

مدل سازی خرده فروش در بازار ظرفیت

حسن جلیلی^۱، محمد کاظم شیخ الاسلامی^۲، محسن پارسامقدم^۳
^۱گروه مهندسی برق، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
^{۲،۳}دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس
h.jalili@riau.ac.ir^۱, aleslam@modares.ac.ir^۲, parsa@modares.ac.ir^۳

چکیده: منابع مدیریت مصرف همواره به عنوان گزینه‌ای مهم در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعاتی پیرامون بکارگیری این منابع در تامین ظرفیت شبکه در برخی از سیستم‌ها انجام شده و برخی از این سیستم‌ها نظیر PJM در بازار ظرفیت خود از آنها به صورت محدود استفاده کرده‌اند. آنچه که حائز اهمیت است اینست که ابتدا مدلی جامع از این منابع در بازار ظرفیت ارائه شده و سپس ساختاری مناسب به منظور بکارگیری آنها تعریف شود. مشارکت کارا و پایدار منابع مدیریت مصرف در بازار ظرفیت به دلایل مدیریتی و اقتصادی تنها با حضور نهادهای تجاری نظیر خرده-فروش‌ها به عنوان نمایندگان این منابع امکان‌پذیر است. از اینرو ابتدا می‌بایست مدلی از کالای ظرفیت این نهادها ارائه شده و سپس پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار آنها و نحوه تعامل آنها با دو بخش بازار (بهره‌بردار مستقل سیستم) و مشترکین در هر دو سمت بازار مدل سازی شود. این مدل سازی از یکسو سبب مشارکت سودآور خرده فروش در بازار ظرفیت شده و از سوی دیگر منافع مشترکین و شبکه را نیز به دنبال دارد. از اینرو، در این مقاله رفتار خرده فروش به منظور مشارکت در بازار ظرفیت به طور جامع مطالعه و مدل سازی شده است. نتایج عددی کارایی مدل ارائه شده را نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: بازار ظرفیت، رفتار خرده فروش، مدل سازی ظرفیت و عدم دسترس پذیری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۱

نام نویسنده مسئول: دکتر حسن جلیلی

نشانی نویسنده مسئول: رودهن - دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن - گروه مهندسی برق

فهرست علائم اختصاری		پارامتر مساحت	S
شاخص‌ها		شیب مثبت شکل ظرفیت- دما	m1
شمارنده باس‌های شبکه	i, i^*	شیب منفی شکل ظرفیت- دما	m2
شمارنده خطوط شبکه	l	تعداد خطوط شبکه	Nl
شمارنده کالاهای ظرفیت	j	پارامتر ظرفیت	s
شمارنده مشترکین	ii	پارامترهای شکل ظرفیت- دما	a, b, c, d, e, f
شمارنده تجهیزات	k, m	مساحت‌های مشخص شده در شکل ظرفیت- دما	A, B
شمارنده سناریو	W	پارامتر دما	T
پارامترها		تعداد کالاهای ظرفیت قابل ارائه توسط خرده‌فروش	Nj
سود کل مشترک از مبادله ظرفیت	P	تعداد باس‌های از شبکه	Ni
درآمد کل مشترک از مبادله ظرفیت	B_{net}	قیمت فروش ظرفیت به مشترک در باس i در سناریوی W	$\rho_{0i}^{r,W}$
هزینه کل مشترک از مبادله ظرفیت	C_{net}	هزینه‌های تولید خودی خرده‌فروش در سناریوی W	C_{SG}^W
ارزش ظرفیت اولیه خریداری شده توسط مشترک از دید مشترک یا درآمد مشترک از ظرفیت اولیه خریداری شده ظرفیت خریداری شده توسط مشترک از خرده‌فروش	$B(d_0)$	پارامترهای تابع هزینه تولید خودی خرده‌فروش	A_3, B_3, C_3
	d_0	هزینه‌های نصب زیرساخت‌های اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار در باس i در سناریوی W	$C_{R-DR,i}^W$
میزان مشارکت مشترک در برنامه پاسخگویی بار	Δd_1	قیمت اجرای واحد برنامه پاسخگویی بار در باس i در سناریوی W	$\rho_{DR,i}^W$
میزان نیاز کالای ظرفیت در شبکه	DEMAND	قیمت اجرای واحد برنامه بازدهی انرژی در باس i در سناریوی W	$\rho_{EE,i}^W$
میزان مشارکت مشترک در برنامه بازدهی انرژی	Δd_2	تعداد مشترکین	NC
قیمت پرداختی از سوی خرده‌فروش به مشترک برای واحد ظرفیت انجام برنامه بازدهی انرژی و پاسخگویی بار	ρ_{EE}, ρ_{DR}	الاستیسیته بازار (کشش‌پذیری قیمت بازار ظرفیت به تغییرات ظرفیت)	E_M
هزینه برنامه‌های پاسخگویی بار برای مشترک	C_{DR}	مجموع کالای ظرفیت خرده‌فروش	$UCAP_{RE}$
تقاضا پس از اعمال برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی	d_1, d_2	تابع مدل‌سازی ریسک	CVaR
هزینه برنامه‌های بازدهی انرژی برای مشترک	C_{EE}	احتمال دستیابی به سود مشخص	α
مقدار فزونی ζ از سود واقعی	η_w	متغیر نشان‌دهنده مقدار مشخصی سود (شاخص VaR)	ζ
قیمت ظرفیت خریداری شده از خرده‌فروش توسط مشترک	ρ_0^r	احتمال رخ دادن هر سناریو	π_w
پارامترهای تابع هزینه برنامه پاسخگویی بار	A_1, B_1, C_1	تعداد سناریوها	NW
پارامترهای تابع هزینه برنامه بازدهی انرژی	A_2, B_2, C_2	تابع سود خرده‌فروش	OF
سطح قرارداد برنامه بازدهی انرژی و پاسخگویی بار	CL_{EE}, CL_{DR}	درآمد خرده‌فروش در مبادله ظرفیت	R
درصد عدم اجرای تعهدات برنامه‌های پاسخگویی بار توسط مشترک	α_1	هزینه‌های خرده‌فروش در مبادله ظرفیت	C
درصد عدم اجرای تعهدات برنامه‌های بازدهی انرژی توسط مشترک	α_2	ضریب وزن‌دهی میان تابع سود و شاخص ریسک	β
هزینه افزایشی برنامه بازدهی انرژی و پاسخگویی بار	IC_{EE}, IC_{DR}	کالای ظرفیت j در باس i در سناریوی W	$UCAP_{ij}^W$
احتمال عدم دسترس‌پذیری مشترکین بدلیل تغییرات دما	FOR_1	قیمت بازار در باس i در سناریوی W	ρ_i^W
ماکزیمم میزان مشارکت مشترکین در برنامه‌های مدیریت مصرف	MM	متغیر نشان‌دهنده پذیرش یا عدم‌پذیرش کالای j در باس i در سناریوی W در بازار ظرفیت	γ_{ij}^W
جریمه لحاظ شده از سوی خرده‌فروش، برای واحد ظرفیت عدم انجام تعهدات برنامه‌های بازدهی انرژی و پاسخگویی بار	pen_{EE}, pen_{DR}	جریمه عدم اجرای تعهدات در باس i در سناریوی W	$C_{PEND,i}^W$
کالای برنامه بازدهی انرژی در باس i در سناریوی W	$UCAP_{EE,i}^W$	کالای برنامه پاسخگویی بار در باس i در سناریوی W	$UCAP_{DR,i}^W$
جریمه پرداختی به بهره‌بردار به دلیل عدم اجرای تعهدات در سناریوی W	C_{PENm}^W	نرخ جریمه تعیین شده از سوی بهره‌بردار در سناریوی W	pen_r^W
		درصد عدم اجرای تعهد خرده‌فروش در باس i در سناریوی W	$\alpha_{r,i}^W$

۱- مقدمه

با تجدید ساختار در صنعت برق، این خدمت شکل تجاری به خود گرفت و به عنوان یک کالا مطرح شد. از مهم‌ترین ویژگی‌های کالای برق عدم امکان ذخیره‌سازی آن در حجم زیاد و تقاضای به شدت متغیر آن حتی در دوره‌های کوتاه‌مدت است. بنابراین حفظ قابلیت-اطمینان مطلوب شبکه به صورت اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. به این منظور بازارهای جانبی نظیر بازار ظرفیت^۱ شکل گرفتند. بازار ظرفیت با تامین کفایت منابع و جبران پول از دست رفته سرمایه-گذاران در بلندمدت، سبب بهبود قابلیت‌اطمینان و حفظ جذابیت تجارت توسعه تولید شده است. اما از آنجا که در طرح راهبردی مدیریت سمت مصرف آژانس بین‌المللی انرژی بیان شده است که اولین گزینه در تمامی سیاست‌گذاری‌های انرژی به منظور دستیابی به سیستم‌های پایدار و قابل‌اطمینان، فعالیت‌های مدیریت سمت مصرف است، بحث حضور بار در بازار ظرفیت مطرح شد. در ادامه در دو بخش به مرور ادبیات موضوع پرداخته شده است. ابتدا به موضوع بار و انواع مدل‌های آن پرداخته شده و در ادامه بکارگیری بار در بازار ظرفیت مورد مطالعه قرار گرفته است.

موضوع مدل‌سازی بار در شبکه برق موضوع بسیار وسیعی است که در مقالات مختلف در مورد آن صحبت شده است. مدل‌های ارائه شده بار با توجه به نوع و سطح مطالعات در شبکه برق متفاوت است. در این مقاله به منظور ارائه مدل خرده‌فروش به عنوان نماینده بار به منظور مشارکت در بازار ظرفیت، انواع مختلف مدل‌های بار مطالعه شده تا نهایتاً مدل جامعی از بار در بازار ظرفیت ارائه شود. این مدل‌ها تحت عناوین مدل‌های فنی بار، مدل پیش‌بینی بار و مدل‌های اقتصادی بار در این مقاله دسته‌بندی شده‌اند.

مدل‌های فنی بار به دو دسته مدل‌های استاتیکی و دینامیکی تقسیم شده‌اند. مدل‌های استاتیکی شامل مدل‌های امپدانس ثابت، جریان ثابت، توان ثابت، مدل‌های ترکیبی و مدل‌های EPRI^۲ (۱-۲) هستند. مدل‌های دینامیکی نیز به دو دسته مدل‌های بر مبنای تجهیز [۳] و بر مبنای اندازه‌گیری [۴] تقسیم شده‌اند. در روش‌های بر مبنای تجهیز اجزای تشکیل‌دهنده وسایل الکتریکی شناسایی شده و برای هر یک از آنها مدل و معادلی از نوع سلف، مقاومت یا خازن در نظر گرفته می-

^۱ بازار ظرفیت یکی از سازوکارهای تامین ظرفیت در شبکه است. هدف این بازار اینست که در زمان هدف، ظرفیت کافی در شبکه برای تامین بار وجود داشته باشد.

^۲ Electric Power Research Institute

شود. از این روش زمانیکه رفتار یک تجهیز خاص مد نظر است استفاده می‌شود. از روش بر مبنای اندازه‌گیری نیز زمانی که مدل‌سازی بار به منظور ارزیابی رفتار آن بر عملکرد سیستم مد نظر باشد استفاده می‌شود. در این روش با اعمال ورودی و تحلیل خروجی مدل بار شناسایی می‌شود.

مدل‌های پیش‌بینی بار همانطور که از نام آنها مشخص است برای پیش‌بینی میزان پیک بار در سطح یک منطقه بکار می‌روند. در این مدل‌ها ابتدا پارامترهای تاثیرگذار بر مدل بار نظیر میزان جمعیت، تولید ناخالص ملی، تعداد روزهای گرم و سرد سال، درآمد سرانه کشور و قیمت برق شناسایی و سپس با استفاده از داده‌های گذشته شبکه تاثیر این پارامترها بر میزان بار پیک شبکه سنجیده شده که منجر به تعیین ضرایب تاثیر این پارامترها در مدل بار می‌شود. با تعیین ضرایب مربوطه و پیش‌بینی مقدار پارامترها، میزان بار پیک شبکه در آینده تخمین زده می‌شود [۵-۶].

