیرو نقاط حدی $x_b, x_l, x_i, z_{wbt}^+, z_{wbt}^-, x_i, x_l, x_b$ هستند که در هر مرحله تولید می‌شوند. از این رو، مسئله پیرو به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{(SP) Max } \left\{ \sum_t \sum_b^{NB} \alpha_{bt} \bar{\omega}_{bt} - \sum_t \sum_b^{NB} \eta_{bt} \bar{\omega}_{bt} - \sum_t \sum_{wb}^{NWB} \mu_{wbt} \hat{\omega}_{wbt} + \sum_t \sum_{wb}^{NWB} (\rho_{wbt} - u_{wbt}) \hat{\omega}_{wbt} - \sum_t \sum_l^{NT} (\gamma_{lt}^+ + \gamma_{lt}^-) F_l^{\max} - \sum_t \sum_i^{NG} \zeta_{it} (P_{it}^* + r_{it}^{up*}) + \sum_t \sum_i^{NG} \zeta_{it} (P_{it}^* - r_{it}^{dn*}) \right\} \quad (۴۶)$$

$$(۲۸)-(۱۷) \quad (۴۷)$$

$$s.t. \quad \alpha_{b(i)t} + \varphi_{it} - \chi_{it} \leq 0 \quad \forall i, t \quad (۴۸)$$

$$\alpha_{to(l)t} - \alpha_{fr(l)t} + \beta_{lt} + \gamma_{lt}^- - \gamma_{lt}^+ = 0 \quad \forall l, t \quad (۴۹)$$

$$\alpha_{b(i)t} - \eta_{bt} \leq \forall oll \quad \forall b, t \quad (۵۰)$$

$$-\alpha_{b(i)t} - \mu_{bt} \leq W \quad \forall b, t \quad (۵۱)$$

$$\sum_{fr(l)=b} \frac{\delta_{lt}}{rx_l} - \sum_{to(l)=b} \frac{\delta_{lt}}{rx_l} = 0 \quad \forall b, t \quad (۵۲)$$

$$\rho_{wbt} \leq M z_{wbt}^+ \quad \forall wbt \quad (۵۳)$$

$$\rho_{wbt} \geq -M z_{wbt}^+ \quad \forall wbt \quad (۵۴)$$

$$\alpha_{wbt} - \rho_{wbt} \leq M (1 - z_{wbt}^+) \quad \forall wbt \quad (۵۵)$$

$$\alpha_{wbt} - \rho_{wbt} \geq -M (1 - z_{wbt}^+) \quad \forall wbt \quad (۵۶)$$