مدل‌های اقتصادی بار نیز در این مقاله به دو دسته مدل‌های بدون مفهوم کشش‌پذیری و با مفهوم کشش‌پذیری تقسیم‌بندی شده است. مدل‌های نوع اول بسیار ساده بوده و به صورت ضرب میزان کاهش بار در قیمت برنامه پاسخگویی بار^۳ یا بازدهی انرژی^۴ بیان می‌شوند [۷-۸]. مدل‌های نوع دوم بر اساس مفهوم کشش‌پذیری و بسط تیلور تابع تقاضا ارائه شده‌اند. این مدل‌ها برای برنامه‌های پاسخگویی بار [۹-۱۰] و بازدهی انرژی [۱۱] به صورت جداگانه ارائه شده‌اند.

بهره‌برداران مستقل شبکه‌های مختلف دنیا در زمینه بکارگیری بار در بازار ظرفیت به سه دسته تقسیم شده‌اند. برخی از این بهره‌برداران همانند بهره‌برداران مناطق کالیفرنیا [۱۲] و بریتانیا [۱۳] در حال مطالعه و طراحی ساختار مناسب بازار ظرفیت به منظور بکارگیری برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی هستند. این بهره‌برداران همچنان نیاز به مطالعه بیشتر و بهره‌گیری از تجربیات سایر بازارها در بکارگیری منابع مدیریت مصرف را ضروری می‌دانند. دسته دوم بهره‌برداران نظیر بهره‌برداران مناطق نیویورک (NYISO^۵) و میدوست^۶ (MISO^۷) ایالات متحده، از برنامه‌های مدیریت مصرف به منظور تامین کفایت منابع و ارائه کالای ظرفیت بهره می‌برند اما ساختاری رقابتی به منظور رقابت میان مشترکین در فروش کالای ظرفیت فراهم نیاورده‌اند [۱۲]. بهره‌بردار نیویورک در زمان کمبود رزرو به تامین‌کننده‌های

^۳ Demand Response (DR)

^۴ Energy Efficiency

^۵ New York Independent System Operator

^۶ Midwest

^۷ Midwest Independent System Operator

مصرف در نظر گرفته‌اند [۱۲، ۱۴] و در گام دوم مدلی از ارائه‌دهندگان منابع مدیریت مصرف شامل برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی که بیان‌کننده کالای ظرفیت آنها و نحوه تعامل آنها در دو سمت بازار ظرفیت باشد، ارائه نشده است.

در این مقاله به عنوان نوآوری، ابتدا مدلی از کالای ظرفیت خرده‌فروش به عنوان ارائه‌دهنده منابع مدیریت مصرف به بازار ظرفیت ارائه شده و سپس نحوه تعامل او با مشترکین و بازار در هر دو سمت معامله ظرفیت (به عنوان فروشنده و خریدار) فرمول‌بندی و ارزیابی شده است. بخش ۲ به مدل‌سازی کالای ظرفیت خرده‌فروش به عنوان ارائه‌دهنده منابع مدیریت مصرف در بازار ظرفیت پرداخته است. ساختار تعامل خرده‌فروش با مشترکین و بازار در هر دو سمت معامله ظرفیت (به عنوان فروشنده و خریدار) در بخش ۳ فرمول‌بندی و ارزیابی شده است. روش حل مسئله، مطالعه موردی و نتیجه‌گیری نیز به ترتیب در بخش‌های ۴ تا ۶ بیان شده است.

۲- مدل‌سازی کالای ظرفیت خرده‌فروش

۲-۱- نوآوری‌های مدل ارائه‌شده

در این بخش به مدل‌سازی کالای ظرفیت خرده‌فروش به عنوان نماینده بار در بازار ظرفیت پرداخته شده است. کالای ظرفیت خرده‌فروش شامل منابع مدیریت مصرف نظیر برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی است، بنابراین می‌بایست از مدل‌های اقتصادی این منابع به منظور مدل‌سازی کالای ظرفیت خرده‌فروش استفاده کرد. خرده‌فروش می‌بایست رفتار مشترکین در ارائه ظرفیت را پیش‌بینی کرده و متناسب با آن در بازار ظرفیت مشارکت کند. نوآوری‌هایی که در این مقاله برای مدل‌نمایی کالای ظرفیت خرده‌فروش ارائه شده، در ادامه اشاره شده است:

- مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی به طور جداگانه به مدل‌سازی این برنامه‌ها پرداخته‌اند. این در حالی است که مدل‌نمایی کالای ظرفیت خرده‌فروش می‌بایست به طور همزمان این دو برنامه را شامل شود.
- در مدل‌های برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه شده در مقالات، تنها مفهوم کشش‌پذیری بار نسبت به قیمت برق در نظر گرفته شده است و صحبتی از کشش‌پذیری اجرای این برنامه‌ها نسبت به هزینه‌های اجرای آنها نشده است. این مسئله که می‌تواند تاثیر قابل توجهی در اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار

منابع مدیریت مصرف پیام مشارکت اجباری می‌دهد. این تامین‌کنندگان در ازای تعهد مشارکت در زمان نیاز، به صورت ماهانه مبلغی دریافت می‌کنند. بهره‌بردار منطقه میدوست نیز به دو روش از این منابع در ارائه کالای ظرفیت بهره می‌برد. روش اول بکارگیری برنامه‌های پاسخگویی بار اضطراری به منظور تامین کفایت منابع است. این بهره‌بردار قیمتی برابر با بالاترین پیشنهاد ارائه‌دهندگان، به تمامی مشارکت‌کنندگان پرداخت می‌کند. از این نوع برنامه پاسخگویی بار در حدود ۸۰۰ مگاوات در این منطقه وجود دارد. روش دوم نیز بکارگیری این برنامه‌ها به منظور اصلاح بار شرکت‌های توزیع است، که به این شرکت‌ها اجازه می‌دهد تا به منظور تعهد ظرفیت ماهانه خود بار مشترکین را کاهش دهند. در این برنامه به مشترکین بر مبنای قراردادی که با شرکت‌های توزیع دارند پرداخت می‌شود. از این نوع برنامه پاسخگویی بار در حدود ۶۰۰۰ مگاوات در این منطقه وجود دارد [۱۲]. اما دسته سوم بهره‌برداران نظیر بهره‌برداران مناطق نیوانگلند^۱ و PJM^۲ از برنامه‌های مدیریت مصرف به شیوه‌ای رقابتی بهره می‌برند. در این دو منطقه رقابت میان منابع مدیریت مصرف در بازار ظرفیتی مجزا موسوم به بازار ثانویه و به منظور ایجاد تعادل میان تقاضا و ارائه ظرفیت انجام می‌شود [۱۳]. بهره‌بردار PJM سه نوع کالای DR شامل: Limited DR، Extended summer DR و Annual DR به منظور مشارکت در بازار ظرفیت تعریف کرده است [۱۴]. این مشارکت در حراج‌های اولیه و اضافی بازار ظرفیت PJM به ترتیب در مراجع [۱۵] و [۱۶] معرفی و مدل‌سازی شده است. تامین‌کننده سرویس قطع^۳ (CSP) از جانب بهره‌بردار PJM مسئول ارزیابی پتانسیل ارائه‌دهندگان کالای ظرفیت و نظارت بر اجرای دقیق مشارکت آنها است [۱۷]. بازار ظرفیت نیوانگلند نیز دو نوع کالای ظرفیت DR تعریف کرده است [۱۲]. نتایج مرجع [۱۸] نشان داده است که حضور منابع مدیریت مصرف در بازار ظرفیت نیوانگلند به دلیل ایجاد کاهش نیاز به ظرفیت نیروگاه‌ها، سبب کاهش قیمت ظرفیت شده است.

نگاه به منابع مدیریت سمت مصرف، حتی در دسته سوم بهره‌برداران که پیشروترین بهره‌برداران در بکارگیری این منابع در بازار ظرفیت هستند نیز ناکامل است؛ زیرا در گام اول نگاه به این منابع همانند سایر منابع ارائه‌دهنده ظرفیت نیست؛ از یک سو رقابت میان این منابع را در حراجی مستقل از حراج ظرفیت نیروگاه‌ها برگزار کرده‌اند (بازار ثانویه) و از سوی دیگر تعهداتی متفاوت از تعهدات نیروگاه‌ها برای منابع سمت

¹ New England

² Pennsylvania-Jersey-Maryland

³ Curtailment Service Provider (CSP)

داشته باشد می‌بایست در مدل نهایی کالای ظرفیت خرده-فروش لحاظ گردد.

- در مدل برنامه‌های بازدهی انرژی تنها مفهوم کشش‌پذیری اجرای این برنامه‌ها نسبت به هزینه‌های پیاده‌سازی آنها در نظر گرفته شده و تاثیر مبالغ تشویقی و جریمه در آن دیده نشده است. بنابراین با توجه به تاثیر این دو پارامتر در میزان مشارکت مشترکین این مسئله نیز می‌بایست در مدل نهایی کالای ظرفیت خرده‌فروش در نظر گرفته شود.
- دمای هوا یک پارامتر مهم در تغییر رفتار مشترکین است. به منظور مدل‌سازی کالای ظرفیت خرده‌فروش می‌بایست تغییرات دمای هوا و تاثیر آن بر تغییر رفتار مشترکین نیز مد نظر قرار گرفته و مدل‌سازی شود.

بنابراین ابتدا مدل‌های برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی مشترکین با استفاده از تابع سود مشترکین، به عنوان مدل کالای ظرفیت مشترکین ارائه شده و سپس تاثیر تغییرات دمای هوا به عنوان نرخ خروج اجباری مشترکین (FOR^1) مدل‌سازی خواهد شد. پس از ارائه مدل نهایی کالای ظرفیت مشترکین، مدل کالای ظرفیت خرده-فروش به صورت مجموع کالای ظرفیت خریداری شده از مشترکین به دست خواهد آمد. میزان کالای ظرفیت خریداری شده توسط خرده-فروش از مشترکین نیز، تابع سود خرده‌فروش از تعامل با مشترکین و بازار ظرفیت است که در بخش ۳ تحت عنوان، ساختار تعامل خرده-فروش با مشترکین و بازار، ارائه خواهد شد. در این مدل عدم قطعیت-هایی که خرده‌فروش با آنها مواجه است نیز در نظر گرفته شده و با استفاده از شاخص ریسک $CVaR^2$ سعی در ماکزیم‌سازی سود خرده-فروش شده است.

۲-۲-۲- مدل‌سازی کالای ظرفیت مشترکین

کالای ظرفیت مشترکین ترکیبی از ظرفیت ارائه‌شده توسط آنها و میزان دسترس‌پذیری این ظرفیت است. ابتدا به مدل‌سازی ظرفیت ارائه شده توسط مشترکین پرداخته شده است.

۲-۲-۱- مدل‌سازی ظرفیت مشترک

مدل نهایی ظرفیت مشترک با ماکزیم‌سازی سود او از مبادله ظرفیت حاصل می‌شود. سود مشترک تابعی از ظرفیت ارائه شده توسط او به صورت برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی است که در رابطه (۱) آورده شده است. در این رابطه هزینه‌های مشترک از درآمدهای او کم

شده است. در این رابطه C_{net} هزینه‌های کل مشترک، B_{net} درآمدهای کل او و $P(d_1, d_2)$ سود کل مشترک از مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی است. رابطه (۲) میزان مشارکت مشترک در برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی را نشان داده است. در این رابطه Δd_1 میزان مشارکت مشترک در برنامه پاسخگویی بار و Δd_2 میزان مشارکت او در برنامه‌های بازدهی انرژی است. رابطه (۳) درآمد کل مشترک و رابطه (۴) هزینه‌های کل مشترک از مبادله ظرفیت را نشان داده است. پارامترهای بیان شده در رابطه (۱) در این دو رابطه تشریح شده‌اند. درآمد کل مشترک در رابطه (۳) شامل ارزش کالای ظرفیت از دیدگاه او و درآمدهای او از مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی است. همچنین هزینه‌های مشترک در رابطه (۴) شامل هزینه‌های پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی، جرایم ناشی از عدم اجرای تعهدات و هزینه‌های خرید ظرفیت در سمت دوم بازار ظرفیت است. روابط (۵) و (۶) نیز به ترتیب توابع هزینه اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار [۱۹] و بازدهی انرژی [۱۱] توسط مشترک را نشان داده‌اند. رابطه (۷) نیز جریمه ناشی از عدم اجرای تعهدات را بیان کرده است.

$$P(d_1, d_2) = B_{net} - C_{net} \quad (۱)$$

$$\Delta d_1 = d_1 - d_0 \quad (۲)$$

$$\Delta d_2 = d_2 - d_0 \quad (۳)$$

$$B_{net} = B(d) + (d_0 - d_1) \cdot \rho_{DR} + (d_0 - d_2) \cdot \rho_{EE} \quad (۴)$$

$$C_{net} = C_{DR} + C_{EE} + C_{PENd} + d \cdot \rho \quad (۵)$$

$$C_{DR} = A_1 \cdot \Delta d_1^2 + B_1 \cdot \Delta d_1 + C_1, \quad (۶)$$

$$B_1^2 - 4A_1 \cdot C_1 \leq 0, \quad A_1 > 0, \quad C_1 \geq 0$$

$$C_{EE} = A_2 \cdot \Delta d_2^2 + B_2 \cdot \Delta d_2 + C_2, \quad (۷)$$

$$B_2^2 - 4A_2 \cdot C_2 \leq 0, \quad A_2 > 0, \quad C_2 \geq 0$$

$$C_{PENd} = pen_{DR} \cdot [CL_{DR} - (d_0 - d_1)] + \quad (۸)$$

$$pen_{EE} \cdot [CL_{EE} - (d_0 - d_2)]$$

با توجه به اینکه هدف اصلی مشترکین از ارتباط با شبکه برق، مصرف برق است، میزان مشارکت آنها همواره محدود می‌باشد. این محدودیت در اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف در رابطه (۸) بیان شده است، که معمولاً کمتر از ۱۰ درصد ظرفیت کل مشترک در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر ماکزیمم میزان مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی توسط پارامتر MM نمایش داده شده است.

$$\Delta d_1, \Delta d_2 \leq MM \quad (۸)$$

¹ Forced Outage Rate

² Conditional Value at Risk

۲-۲-۲- مدل سازی عدم دسترس پذیری ظرفیت مشترک پارامتری که بر مدل ظرفیت مشترک تاثیرگذار بوده و سبب عدم دسترس پذیری آن می شود در ادامه بیان و مدل سازی شده ست.

۲-۲-۲-۱- مدل سازی تغییرات دمای هوا با توجه به تغییرات سالانه دمای هوا و برگزاری حراج این بازارها از چند سال پیش تر، پارامتر دما اولین پارامتری است که در مدل سازی عدم دسترس پذیری ظرفیت مشترکین می بایست به آن پرداخت [۲۰]. بطور کلی هدف مشترک از ارتباط با شبکه برق، مصرف برق بوده و به دنبال تامین برق مورد نیاز خود با هزینه ای منطقی است، بنابراین اولویت مشترکین حفظ رفاه و سپس معامله ظرفیت است. یکی از عواملی که رفاه مشترکین را تحت تاثیر قرار می دهد، دمای هواست. از یکسو با بالا رفتن دمای هوا مشترکین از وسایل سرمایشی و با پایین آمدن آن از وسایل گرمایشی استفاده می کنند و از سوی دیگر تجربیات بکارگیری بار در برنامه های پاسخگویی بار و مدیریت مصرف نشان می دهد که تجهیزات گرمایشی- سرمایشی بیشترین میزان بکارگیری در این برنامه ها را داشته اند [۲۱-۲۲]. بنابراین این مسئله پاسخگویی مشترکین به تعهداتشان را کم رنگ می کند [۲۳]. با کاهش ظرفیت ارائه شده به خرده فروش به طور طبیعی خرده فروش نیز از انجام تعهدات خود در بازار ظرفیت ناتوان مانده و مشمول جریمه خواهد شد. بنابراین خرده فروش می بایست پیشاپیش این کاهش ظرفیت را پیش بینی نموده و متناسب با آن در بازار ظرفیت مشارکت کند. این کاهش ظرفیت مشترکین پارامتری است که عدم دسترس پذیری مشترکین را بیان کرده و تحت عنوان FOR_1 معرفی شده است.

پیش از این به طور عمومی مدلهایی از تاثیر دما بر مصرف مشترکین ارائه شده است که نیاز به اطلاعات ۱۰ تا ۳۰ سال گذشته سیستم دارند [۲۴-۲۵]. دستیابی به این اطلاعات خصوصا در کشورهای در حال توسعه بسیار مشکل است. مدل ارائه شده در این مقاله دارای دو ویژگی بسیار مهم است:

- مدلی جامع است که در تمامی کشورها قابل بکارگیری است.
- نیازی به اطلاعات پیشین سیستم ندارد و تنها با اطلاعات سال جاری که توسط خود خرده فروش نیز قابل اندازه گیری است، فرمول بندی شده است.

وابستگی مصرف مشترکین به دما در بسیاری از کشورهای دنیا ارزیابی و در این مطالعات وابستگی U شکل مصرف مشترکین به دما تایید شد [۲۶-۳۰]. نمودار عمومی وابستگی مصرف به دما در کشورهای مختلف U شکل است، اما این نمودار حالت های دیگری نیز می تواند داشته

با توجه به آزمون مشتق برای توابع با دو متغیر مستقل $(\Delta d_1, \Delta d_2)$ ، به منظور ماکزیم سازی سود مشترک از مبادله ظرفیت، در روابط (۹) تا (۱۴) داریم Δd_1 و Δd_2 کوچکتر از صفر به مفهوم مشارکت در برنامه های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی است و Δd_1 و Δd_2 بزرگتر از صفر برابر صفر در نظر گرفته خواهند شد:

$$\frac{\partial P}{\partial (d_1)} = \frac{\partial P}{\partial (d_2)} = 0 \quad (9)$$

$$P(d_1, d_2) = B(d) + \rho_{DR} \cdot (d_0 - d_1) + \rho_{EE} \cdot (d_0 - d_2) - C_{DR} - C_{EE} - pen_{DR} [CL_{DR} - (d_0 - d_1)] - pen_{EE} [CL_{EE} - (d_0 - d_2)] - d \cdot \rho \quad (10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial d_1} = \frac{\partial B}{\partial d_1} - \rho_{DR} - \frac{\partial C_{DR}}{\partial d_1} - pen_{DR} - \rho - d \frac{\partial \rho}{\partial d_1} = 0 \rightarrow \frac{\partial B}{\partial d_1} = \rho_{DR} + \frac{\partial C_{DR}}{\partial d_1} + pen_{DR} + \rho + d_1 \frac{\partial \rho}{\partial d_1} \quad (11)$$

رابطه (۱۰) تابع سود مشترک را با جزئیات کامل بیان کرده است. شرط ماکزیم سازی سود مشترک نیز با تابع بیان شده در رابطه (۱۰) در رابطه (۱۱) ارائه شده است. از سوی دیگر با در نظر گرفتن بسط تیلور تابع B و شرایط اولیه این تابع در روابط (۱۲) و (۱۳) داریم:

$$B(d) = B(d_0) + \frac{\partial B(d_0)}{\partial d_1} (d_1 - d_0) \rightarrow \frac{\partial B(d)}{\partial d_1} = \frac{\partial B(d_0)}{\partial d_1} \quad (12)$$

$$\frac{\partial B(d_0)}{\partial d_1} = \rho_0 + d_0 \cdot \frac{\partial \rho}{\partial d_1} \quad (13)$$

در نهایت رابطه نهایی مدل مشارکت مشترکین در برنامه پاسخگویی بار در (۱۴) به دست آمده است.

$$\rho_0 + d_0 \cdot \frac{\partial \rho}{\partial d_1} = \rho_{DR} + \frac{\partial C_{DR}}{\partial d_1} + pen_{DR} + \rho + d_1 \frac{\partial \rho}{\partial d_1} \rightarrow (d_1 - d_0) \frac{\partial \rho}{\partial d_1} = \rho_0 - \rho - \rho_{DR} - pen_{DR} + IC_{DR} \xrightarrow{E_M = \frac{d_0 \cdot \partial \rho}{\rho_0 \cdot \partial d_1}} \rightarrow \quad (14)$$

$$d_1 = \begin{cases} d_0 \left(1 + \frac{\rho_0 - \rho - \rho_{DR} - pen_{DR} + IC_{DR}}{\rho_0 \cdot E_M} \right), & \text{if } \rho_{DR} \geq IC_{DR} \\ 0, & \text{if } \rho_{DR} < IC_{DR} \end{cases}$$

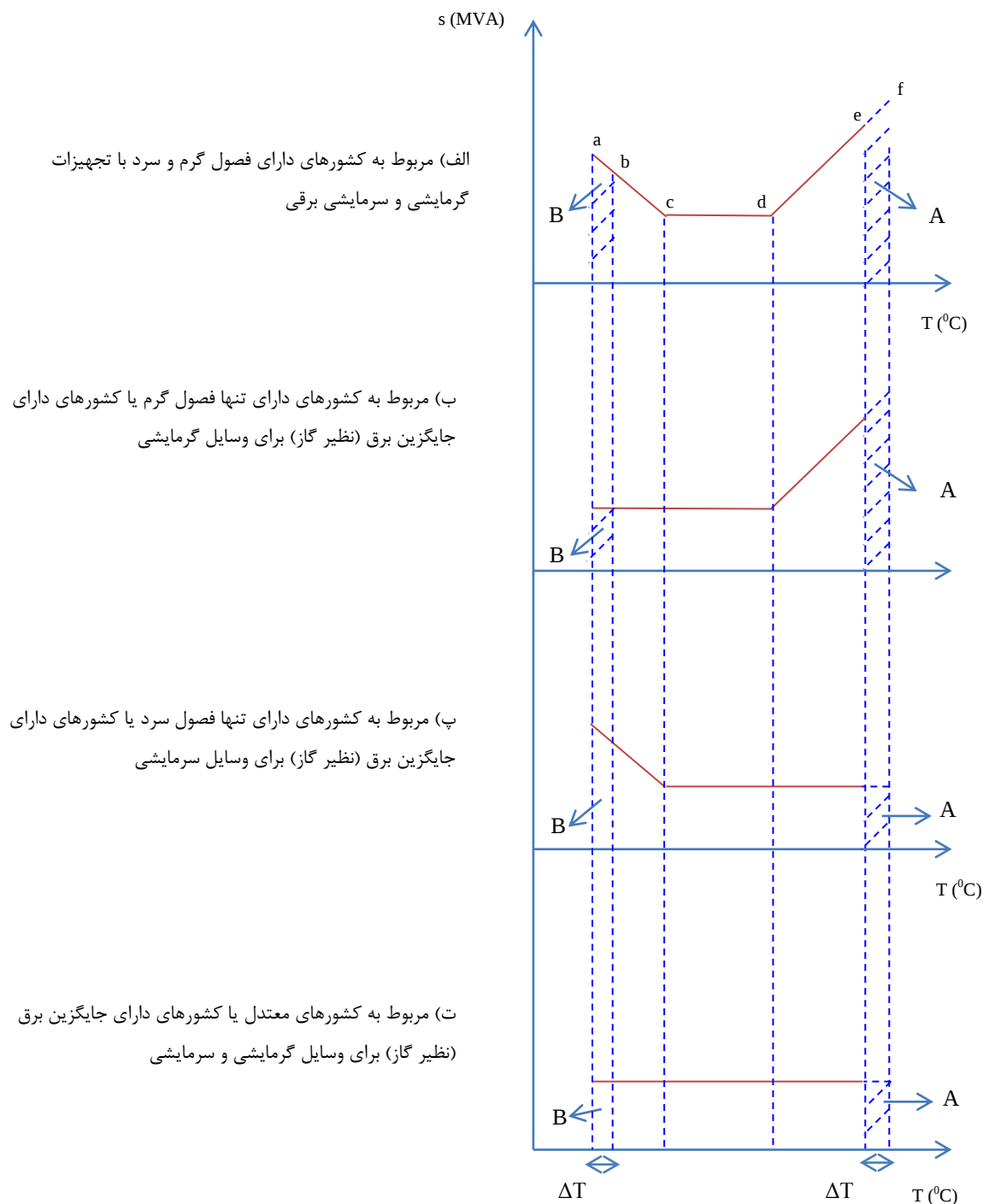
مشابه روابط (۱۱) و (۱۴)، برای برنامه بازدهی انرژی نیز داریم. رابطه نهایی برنامه بازدهی انرژی در رابطه (۱۵) بیان شده است:

$$d_2 = \begin{cases} d_0 \left(1 + \frac{\rho_0 - \rho - \rho_{EE} - pen_{EE} + IC_{EE}}{\rho_0 \cdot E_M} \right), & \text{if } \rho_{EE} \geq IC_{EE} \\ 0, & \text{if } \rho_{EE} < IC_{EE} \end{cases} \quad (15)$$

در ادامه به مدل سازی عدم دسترس پذیری ظرفیت مشترک به منظور ارائه مدل نهایی کالای ظرفیت مشترک پرداخته شده است.