$$u_{wbt} \leq M z_{wbt}^- \quad \forall wbt \quad (۵۷)$$

$$u_{wbt} \geq -M z_{wbt}^- \quad \forall wbt \quad (۵۸)$$

$$\alpha_{wbt} - u_{wbt} \leq M (1 - z_{wbt}^-) \quad \forall wbt \quad (۵۹)$$

$$\alpha_{wbt} - u_{wbt} \geq -M (1 - z_{wbt}^-) \quad \forall wbt \quad (۶۰)$$

$$\zeta_{it} \leq M x_i \quad (۶۱)$$

$$\zeta_{it} - \chi_{it} \geq 0 \quad (۶۲)$$

$$\zeta_{it} - \chi_{it} \leq M (1 - x_i) \quad (۶۳)$$

$$\zeta_{it} \leq M x_i \quad (۶۴)$$

$$\zeta_{it} - \varphi_{it} \geq 0 \quad (۶۵)$$

$$\zeta_{it} - \varphi_{it} \leq M (1 - x_i) \quad (۶۶)$$

$$\delta_{lt} \leq M x_l \quad (۶۷)$$

$$\delta_{lt} \geq -M x_l \quad (۶۸)$$

$$\beta_{lt} - \delta_{lt} \leq M (1 - x_l) \quad (۶۹)$$

$$\beta_{lt} - \delta_{lt} \geq -M (1 - x_l) \quad (۷۰)$$

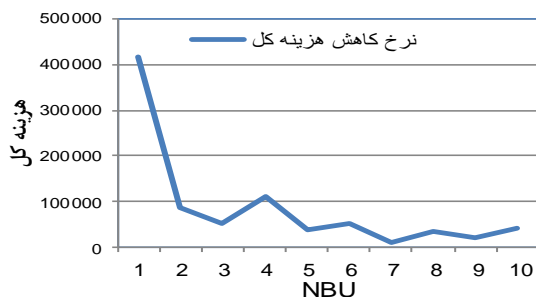
۵-۱- مورد مطالعاتی اول

سازی در تمام حالات با مقادیر مختلف NBU واحد ۹ به عنوان حساس‌ترین واحد تولیدی انتخاب شد. در سطر اول جدول ۲ مشاهده می‌شود که در غیر محافظه کارانه‌ترین حالت، خروج واحد ژنراتوری تنها ۱,۷۹٪ هزینه کل را افزایش داده است. لیکن با از دست رفتن واحد ۹ با ظرفیت حداکثری ۳۵۰ MW و افزایش مقدار NBU افزایش هزینه‌ی کل با شیب زیاد بوده و تا ۶۰,۶۲٪ در $NBU=1$ خواهد رسید. این افزایش سریع هزینه کل اهمیت در نظر گرفتن تولیدات اتکناپذیر در بهره‌برداری تاب‌آور را نشان می‌دهد.

۵-۳- مورد مطالعاتی سوم

از آنجا که هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثرات خروج حساس‌ترین پست انتقال است، در این بخش تغییرات تولید بادی برای ده سناریوی مختلف در باس‌های دارای منابع بادی برای خروج هر ۱۱۸ باس با مجموع ۱۱۸۰ سناریو در نظر گرفته شده است. سپس برای مقادیر ثابت متغیرهای تصمیم سطح اول، بهینه‌سازی زیرین، (۳۷) - (۳۰)، برای هر سناریو به صورت شبیه‌سازی مونت کارلو اجرا شد که هزینه‌ی میانگین این سناریوها با عنوان هزینه مونت کارلو در جدول ۳ منعکس شده است. در این شبیه‌سازی برای تمامی حالات پست ۶۵ به عنوان حساس‌ترین پست انتخاب شد. این پست به چهار خط ۹۶، ۹۷، ۱۰۲ و ۱۰۴ و واحد ژنراتوری ۲۷ با ۴۲۰ MW ظرفیت تولید که یکی از بزرگ‌ترین واحده است متصل است. لازم به ذکر است که در هزینه‌ی بهره‌برداری حالت پایه میزان هزینه‌ی قطع بار لحاظ نشده است چرا که در عمل این هزینه اتفاق نمی‌افتد و صرفاً به عنوان یک محک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو، بدترین حالت تولید باد تنها ۱,۶۸٪ افزایش هزینه می‌دهد در حالی که، شبیه‌سازی مونت کارلو در طولانی مدت ۲۱,۸٪ کاهش هزینه را نشان می‌دهد.

$$\$4,990,167 - \$4,094,840 = \$895,327$$



شکل (۱): نرخ کاهش هزینه کل برای مقادیر مختلف NBU

در این شبیه‌سازی تنها منبع عدم قطعیت تولیدات بادی در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مقادیر بهینه هزینه کل، باس‌های انتخاب شده متصل به مزرعه بادی و هزینه‌ی مقاوم بودن را برای مقادیر مختلف NBU نشان می‌دهد. همچنین، مقدار هزینه مقاوم بودن^{۱۵} که عبارتست از تفاوت نرمالیزه شده بین هزینه در مقادیر NBU بزرگتر از صفر از حالت $NBU=0$ در ستون آخر به درصد گنجانده شده است. با افزایش میزان NBU میزان هزینه کل به تدریج افزایش می‌یابد چرا که افزایش مقدار NBU به معنی تصمیم‌گیری محافظه کارانه تر است. لازم به ذکر است که هزینه مقاوم بودن برابر است با اختلاف نرمال شده هزینه کل با پاسخ قطعی در هر مقدار NBU. نکته قابل توجه در این شبیه‌سازی این است که در محافظه کارانه‌ترین حالت هزینه عدم قطعیت تنها ۱,۴۴٪ خواهد بود که به معنی عدم تولید تمام مزارع بادیست. این میزان کم هزینه مقاوم بودن به این دلیل است که بر خلاف مدل‌های موجود، مدل پیشنهادی در پی یافتن کمترین هزینه‌ی توزیع اقتصادی برای بدترین حالت تحقق عدم قطعیت نیست بلکه یک برنامه‌ریزی پایه بهینه را به گونه‌ای ارائه می‌کند که بهره‌برداری در تمام تحقق‌ها ممکن باشد.