شکل های وابستگی مصرف مشترکین به دما در شکل (۱) آورده شده است.

باشد، که در ادامه به آنها اشاره شده است. مدلی که در این مقاله ارائه شده است نیز مستقل از شکل وابستگی مصرف به دماست. به همین دلیل است که ویژگی جامع بودن به آن نسبت داده شده است. انواع



شکل ۱. انواع نمودارهای مصرف- دما مربوط به مشترکین کشورها با شرایط آب و هوایی مختلف [۳۰]

$$\Delta S = S_2 - S_1 = S_B - S_A = \frac{(sb + sa)(\Delta T)}{2} - \frac{(sf + se)(\Delta T)}{2}$$

با ترکیب روابط (۲۰)، (۱۷) و (۱۸) خواهیم داشت (همچنین می‌دانیم $(\Delta T = T - T_e)$):

$$\begin{aligned} \Delta S &= \frac{\Delta T}{2} \times ((m2 - m1)\Delta T + 2sa - 2se) = \frac{(T - Te)}{2} \times \\ &((m2 - m1)(T - Te) + 2sa - 2se) = \frac{(m2 - m1)(T - Te)^2}{2} \\ &+ (sa - se)(T - Te) = \left(\frac{m2 - m1}{2} \right) (T^2 + Te^2 - 2T \times Te) \\ &+ (sa - se)T - (sa - se)Te \Rightarrow \Delta S = \left(\frac{m2 - m1}{2} \right) T^2 + \\ &(se - sa - m2 \times Te + m1 \times Te)T + \left\{ \left(\frac{m2 - m1}{2} \right) Te^2 - \right. \\ &\left. (sa - se)Te \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\Delta T < 0$$

FOR₁ با استفاده از رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$FOR_1 = \begin{cases} \frac{\Delta S}{S_1} & \text{if } \Delta S > 0 \\ 0 & \text{if } \Delta S \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

FOR₁ به یک اندازه از مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی خواهد کاست.

۲-۳- مدل‌سازی کالای ظرفیت خرده‌فروش

همانطور که بیان شد کالای ظرفیت خرده‌فروش مجموع کالاهای ظرفیت مشترکینی است که خرده‌فروش با آنها قرارداد دارد. بنابراین کالای ظرفیت خرده‌فروش از رابطه (۲۳) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} UCAP_{RE} &= \sum_{ii=1}^{NC} \{ UCAP_{DR}^{ii} + UCAP_{EE}^{ii} \} + UCAP_{SG} = \\ &= \sum_{ii=1}^{NC} \left\{ \Delta d_1^{ii} \times (1 - FOR_{1,DR}^{ii}) + \right. \\ &\left. \Delta d_2^{ii} \times (1 - FOR_{1,EE}^{ii}) \right\} + UCAP_{SG} \end{aligned} \quad (23)$$

همانطور که پیش از این نیز بیان شد، میزان کالای ظرفیت خریداری شده توسط خرده‌فروش، خروجی ماکزیم‌سازی سود او در تعامل با مشترکین و بازار ظرفیت است.

۳- ساختار تعامل خرده‌فروش با مشترکین و بازار ظرفیت

همانطور که می‌دانیم بنا به دلایل اقتصادی و مدیریتی حضور بار در بازار ظرفیت تنها با مشارکت نماینده مجموعه‌ای از بارها که در این

تمامی کشورهای دنیا از چهار دسته اشاره شده در شکل (۱) خارج نیستند و منحنی مصرف-دما نیز برای تمامی کشورها مشابه این شکل است. با افزایش دما نسبت به سال حراج، مساحت A به مصرف متوسط، اضافه و مساحت B از آن کم می‌شود. روابط مربوط به مدل-سازی مصرف مشترکین نسبت به تغییرات دما در ادامه آورده شده است. در صورتیکه تغییرات دما مثبت باشد، با توجه به شکل (۱-الف) داریم:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = S_A - S_B = \frac{(sf + se)(\Delta T)}{2} - \frac{(sb + sa)(\Delta T)}{2} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) S_2 مساحت منحنی U شکل پس از تغییر دما و S_1 مساحت این منحنی پیش از تغییر دماست.

در صورتیکه روابط برای سایر نمودارهای شکل (۱) نیز نوشته شود، مجدداً به رابطه (۱۶) خواهیم رسید. از سوی دیگر با نوشتن معادله دو خط شیب‌دار شکل (۱-الف) روابط (۱۷) و (۱۸) نتیجه می‌شوند:

$$sf - se = m1(\Delta T) \Rightarrow sf = se + m1(\Delta T) \quad (17)$$

$$sb - sa = m2(\Delta T) \Rightarrow sb = sa + m2(\Delta T) \quad (18)$$

با ترکیب روابط (۱۶) تا (۱۸) خواهیم داشت (همچنین می‌دانیم $(\Delta T = T - T_e)$):

$$\begin{aligned} \Delta S &= \frac{\Delta T}{2} \times ((m1 - m2)\Delta T + 2se - 2sa) = \frac{(T - Te)}{2} \times \\ &((m1 - m2)(T - Te) + 2se - 2sa) = \frac{(m1 - m2)(T - Te)^2}{2} + \\ &(se - sa)(T - Te) = \left(\frac{m1 - m2}{2} \right) (T^2 + Te^2 - 2T \times Te) + \\ &(se - sa)T - (se - sa)Te \Rightarrow \Delta S = \left(\frac{m1 - m2}{2} \right) T^2 + \\ &(se - sa - m1 \times Te + m2 \times Te)T + \left\{ \left(\frac{m1 - m2}{2} \right) Te^2 - \right. \\ &\left. (se - sa)Te \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\Delta T > 0$$

در این رابطه Te دمای ماکزیم سال جاری، sa میزان مصرف در دمای مینیم سال جاری، se میزان مصرف در دمای ماکزیم سال جاری، $m1$ الاستیسیته فصل تابستان و $m2$ الاستیسیته فصل زمستان مشترکین مورد نظر خرده‌فروش است. در صورتیکه تغییرات دما منفی باشد، داریم:

درآمدهای خرده فروش شامل فروش ظرفیت در بازار ظرفیت و جریمه های دریافتی از مشترکین به دلیل عدم اجرای تعهداتشان است. این درآمدها در رابطه (۲۹) آورده شده است.

$$R_{ff} = \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \cdot \left[\sum_{i=1}^{Ni} \left(\sum_{j=1}^{Nj} (\gamma_{ij}^W \cdot \rho_i^W \cdot UCAP_{ij}^W) + C_{PENd,i}^W \right) \right] \quad (29)$$

بخش دوم درآمدهای خرده فروش شامل فروش ظرفیت به مشترکین است. این درآمد در رابطه (۳۰) آورده شده است. درآمد کلی خرده فروش از مبادله ظرفیت نیز در رابطه (۳۱) آورده شده است.

$$R_{ss} = \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \sum_{i=1}^{Ni} \rho_{0i}^{r,W} \cdot UCAP_i^W \quad (30)$$

$$R = R_{ff} + R_{ss} = \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \cdot \left[\sum_{i=1}^{Ni} \left(\sum_{j=1}^{Nj} (\gamma_{ij}^W \cdot \rho_i^W \cdot UCAP_{ij}^W) + C_{PENd,i}^W + \rho_{0i}^{r,W} \cdot UCAP_i^W \right) \right] \quad (31)$$

۳-۲-۲- هزینه های خرده فروش

هزینه های خرده فروش از مبادله ظرفیت نیز شامل دو بخش است. هزینه های خرده فروش به عنوان ارائه دهنده ظرفیت به بازار و هزینه های خرده فروش به عنوان فروشنده ظرفیت به مشترکین. بخش اول هزینه های او از مبادله ظرفیت به عنوان ارائه دهنده این کالا در بازار ظرفیت و بخش دوم هزینه های او از مبادله ظرفیت در سمت دیگر بازار با مشترکین به عنوان فروشنده ظرفیت است. بخش اول هزینه های خرده فروش شامل خرید ظرفیت از مشترکین، هزینه نصب برخی زیرساخت های اجرای برنامه های پاسخگویی بار، هزینه تولید خودی و جریمه های پرداختی او به بهره بردار مستقل سیستم به دلیل عدم اجرای تعهداتش است. این هزینه ها در رابطه (۳۲) آورده شده است.

$$C_{ff} = \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \cdot \left[\sum_{i=1}^{Ni} \left(C_{R-DR,i}^W + \rho_{DR,i}^W \cdot UCAP_{DR,i}^W + \rho_{EE,i}^W \cdot UCAP_{EE,i}^W \right) + C_{PENm}^W \right] + C_{SG}^W \quad (32)$$

$$C_{PENm}^W = \left[\sum_{i=1}^{Ni} pen_r^W \cdot \alpha_{r,i}^W \cdot UCAP_{r,i}^W \right] \quad (33)$$

$$C_{SG}^W = A_3 \cdot (P_{SG}^W)^2 + B_3 \cdot P_{SG}^W + C_3, \quad (34)$$

$$B_3^2 - 4A_3 \cdot C_3 \leq 0, \quad A_3 > 0 \quad C_3 \geq 0$$

بخش دوم هزینه های خرده فروش نیز شامل خرید ظرفیت از بازار است. این هزینه در رابطه (۳۵) آورده شده است. هزینه های کلی خرده فروش از مبادله ظرفیت نیز در رابطه (۳۶) آورده شده است.

$$C_{ss} = \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \sum_{i=1}^{Ni} \rho_i^W \cdot UCAP_i^W \quad (35)$$

مقاله خرده فروش در نظر گرفته شده است، امکان پذیر است. از جمله این دلایل می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- به منظور بهره گیری موثرتر از ظرفیت مشترکین حتما می بایست در ساختار بازار از آنها استفاده کرد که این امر جز با کاهش تعداد مشترکین و بکارگیری خرده فروشان در بازار میسر نیست.
- عدم قطعیت های پاسخگویی خرده فروش به تعهداتش به دلیل داشتن تولید خودی کمتر است.
- فلسفه ایجاد خرده فروش تجارت است بر خلاف مشترک؛ بنابراین خرده فروش حضور کم نوسان تر و موثرتری خواهد داشت.

خرده فروش به منظور کسب سود در بازار ظرفیت با دو بخش در ارتباط است؛ مشترکین که ارائه دهندگان ظرفیت به خرده فروش هستند و بازار ظرفیت که محل فروش ظرفیت خرده فروش است. بنابراین سود خرده فروش در گرو عملکرد او در ارتباط با این دو بخش است. عملکرد خرده فروش به منظور مشارکت در بازار ظرفیت نیز تابع سود خرده فروش از مشارکت در این بازار است که در ادامه آورده شده است.

۳-۱- مدل سازی ریسک

برای محاسبه فراربت سود خرده فروش در مدل، از تابع CVaR استفاده شده است (رابطه (۲۴)) [۳۱].

$$CVaR = \max_{\zeta, \eta_W} \left\{ \zeta - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \eta_W \right\} \quad (24)$$

$$\eta_W = \max \{ \zeta - Profit(W), 0 \} \quad (25)$$

قیود تابع شاخص ریسک نیز مطابق روابط (۲۶) و (۲۷) هستند.

$$\zeta - Profit(W) \leq \eta_W \quad \forall W \quad (26)$$

$$\eta_W \geq 0 \quad \forall W \quad (27)$$

۳-۲- تابع هدف خرده فروش

تابع هدف مسئله تابع سود خرده فروش همراه با در نظر گرفتن ریسک است که در رابطه (۲۸) آورده شده است.

$$OF = (1-\beta) \times (R-C) + \beta \times CVaR \quad \beta \in [0,1] \quad (28)$$

۳-۲-۱- درآمدهای خرده فروش

درآمدهای خرده فروش از مبادله ظرفیت شامل دو بخش است. درآمدهای خرده فروش به عنوان ارائه دهنده ظرفیت به بازار و درآمد خرده فروش به عنوان فروشنده ظرفیت به مشترکین. بخش اول درآمدهای او از فروش ظرفیت در بازار ظرفیت و بخش دوم درآمد او از فروش ظرفیت در سمت دیگر بازار به مشترکین است. بخش اول

(۳۶)

$$C = C_{ff} + C_{ss} =$$

$$= \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \cdot \left[\sum_{i=1}^{NI} \left(C_{R-DR,i}^W + \rho_{DR,i}^W \cdot UCAP_{DR,i}^W + \rho_{EE,i}^W \cdot UCAP_{EE,i}^W + \rho_i^W \cdot UCAP_i^W \right) + \left[C_{PENm}^W + C_{SG}^W \right] \right]$$

قیود مسئله در ادامه آورده شده است.

۳-۳- قیود مسئله

قیود مسئله به سه دسته قیود حاکم بر منابع، قیود ریسک و قیود شبکه تقسیم شده‌اند.

۳-۳-۱- قیود باینری حاکم بر منابع مدیریت مصرف

این قیود در روابط (۳۷) و (۳۸) بیان شده‌اند.

(۳۷)

$$\gamma_{ij}^W \in \{0,1\}$$

(۳۸)

$$\gamma_{ij}^W = \begin{cases} 1 & \text{if } UCAP_{ij}^W \text{ be a winner in the market} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

۳-۳-۲- قیود حاکم بر توابع هزینه منابع مدیریت مصرف و تولید خودی خرده‌فروش

$$B_i^2 - 4A_i.C_i \leq 0, \quad A_i > 0, \quad C_i \geq 0 \quad i \in \{1,2,3\} \quad (۳۹)$$

این قیود بیان‌کننده محدودیت‌های پارامترهای توابع هزینه منابع مدیریت مصرف و تولید خودی خرده‌فروش هستند.

۳-۳-۳- قید محدودکننده مشارکت مشترکین در مدیریت مصرف

$$\Delta d_1, \Delta d_2 \leq MM \quad (۴۰)$$

این قید بیان می‌کند که مشترکین به صورت محدود در برنامه‌های مدیریت مصرف شرکت می‌کنند. میزان MM معمولاً ۱۰ درصد ظرفیت مشترک در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳-۴- قید محدودکننده مشارکت ژنراتورها

$$P_{G,\min}^W \leq P_G^W \leq P_{G,\max}^W \quad (۴۱)$$

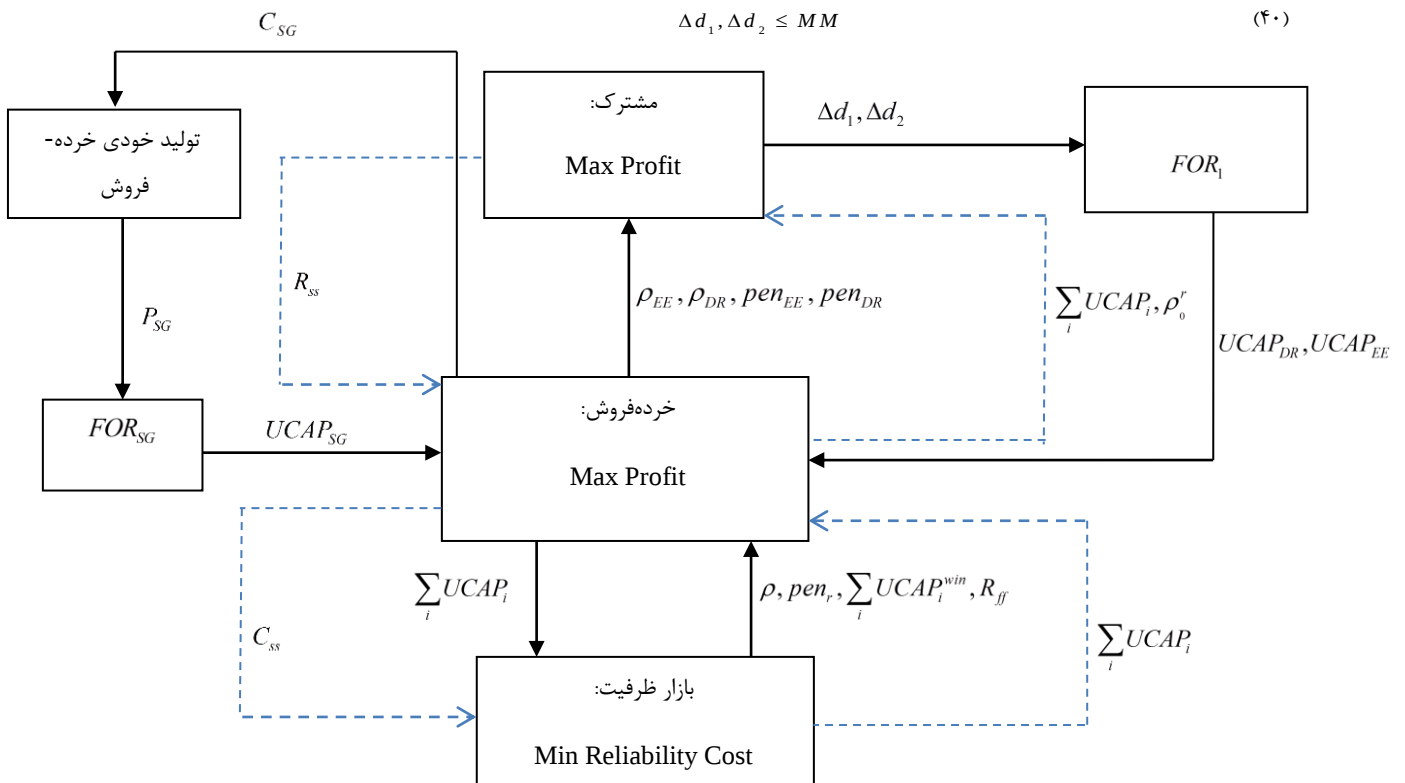
این قید بیان‌کننده محدودیت مشارکت ژنراتورها در بازار ظرفیت است.

۳-۳-۵- قید سناریوبندی در حل مسئله

(۴۲)

$$\sum_{W=1}^{NW} \pi_W = 1, \quad \forall W \in NW$$

این قید بیان می‌کند که مجموع احتمال رخداد تمامی سناریوها برابر یک است.



شکل ۲. ساختار کلی تعامل خرده‌فروش با بخش‌های مختلف در مبادله ظرفیت

۳-۳-۶- قیود تابع شاخص ریسک

این قیود که در روابط (۲۶) و (۲۸) ذکر شده‌اند، مجدداً در روابط (۴۳) و (۴۴) بازنویسی شده‌اند.

$$\left(\left\{ \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \cdot \left[\sum_{i=1}^{Ni} \left(\gamma_{ij}^W \cdot \rho_i^W \cdot UCAP_{ij}^W \right) + \left(C_{PENd,i}^W + \rho_{0i}^{r,W} \cdot UCAP_i^W \right) \right] \right\} \right) - \quad (43)$$

$$\left(\left\{ \sum_{W=1}^{NW} \pi_W \cdot \left[\sum_{i=1}^{Ni} \left(\rho_{DR,i}^W \cdot UCAP_{DR,i}^W + \rho_{EE,i}^W \cdot UCAP_{EE,i}^W + \rho_i^W \cdot UCAP_i^W + C_{R-DR,i}^W \right) \right] + \left[C_{PENm}^W + C_{SG}^W \right] \right\} \right) \leq \eta_W \quad \forall W \quad (44)$$

$$\eta_W \geq 0 \quad \forall W$$

۳-۳-۷- قید حداکثر میزان انتقال ظرفیت از خطوط شبکه

$$P_{i \rightarrow i^*}^W \leq P_{i \rightarrow i^*}^{l, \max}, \quad \{i, i^*\} \in Ni, \quad l \in Nl \quad (45)$$

این قید بیان می‌کند که عامل محدودکننده در انتقال ظرفیت از باسی به باس دیگر حد انتقال توان خطوط است.

۳-۳-۸- قید ارائه و نیاز ظرفیت در شبکه

$$\sum_{i=1}^{Ni} UCAP_i^W \geq DEMAND^W \quad (46)$$

این قید بیان می‌کند که میزان ارائه کالای ظرفیت همواره می‌بایست بیشتر از نیاز این کالا در شبکه باشد. در نهایت، ساختاری که خرده-فروش در مبادله ظرفیت با آن روبروست در شکل (۲) آورده شده است. در این شکل بخش اول مبادلات ظرفیت با خطوط توپر و بخش دوم با خط چین مشخص شده است.

۴- روش حل مسئله

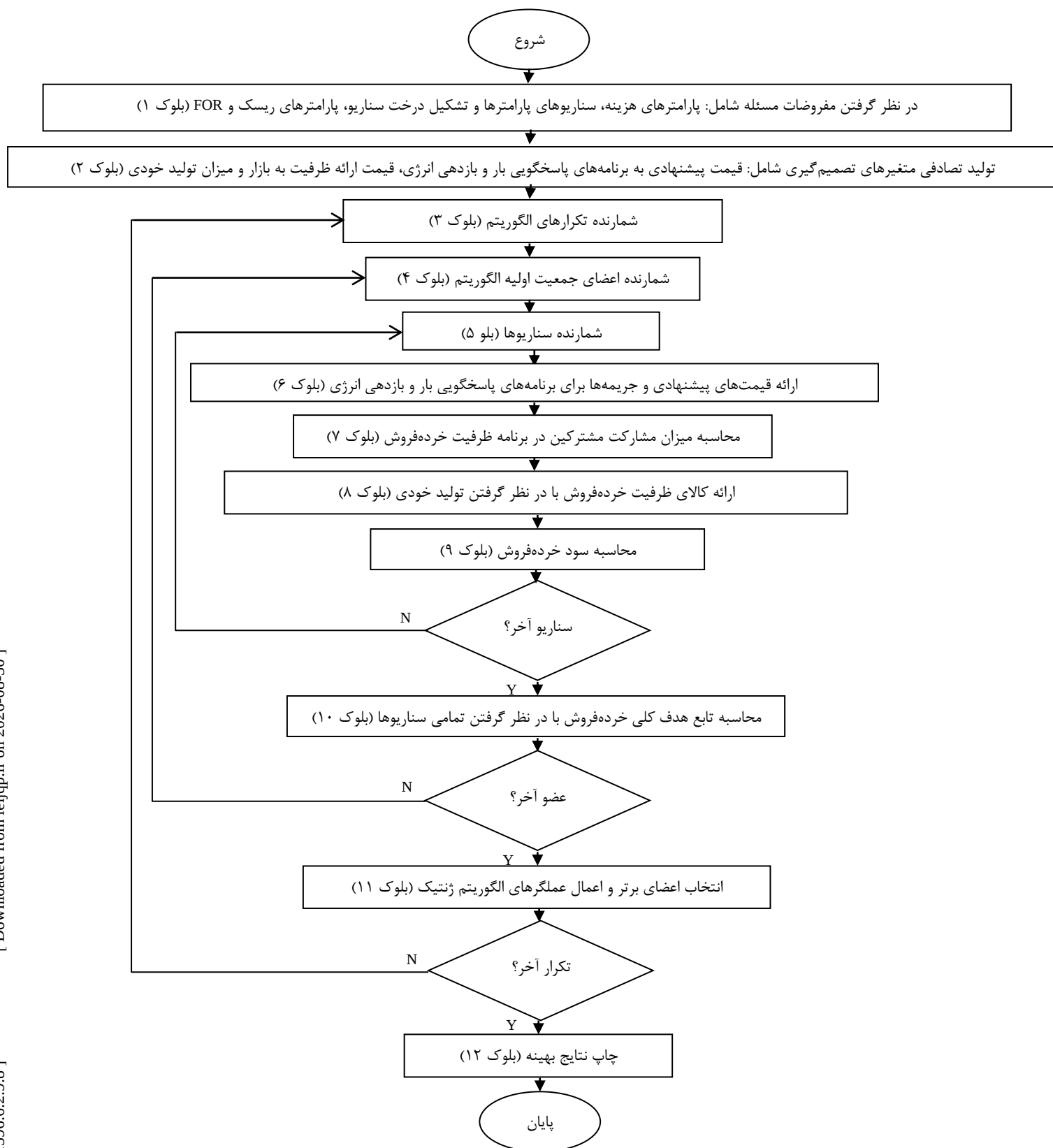
مدل ارائه شده در این مقاله، مدل رفتار خرده فروش به منظور مشارکت در بازار ظرفیت است. خرده فروش با ارائه کالای ظرفیت خود (که ترکیبی از منابع پاسخگویی بار، بازدهی انرژی و تولید خودی است) به بازار ظرفیت از یکسو و تامین ظرفیت مورد نیاز مشترکین در سوی دیگر سعی در ماکزیمم سازی سود خود دارد. در سمت اول بازار تعامل خرده فروش به منظور خرید ظرفیت از مشترکین و فروش آن در بازار ظرفیت مد نظر قرار گرفته و در سمت دوم بازار خرید ظرفیت از بازار ظرفیت و فروش آن به مشترکین به منظور تامین ظرفیت مورد نیاز آنها مدل سازی شده است. از آنجا که مدل سازی از دید خرده فروش انجام شده، پارامترهایی که از نگاه او دارای عدم قطعیت هستند، به دو دسته تقسیم بندی شده‌اند. دسته اول با فرمول بندی (بخش ۲-۲-۲) و دسته دوم با روش سناریو بندی مدل شده‌اند.