۵-۲- مورد مطالعاتی دوم

در این شبیه‌سازی، خروج تنها یک تجهیز در حضور مقادیر مختلف NBU مورد مطالعه قرار می‌گیرد. جدول ۲ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی برای خروج یک تجهیز

NBU	هزینه کل	PoR (%)
۰	۱,۸۰۸,۶۶۲	۱,۷۹
۰,۱	۱,۸۱۸,۷۷۲	۲,۰۷
۰,۲	۱,۸۵۳,۹۳۳	۳,۹
۰,۳	۱,۹۱۴,۶۴۳	۷,۱۶
۰,۴	۲,۰۱۵,۱۲۹	۱۲,۶۴
۰,۵	۲,۱۴۵,۱۰۶	۱۹,۷۹
۰,۶	۲,۲۹۰,۷۷۷	۲۷,۷۶
۰,۷	۲,۴۰۴,۰۲۶	۳۳,۹۱
۰,۸	۲,۵۲۱,۴۲۹	۴۰,۲۴
۰,۹	۲,۶۹۵,۲۰۱	۴۹,۷۳
۱	۲,۸۹۵,۲۰۶	۶۰,۶۲

لازم به ذکر است که برای تمام حالت‌ها الگوی یک روز گرم تابستان با بار حداکثر ۶۶۰۰ MW در نظر گرفته شده است. از این رو، حتی در غیر محافظه کارانه‌ترین حالات هم اکثر واحدهای ژنراتوری فعالند و ظرفیت رزرو محدودی در سیستم موجود است. لذا، خروج حتی یک واحد ژنراتوری می‌تواند به قطع بار اجباری منجر شود. در این شبیه-

- 5752-5763, 2009.
- [6] M.-J. Yao and K. J. Min, "Repair-unit location models for power failures," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 45, no. 1, pp. 57-65, 1998.
- [7] Y. Yongbo, J. Bo, Y. Huayun, A. Bing, L. Dong, C. Daojun, and Q. Hui, "Service restoration with consideration of rush repair," in *Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 IEEE*, 2011, vol. 3, pp. 308-312.
- [8] جدی بابک، غفارپور رضا، رنجبر علی محمد. ارتقاء شاخص‌های پدافند غیرعامل با استفاده از برنامه‌ریزی بهینه منابع تجدیدپذیر انرژی در شبکه‌های هوشمند توزیع برق. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۱): ۱-۱۴.
- [9] J. Salmeron, K. Wood, and R. Baldick, "Analysis of electric grid security under terrorist threat," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 905-912, 2004.
- [10] A. L. Motto, J. M. Arroyo, and F. D. Galiana, "A mixed-integer LP procedure for the analysis of electric grid security under disruptive threat," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1357-1365, 2005.
- [11] J. M. Arroyo and F. D. Galiana, "On the solution of the bilevel programming formulation of the terrorist threat problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 789-797, 2005.
- [12] G. Brown, M. Carlyle, J. Salmeron, and K. Wood, "Defending critical infrastructure," *Interfaces (Providence)*, vol. 36, no. 6, pp. 530-544, 2006.
- [13] V. M. Bier, E. R. Gratz, N. J. Haphuriwat, W. Magua, and K. R. Wierzbicki, "Methodology for identifying near-optimal interdiction strategies for a power transmission system," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 92, no. 9, pp. 1155-1161, 2007.
- [14] A. J. Holmgren, E. Jenelius, and J. Westin, "Evaluating strategies for defending electric power networks against antagonistic attacks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 76-84, 2007.
- [15] Y. Yao, T. Edmunds, D. Papageorgiou, and R. Alvarez, "Trilevel optimization in power network defense," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part C (Applications Rev.)*, vol. 37, no. 4, pp. 712-718, 2007.
- [16] M. P. Scaparra and R. L. Church, "A bilevel mixed-integer program for critical infrastructure protection planning," *Comput. Oper. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1905-1923, 2008.
- [17] N. Alguacil, A. Delgadillo, and J. M. Arroyo, "A trilevel programming approach for electric grid defense