۴-۱- سناریو بندی

برای مدل سازی عدم قطعیت برخی پارامترهای مسئله از روش سناریو بندی استفاده شده است. اولین پارامتری که عدم قطعیت آن با استفاده از این روش مدل شده، قیمت بازار ظرفیت است. خرده فروش با توجه به قیمت های احتمالی بازار ظرفیت، برای کالای ظرفیت خود قیمت های مختلفی را پیشنهاد می کند. پارامتر دوم قیمت بازار روز فروش است. در صورتیکه خرده فروش نتواند در سال تحویل به تعهدات خود عمل کند از طرف بهره بردار سیستم جریمه خواهد شد. بیشترین قیمت بازار روز فروش در فصل فراخوانی، به عنوان جریمه خرده فروش در نظر گرفته خواهد شد [۳۲]. دما پارامتر سوم دارای عدم قطعیت است. عدم پاسخگویی به تعهدات پاسخگویی بار و بازدهی انرژی توسط مشترکین نیز دو پارامتر دیگری هستند که با استفاده از این روش مدل شده‌اند.

۴-۲- روندنمای حل مسئله

روندنمای حل مسئله در شکل (۳) آورده شده است. به منظور انتخاب بهینه متغیرهای تصمیم گیری با هدف ماکزیمم سازی سود خرده فروش از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در بلوک ۱ پارامترهای اولیه مسئله مورد مطالعه مقداردهی شده‌اند. این پارامترها همانطور که در شکل آورده شده شامل پارامترهای تولید خودی، برنامه پاسخگویی بار و بازدهی انرژی مشترک، پارامترهای ریسک و FOR خرده فروش است. همچنین سناریوهای پارامترهای دارای عدم قطعیت نیز تعیین و درخت سناریو تشکیل شده است. بلوک ۲ به تولید تصادفی متغیرهای تصمیم گیری خرده فروش پرداخته است. این متغیرها شامل قیمت پیشنهادی به برنامه های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی مشترکین، قیمت ارائه ظرفیت به بازار و میزان تولید خودی است. شمارنده های تکرارهای الگوریتم، اعضای جمعیت اولیه الگوریتم و سناریوها نیز به ترتیب در بلوک های ۳ تا ۵ آورده شده است. در بلوک ۶، قیمت ها و جریمه های پیشنهادی خرده فروش به مشترکین به منظور مشارکت در برنامه های پاسخگویی بار و بازدهی انرژی عرضه شده است. بر اساس پیشنهاد های ارائه شده و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت های مشارکت مشترکین در ارائه ظرفیت، کالای ظرفیت مشترکین در بلوک ۷ محاسبه شده است. در بلوک ۸، کالای ظرفیت خرده فروش به صورت ترکیبی از کالای ظرفیت مشترکین و تولید خودی خرده فروش به منظور مشارکت در بازار ظرفیت ارائه شده است.



شکل ۳. روندنمای حل مسئله

با در نظر گرفتن درآمدها و هزینه‌های خرده‌فروش از تعامل با ریسک، تابع هدف مسئله در بلوک ۹ محاسبه شده است. پس از چک مشترکین و بازار ظرفیت و همچنین در نظر گرفتن میزان شاخص کردن در نظر گرفتن تمامی سناریوها، تابع هدف کلی خرده‌فروش در

بلوک ۱۰ محاسبه شده است. روال بیان شده برای تمامی اعضای جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک انجام خواهد شد. پس از چک کردن عضو آخر الگوریتم، اعضای برتر انتخاب و سایر اعضا با استفاده از عملگرهای برش و جهش بهبود می یابند (بلوک ۱۱). در نهایت روال بیان شده به تعداد (تکرار) مشخصی انجام و بهترین عضو جمعیت به عنوان عضو بهینه انتخاب خواهد شد (بلوک ۱۲). این عضو شامل پیشنهاد های بهینه خرده فروش به مشترکین به منظور مشارکت آنها در ارائه ظرفیت، پیشنهاد قیمت خرده فروش به بازار ظرفیت و میزان تولید خودی بهینه خرده فروش است. این مقادیر به گونه ای انتخاب شده اند که بیشترین سود از تعامل با مشترکین و بازار ظرفیت را برای خرده فروش به دنبال داشته اند.

۵- مطالعه موردی

۵-۱- بیان اطلاعات مسئله

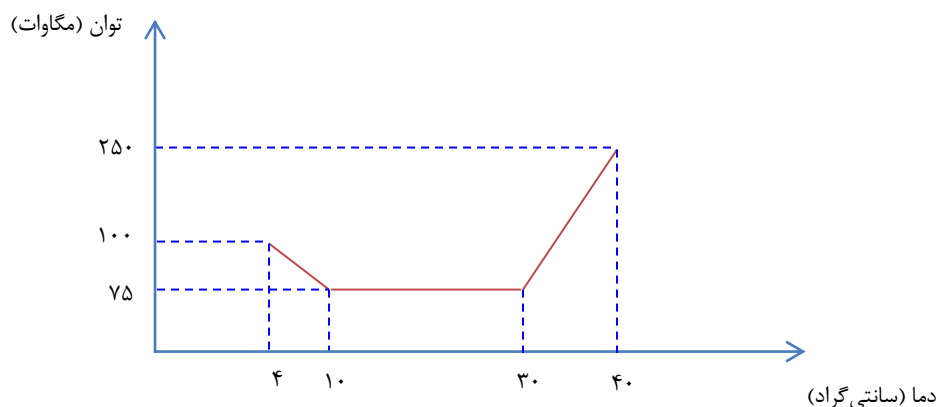
در این بخش مطالعات مربوط به مدل سازی خرده فروش و تعامل او با مشترکین و بازار ظرفیت با هدف ماکزیم سازی سود، انجام شده است.

جدول ۱. اطلاعات منابع مدیریت مصرف و تولید خودی [۱۱، ۱۹]

ارائه دهنده ظرفیت	ماکزیم میزان مشارکت (مگاوات)	IC _{DR} (دلار بر مگاوات روز)	ارائه دهنده ظرفیت	ماکزیم میزان مشارکت (مگاوات)	IC _{EE} (دلار بر مگاوات روز)
DR1	۱۰	۱۵/۲۲	EE1	۲۰	۱۲/۶
DR2	۸	۱۵/۲۵	EE2	۱۶	۱۶/۱
DR3	۹	۴۰/۱۵	EE3	۱۸	۲۶/۴
DR4	۲۳	۱۸/۴۱	EE4	۴۶	۳۳/۷
DR5	۹	۳۵/۳۵	EE5	۱۸	۴۳/۱۹
DR6	۹	۱۸/۲۷	EE6	۱۸	۷۰/۷
DR7	۱۲	۲۰/۵۴	EE7	۲۴	۹۰/۳
ارائه دهنده ظرفیت	ماکزیم میزان مشارکت (مگاوات)	پارامترهای توابع هزینه [Ai-Bi]	FOR		
تولید خودی خرده فروش	۴۰	[۰/۰۰۷۵ - ۱۴/۱۴۰]	۰/۰۲		

جدول ۲. اطلاعات سناریو بندی پارامترهای دارای عدم قطعیت [۳۷]

سناریوهای عدم پاسخگویی به تعهدات EE توسط مشترکین	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوهای قیمت بازار روز قروش	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم
درصد عدم عمل به تعهد (از مشارکت کل)	۰	۲۰	۴۰	قیمت (دلار بر مگاوات روز)	۱۰۵	۱۱۸	۱۵۵
احتمال	۰/۲	۰/۳	۰/۵	احتمال	۰/۲	۰/۳	۰/۵
سناریوهای عدم پاسخگویی به تعهدات DR توسط مشترکین	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوهای قیمت بازار ظرفیت	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم
درصد عدم عمل به تعهد (از مشارکت کل)	۰	۱۰	۲۰	قیمت (دلار بر مگاوات روز)	۱۲۰	۱۳۰	۱۷۰
احتمال	۰/۶	۰/۳۵	۰/۱۵	احتمال	۰/۲	۰/۳	۰/۵
سناریوهای تغییرات دما در سال تعهد نسبت به زمان مشارکت	سناریوی اول			سناریوی دوم			سناریوی سوم
تغییرات دما (سانتیگراد)	-۱			۰			۱
احتمال	۰/۲			۰/۳			۰/۵



شکل ۴. نمودار مصرف- دما در مطالعه موردی

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی‌ها

توجه به اینکه مقدار کل بار این شبکه ۱۲۵۰ مگاوات بوده و مقدار کلای ظرفیت خرده‌فروش در مقابل کل بار این شبکه بسیار بزرگ است، به صورت مجزا به کاهش شاخص قدرت بازار در اثر مدیریت مصرف در این شبکه پرداخته شده است. نتایج این ارزیابی در جدول (۵) ارائه شده است. در این جدول، مکان بهینه حضور منابع مدیریت مصرف و تاثیر حضور آنها در کاهش شاخص قدرت بازار تعیین شده است. شبکه ۵۷ شین استاندارد IEEE دارای ۴۲ شین بار است. بنابراین ۴۲ مکان به منظور بکارگیری منابع مدیریت مصرف در شبکه وجود دارد.

همانطور که در جدول (۵) بیان شده است، با حضور منابع مدیریت مصرف در ارائه کلای ظرفیت، رقابت افزایش و شاخص قدرت بازار در شبکه کاهش یافته است. مکان بهینه این منابع در هر یک از شبیه‌سازی‌ها تعیین و میزان بهبود شاخص قدرت بازار نیز مشخص شده است. مقدار شاخص مد نظر تا حضور ۱۰ خرده‌فروش کاهش یافته و حضور تعداد بیشتر خرده‌فروشان تاثیری بر آن نداشته است. به عبارت دیگر با حضور ۱۰ خرده‌فروش در شبکه، رقابت به حد قابل قبولی ارتقا یافته و افزایش بیشتر رقابت نیازمند حضور چندین خرده‌فروش در هر یک از شین‌های شبکه است. نتایج جدول (۵) بازی قابلیت حضور تنها یک خرده‌فروش در هر شین حاصل شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها بازی مقادیر دیگر β در جداول (۶) و (۷) ارائه شده است.