این کاهش هزینه کل بزرگ در مقابل افزایش هزینه بهره‌برداری کارایی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱ کاهش هزینه کل در مقادیر مختلف NBU را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش در هزینه کل در کمترین مقدار NBU حاصل شده است. این اتفاق را می‌توان با تئوری حد مرکزی (Central limit Theorem) توجیه نمود [۳۰]. این تئوری بیان می‌کند که با حضور سناریوهای بسیار زیاد بهترین عملکرد بهینه‌سازی مقاوم زمانی است که بودجه عدم قطعیت به نسبت کوچک باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل DAD ارائه شد که هدف اصلی برنامه‌ریزی تولید روزانه با محوریت تاب‌آوری است. به نحوی که بهره‌بردار سیستم با کمترین افزایش هزینه تولید بتواند انتظار کمترین خاموشی اجباری را داشته باشد. به علاوه نشان داده شد که در نظر گرفتن عدم قطعیت تولیدات اتکاناپذیر به برنامه‌ریزی تولید روزانه کارآمدتر منجر خواهد شد. چرا که صرف نظر از تولیدات اتکاناپذیر در مطالعات تاب‌آوری به وخیم تر شدن وضعیت منجر خواهد شد.

مراجع

- [1] EPRI, "Electric Power System Resiliency Challenges and Opportunities," 2016.
- [۲] امینی فر فرخ، فرهمندی متین. مفاهیم و مبانی ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های برق. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۳): ۸۳-۹۱.
- [3] A. Kwasinski, "Technology planning for electric power supply in critical events considering a bulk grid, backup power plants, and micro-grids," *IEEE Syst. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 167-178, 2010.
- [4] P.-C. Chen and M. Kezunovic, "Fuzzy Logic Approach to Predictive Risk Analysis in Distribution Outage Management," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2827-2836, 2016.
- [5] A. Zangeneh, S. Jadid, and A. Rahimi-Kian, "A hierarchical decision making model for the prioritization of distributed generation technologies: A case study for Iran," *Energy Policy*, vol. 37, no. 12, pp.