نتایج شبیه‌سازی‌ها در این بخش گزارش شده است. از آنجا بهره‌مندی تمامی بازیگران مرتبط با هر سیاست لازمه پایدار ماندن آن سیاست است، نتایج مرتبط با سه بخش مشترکین، خرده‌فروش و ISO^{13} ارائه شده تا کارایی ایده مقاله به اثبات رسد. به این منظور با در نظر گرفتن ۴ حالت مختلف برای β ، متوسط تابع سود، شاخص ریسک و تابع هدف از دید خرده‌فروش، متوسط تابع سود و میزان مشارکت در دو حالت برنامه پاسخگویی بار و بازدهی انرژی از دید مشترکین و کاهش میزان آلودگی‌های زیست‌محیطی و قدرت بازار از دید ISO محاسبه شده است. روابط مربوط به میزان آلودگی‌های زیست‌محیطی و شاخص ظرفیت اجبارا در مدار (شاخص قدرت بازار) به ترتیب در مراجع [۳۴] و [۳۵] آورده شده است. ابتدا نتایج اجرای شبیه‌سازی‌ها از نگاه خرده‌فروش در جدول (۳) و سپس از نگاه مشترکین در جدول (۴) آورده شده است.

به منظور ارزیابی منافع ISO ابتدا میزان کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی در اثر مشارکت خرده‌فروش در بازار ظرفیت محاسبه شده است. همانطور که از نتایج جداول (۳) و (۴) مشخص است میزان کلای ظرفیت خرده‌فروش در بازار ظرفیت برابر با $222/7264$ مگاوات است. از آنجا که در صورت عدم مشارکت خرده‌فروش، ژنراتورها این میزان ظرفیت را ارائه می‌دهند، سبب ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شوند. با در نظر گرفتن ضرایب $0/00470$ $(\text{Ton}/\text{MW}^2\text{h})$ ، $0/39864$ (Ton/MWh) و $36/00012$ (Ton/h) به منظور محاسبه میزان آلودگی [۳۴]، میزان آلودگی کاهش یافته برابر با $180/3654$ (Ton/h) خواهد بود. به منظور محاسبه کاهش قدرت بازار نیز، شبکه ۵۷ شین استاندارد IEEE در نظر گرفته شده است [۳۶]. میزان شاخص ظرفیت اجبارا در مدار در این شبکه برابر با $0/2674$ پریونیت است. با

¹³ Independent System Operator

جدول ۳: نتایج اجرای شبیه سازی ها در حالت $\beta = 0$ از نگاه خرده فروش

پیشنهاد قیمت بهینه برای مشارکت برنامه پاسخگویی بار (دلار بر مگاوات روز)	پیشنهاد قیمت بهینه برای مشارکت برنامه بازرهی انرژی (دلار بر مگاوات روز)	قیمت بهینه برای ارائه به بازار ظرفیت (دلار بر مگاوات روز)	مشارکت بهینه تولید خودی (مگاوات)
۴۶	۹۰	۱۱۶	۴۰
تابع هدف (دلار بر روز)	شاخص VaR (دلار بر روز)	شاخص CVaR (دلار بر روز)	سود متوسط (دلار بر روز)
۳۱۱۰۶	۲۶۴۲۹	۲۵۰۳۲	۳۱۱۰۶

جدول ۴: نتایج اجرای شبیه سازی ها در حالت $\beta = 0$ از نگاه مشترکین

مشترکین	مشترک اول	مشترک دوم	مشترک سوم	مشترک چهارم	مشترک پنجم	مشترک ششم	مشترک هفتم
میزان مشارکت در برنامه پاسخگویی بار (مگاوات)	۷/۳۹۹۴	۵/۹۱۸۶	۵/۶۷۶۷	۱۶/۷۲۷۷	۵/۸۷۱۵	۶/۵۵۰۶	۸/۶۲۶۱
میزان مشارکت در برنامه بازرهی انرژی (مگاوات)	۱۷/۸۲۲۵	۱۴/۱۱۱۰	۱۵/۳۳۹۵	۳۸/۱۵۰۸	۱۴/۳۷۹۷	۱۲/۴۶۰۰	۱۴/۴۹۲۳
سود متوسط (دلار بر روز)	۱۲۶۹/۹	۱۰۰۷/۵	۱۰۶۴/۵	۲۷۴۶/۱	۱۰۱۶/۷	۹۳۴/۸	۱۱۲۴/۴

جدول ۵: نتایج بکارگیری منابع مدیریت مصرف (خرده فروشان) در کاهش شاخص قدرت بازار در شبکه

تعداد خرده فروش جایابی شده	شین های بهینه به منظور بکارگیری	میزان شاخص ظرفیت اجبارا در مدار	تعداد خرده فروش جایابی شده	شین های بهینه به منظور بکارگیری	میزان شاخص ظرفیت اجبارا در مدار
۰	-	۰/۲۶۷۴	۸	شین های ۰.۱، ۰.۶، ۰.۹، ۰.۱۲، ۱۳، ۱۶	۰/۲۴۷۱
۱	شین ۱۲	۰/۲۵۹۷	۹	شین های ۰.۱، ۰.۶، ۰.۹، ۰.۱۲، ۳۷، ۳، ۱۶	۰/۲۴۶۴
۲	شین های ۸، ۱۲	۰/۲۵۳۱	۱۰	شین های ۰.۱، ۰.۶، ۰.۹، ۰.۱۲، ۱۳، ۴۷، ۳، ۱۶	۰/۲۴۶۱
۳	شین های ۱۷، ۸، ۱۲	۰/۲۵۲۴	۰	۰	۰
۴	شین های ۹، ۲۷، ۸، ۱۲	۰/۲۵۰۷	۰	۰	۰
۵	شین های ۱، ۹، ۳، ۸، ۱۲	۰/۲۴۸۸	۰	۰	۰
۶	شین های ۰.۱، ۹، ۶، ۸، ۱۲، ۵۰	۰/۲۴۸۳	۰	۰	۰
۷	شین های ۰.۱، ۹، ۶، ۸، ۱۲، ۱۶، ۱۳	۰/۲۴۷۹	۴۲	شین های ۰.۱، ۹، ۶، ۸، ۱۲، ۱۳، ۴۷، ۳، ۱۶	۰/۲۴۶۱

جدول ۶: نتایج اجرای شبیه سازی ها در حالت $\beta \in \{0.5, 0.8, 1\}$ از نگاه خرده فروش

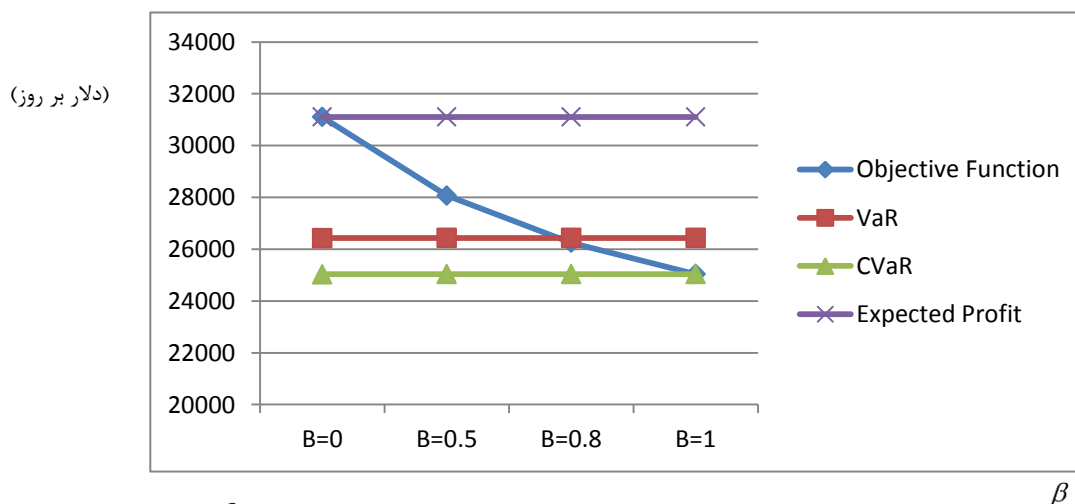
پیشنهاد قیمت بهینه برای مشارکت برنامه پاسخگویی بار (دلار بر مگاوات روز)	پیشنهاد قیمت بهینه برای مشارکت برنامه بازرهی انرژی (دلار بر مگاوات روز)	قیمت بهینه برای ارائه به بازار ظرفیت (دلار بر مگاوات روز)	مشارکت بهینه تولید خودی (مگاوات)
۴۸	۹۰	۱۵۱	۴۰
تابع هدف (دلار بر روز)	شاخص VaR (دلار بر روز)	شاخص CVaR (دلار بر روز)	سود متوسط (دلار بر روز)
۲۸۰۷۰	۲۶۴۳۳	۲۵۰۳۵	۳۱۱۰۵
پیشنهاد قیمت بهینه برای مشارکت برنامه پاسخگویی بار (دلار بر مگاوات روز)	پیشنهاد قیمت بهینه برای مشارکت برنامه بازرهی انرژی (دلار بر مگاوات روز)	قیمت بهینه برای ارائه به بازار ظرفیت (دلار بر مگاوات روز)	مشارکت بهینه تولید خودی (مگاوات)
۴۹	۹۰	۱۱۳	۴۰
تابع هدف (دلار بر روز)	شاخص VaR (دلار بر روز)	شاخص CVaR (دلار بر روز)	سود متوسط (دلار بر روز)
۲۶۲۴۹	۲۶۴۳۴	۲۵۰۳۶	۳۱۱۰۵
پیشنهاد قیمت بهینه برای مشارکت برنامه پاسخگویی بار (دلار بر مگاوات روز)	پیشنهاد قیمت بهینه برای مشارکت برنامه بازرهی انرژی (دلار بر مگاوات روز)	قیمت بهینه برای ارائه به بازار ظرفیت (دلار بر مگاوات روز)	مشارکت بهینه تولید خودی (مگاوات)
۴۹	۹۰	۹۷	۴۰
تابع هدف (دلار بر روز)	شاخص VaR (دلار بر روز)	شاخص CVaR (دلار بر روز)	سود متوسط (دلار بر روز)
۲۵۰۳۶	۲۶۴۳۴	۲۵۰۳۶	۳۱۱۰۴

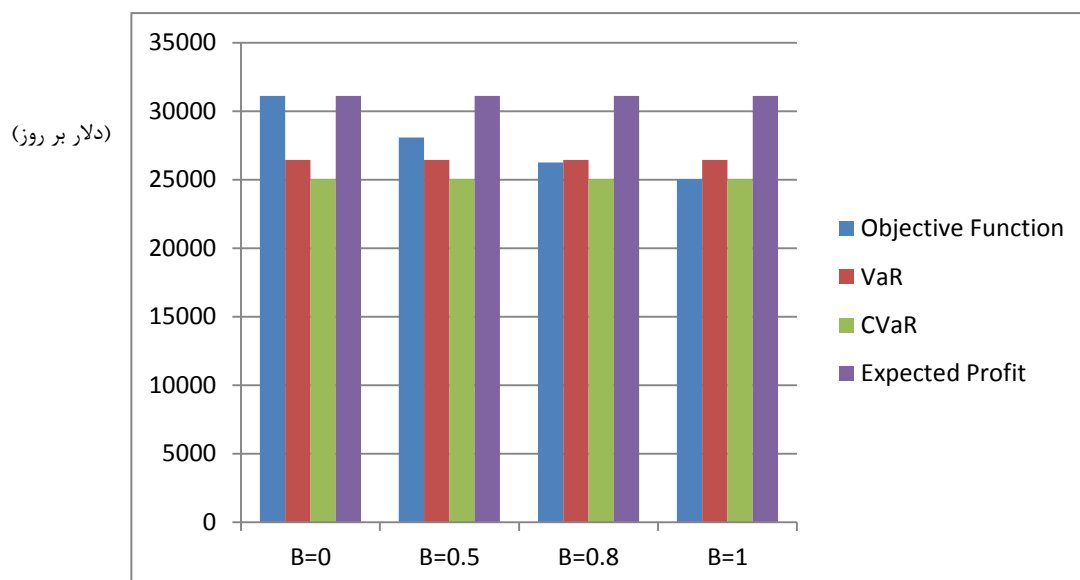
جدول ۷: نتایج اجرای شبیه‌سازی‌ها در حالت $\beta \in \{0.5, 0.8, 1\}$ از نگاه مشترکین