جدول (۳): نتایج مونت کارلو برای مورد مطالعاتی سوم

ضریب تغییرات	هزینه کل	هزینه مونت کارلو	PoR (%)	بهره‌برداری پایه	هزینه SCUC	NBU
۰,۰۰۱۱	۶,۸۰۰,۱۲۱	۴,۹۹۰,۱۶۷	۰	۱,۸۰۹,۹۵۴	۱,۸۴۱,۰۱۷	۰
۰,۰۰۱۱	۶,۳۸۱,۷۸۱	۴,۵۶۲,۶۴۵	۰,۵۱	۱,۸۱۹,۱۳۶	۲,۱۶۶,۴۱۵	۰,۱
۰,۰۰۱	۶,۲۹۳,۷۷۶	۴,۴۷۰,۷۳۰	۰,۷۲	۱,۸۲۳,۰۴۶	۲,۱۷۰,۳۶۵	۰,۲
۰,۰۰۰۹	۶,۲۴۱,۵۷۳	۴,۴۱۵,۴۳۳	۰,۸۹	۱,۸۲۶,۱۴۰	۲,۴۵۱,۴۰۷	۰,۳
۰,۰۰۰۹	۶,۱۳۰,۳۶۲	۴,۳۰۰,۲۹۷	۱,۱۱	۱,۸۳۰,۰۶۵	۲,۶۴۷,۱۷۳	۰,۴
۰,۰۰۰۹	۶,۰۹۳,۷۸۸	۴,۲۶۲,۶۲۵	۱,۱۷	۱,۸۳۱,۱۶۳	۲,۹۷۶,۹۸۱	۰,۵
۰,۰۰۰۹	۶,۰۴۰,۸۸۵	۴,۲۰۹,۰۴۲	۱,۲۱	۱,۸۳۱,۸۴۳	۳,۳۵۷,۸۳۸	۰,۶
۰,۰۰۰۹	۶,۰۲۹,۴۷۱	۴,۱۹۵,۲۸۴	۱,۳۴	۱,۸۳۴,۱۸۷	۳,۳۶۱,۰۱۷	۰,۷
۰,۰۰۰۹	۵,۹۹۵,۲۶۲	۴,۱۵۹,۷۷۱	۱,۴۱	۱,۸۳۵,۴۹۱	۳,۷۴۲,۲۴۰	۰,۸
۰,۰۰۰۹	۵,۹۷۵,۹۲۵	۴,۱۳۹,۵۱۲	۱,۴۶	۱,۸۳۶,۴۱۳	۴,۱۴۱,۶۰۴	۰,۹
۰,۰۰۰۹	۵,۹۳۵,۲۸۳	۴,۰۹۴,۸۴۰	۱,۶۸	۱,۸۴۰,۴۴۳	۴,۳۶۶,۷۴۴	۱

-
- ¹¹ Adaptive recourse decisions
¹² Primal cuts
¹³ Normalized Budget of Uncertainty (NBU)
¹⁴ Deterministic
¹⁵ Price of Robustness (PoR)

- planning,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 41, pp. 282–290, 2014.
- [18] X. Wu and A. J. Conejo, “An Efficient Tri-Level Optimization Model for Electric Grid Defense Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 2984–2994, 2017.
- [19] Q. P. Zheng, W. Jianhui, and A. L. Liu, “Stochastic Optimization for Unit Commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 4, pp. 1913–1924, 2015.
- [20] R. Jiang, M. Zhang, G. Li, and Y. Guan, “Two-stage network constrained robust unit commitment problem,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 234, no. 3, pp. 751–762, 2014.
- [21] B. Hu, L. Wu, and M. Marwali, “On the Robust Solution to SCUC With Load and Wind Uncertainty Correlations,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 2952–2964, 2014.
- [22] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao, and T. Zheng, “Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 52–63, 2013.
- [23] L. Zhao and B. Zeng, “Robust unit commitment problem with demand response and wind energy,” in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1–8.
- [24] B. Zeng and L. Zhao, “Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method,” *Oper. Res. Lett.*, vol. 41, no. 5, pp. 457–461, 2013.
- [25] M. Carrión and J. M. Arroyo, “A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem,” *IEEE Trans.*, vol. 21, no. 3, pp. 1371–1378, 2006.
- [26] H. Ye, Y. Ge, M. Shahidepour, and Z. Li, “Uncertainty Marginal Price, Transmission Reserve, and Day-ahead Market Clearing with Robust Unit Commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 2015.
- [27] H. Ye and Z. Li, “Robust security-constrained unit commitment and dispatch with recourse cost requirement,” *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 31, no. 5, pp. 3527 – 3536, 2016.
- [28] “http://motor.ece.iit.edu/Data/118bus_ro.xls”.
- [29] “Elia Power System [Online]. Available: <http://www.elia.be/en/grid-data/power-generation/wind-power>”.
- [30] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao, and T. Zheng, “Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem,” 2012.

زیر نویس ها

- ¹ Attacker-Defender (AD)
² Defender-Attacker-Defender (DAD)
³ Mixed Integer Linear Programming (MILP)
⁴ Security Constrained Unit Commitment
⁵ Stochastic programming
⁶ Robust Optimization
⁷ Bender's Decomposition
⁸ Column and Constraint Generation (CCG)
⁹ Column and Constraint Generation
¹⁰ Two-stage robust optimizations with full recourse