$\beta = 0.5$	مشترکین	مشترک اول	مشترک دوم	مشترک سوم	مشترک چهارم	مشترک پنجم	مشترک ششم	مشترک هفتم
	میزان مشارکت در برنامه پاسخگویی بار (مگاوات)	۷/۴۶۹۲	۵/۹۷۴۴	۵/۷۴۸۱	۱۶/۸۸۸۲	۵/۹۴۲۹	۶/۶۱۳۴	۸/۷۰۹۹
	میزان مشارکت در برنامه بازدهی انرژی (مگاوات)	۱۷/۸۲۲۵	۱۴/۱۱۱۰	۱۵/۳۳۹۵	۳۸/۱۵۰۸	۱۴/۳۷۹۷	۱۲/۴۶۰۰	۱۴/۴۹۲۳
$\beta = 0.8$	سود متوسط (دلار بر روز)	۱۲۸۵/۸	۱۰۲۰/۲	۱۰۷۷/۴	۲۷۸۲/۰	۱۰۲۹/۹	۹۴۸/۹	۱۱۴۳/۰
	میزان مشارکت در برنامه پاسخگویی بار (مگاوات)	۷/۴۹۶۳	۵/۹۹۶۱	۵/۷۷۵۹	۱۶/۹۵۰۶	۵/۹۷۰۷	۶/۶۳۷۸	۸/۷۴۲۴
	میزان مشارکت در برنامه بازدهی انرژی (مگاوات)	۱۷/۸۲۲۵	۱۴/۱۱۱۰	۱۵/۳۳۹۵	۳۸/۱۵۰۸	۱۴/۳۷۹۷	۱۲/۴۶۰۰	۱۴/۴۹۲۳
$\beta = 1$	سود متوسط (دلار بر روز)	۱۲۹۲/۰	۱۰۲۵/۲	۱۰۸۲/۵	۲۷۹۶/۲	۱۰۳۵/۲	۹۵۴/۴	۱۱۵۰/۳
	میزان مشارکت در برنامه پاسخگویی بار (مگاوات)	۷/۵۰۴۱	۶/۰۰۲۳	۵/۷۸۳۸	۱۶/۹۶۸۴	۵/۹۷۸۶	۶/۶۴۴۸	۸/۷۵۱۷
	میزان مشارکت در برنامه بازدهی انرژی (مگاوات)	۱۷/۸۲۲۵	۱۴/۱۱۱۰	۱۵/۳۳۹۵	۳۸/۱۵۰۸	۱۴/۳۷۹۷	۱۲/۴۶۰۰	۱۴/۴۹۲۳
$\beta = 1$	سود متوسط (دلار بر روز)	۱۲۹۳/۸	۱۰۲۶/۶	۱۰۸۴/۰	۲۸۰۰/۲	۱۰۳۶/۶	۹۵۶/۰	۱۱۵۲/۴

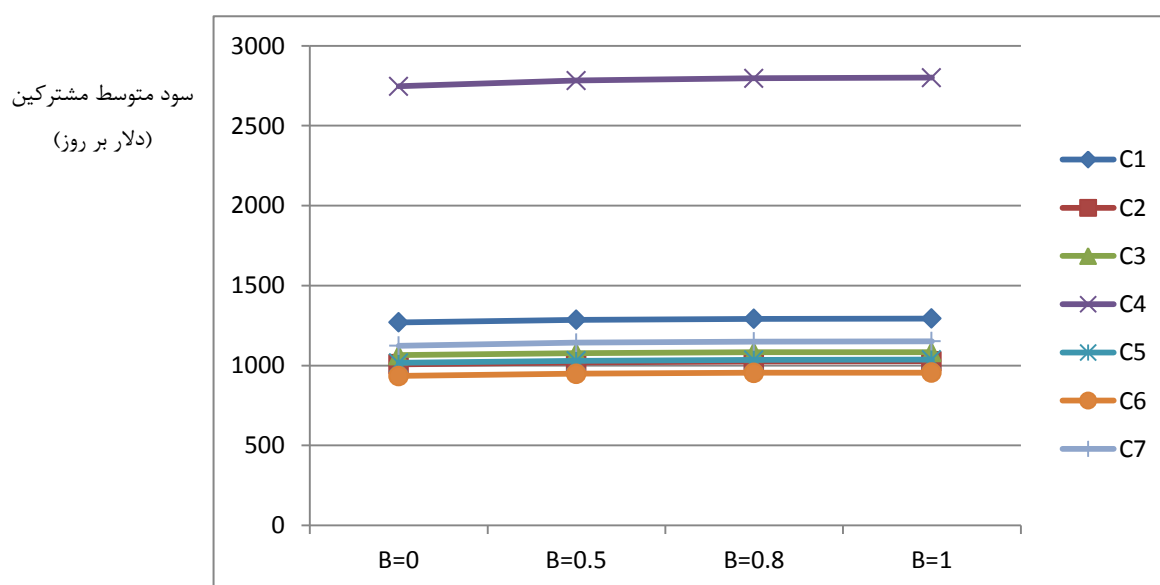
شکل (۵) به صورت خطی و شکل (۶) به صورت میله‌ای نتایج را نشان داده‌اند. نتایج این دو شکل شامل تابع هدف خرده‌فروش، متوسط سود او و شاخص‌های در نظر گرفتن ریسک VaR و CVaR برای خرده‌فروش است. این شاخص‌ها برای مقادیر متفاوت β نمایش داده شده‌اند. هر چه مقدار پارامتر β افزایش یابد نشان می‌دهد که خرده‌فروش مدنظر محتاط‌تر بوده و قابلیت ریسک او کمتر است. چنین نتایجی برای مشترکین نیز در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.

مقادیر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی برای پارامتر β برابر ۰/۵، ۰/۸ و ۱ به ترتیب برابر ۱۸۱/۷۲۳۱، ۱۸۱/۳۴۲۵ و ۱۸۱/۸۳۳۶ (Ton/h) به دست آمد. تاثیر حضور خرده‌فروشان بر کاهش شاخص ظرفیت اجبارا در مدار نیز همانطور که پیش از این بیان شد، همانند جدول (۵) است. شکل‌های (۵) و (۶) شاخص‌های مد نظر خرده‌فروش و شکل‌های (۷) و (۸) شاخص‌های مد نظر مشترکین را برای حالات مختلف β را مقایسه کرده‌اند. شکل‌های (۵) و (۶) نتایج مشابهی را نشان داده‌اند. تنها تفاوت این دو شکل در نحوه نمایش نتایج است.

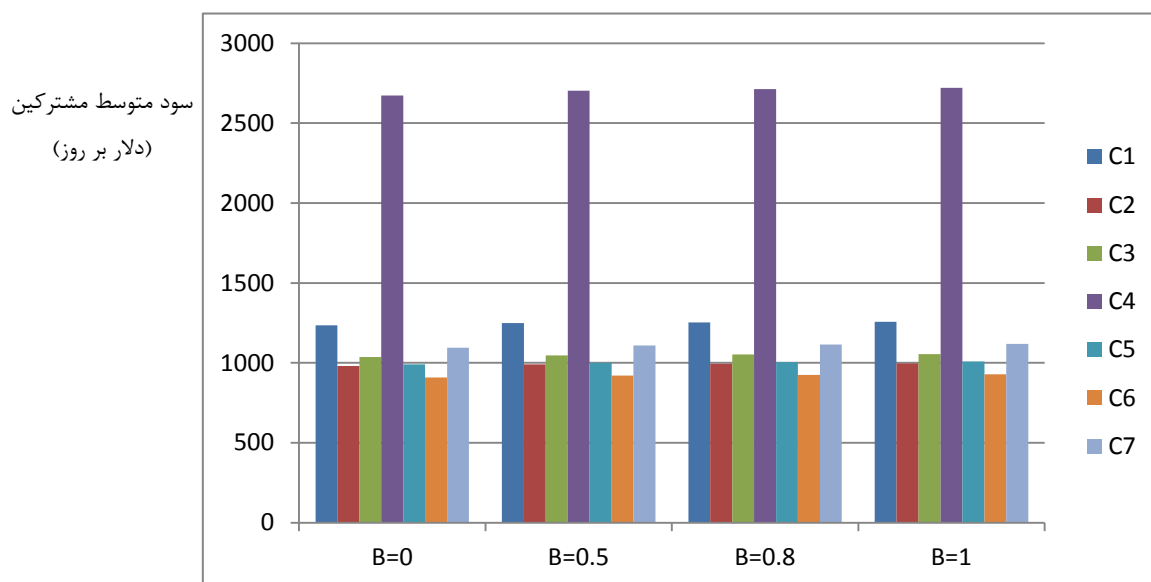
شکل ۵. نمودار مقایسه شاخص‌های مد نظر خرده‌فروش برای مقادیر متفاوت β



شکل ۶. نمودار میله‌ای شاخص‌های مد نظر خرده‌فروش بازاری مقادیر متفاوت β



شکل ۷. نمودار مقایسه سود متوسط مشترکین بازاری مقادیر متفاوت β



شکل ۸. نمودار میله‌ای مقایسه سود متوسط مشترکین بازای مقادیر متفاوت β

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله بیان شد که کاراترین شکل بکارگیری منابع مدیریت مصرف در بازار ظرفیت، بکارگیری آنها توسط خرده‌فروشان است. همچنین بیان شد که به منظور بهره‌وری هر چه بیشتر حضور خرده‌فروشان در ارائه کالای ظرفیت، می‌بایست آنها در کنار ژنراتورها در یک حراج شرکت کرده و رقابت کنند. بنابراین ابتدا مدلی از کالای ظرفیت خرده‌فروش شامل مدل ظرفیت و عدم‌دسترس پذیری آن ارائه و سپس فرمول‌بندی مسئله با هدف ماکزیم‌سازی سود با در نظر گرفتن شاخص مناسب ریسک، به منظور مشارکت خرده‌فروش در بازار ظرفیت و تعامل او با مشترکین و بازار در هر دو سمت بازار توسعه یافت. در ادامه به منظور ارزیابی نتایج، چندین حالت مختلف برای شاخص β فرض و نتایج شبیه‌سازی‌ها در این حالات با یکدیگر مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تمامی بازیگران مرتبط با موضوع شامل مشترکین، خرده‌فروشان و ISO از ایده ارائه شده در این مقاله سود برده‌اند که این امر پایداری سیاست اتخاذ شده را به اثبات رسانده است.

مراجع

- [3] P. Ju, "Load modeling for wide area power system," Electric Power and Energy Systems, vol. 33, pp. 909-917, 2011.
- [4] M. Yi, "Research on Synthesis Load Modeling with Online Statistical Measurement-Based Method" IEEE Conference, pp. 674-677, 2011.
- [5] V. Mtembo, G. A. Taylor, A. Ekwue, "A novel econometric model for peak demand forecasting," International Universities Power Engineering Conference, pp. 1-6, 2014.
- [6] M. F. Hung, T. H. Huang, "Dynamic demand for residential electricity in Taiwan under seasonality and increasing block pricing," Energy Economics, vol. 48, p. 168-177, 2015.
- [7] N. Li, L. Chen, M. A. Dahleh, "Demand response using linear supply function bidding," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, pp. 1827-1838, 2015.
- [8] H. Safamehr, A. R. Kian, "A cost-efficient and reliable energy management of a micro-grid using intelligent demand response program," Energy, vol. 91, pp. 283-293, 2015.
- [9] H.A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, G.R. Yousefi, "Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs," Applied Energy, vol. 87, pp. 243-250, 2010.
- [10] H.A. Aalami, M. Parsa Moghaddam, G.R. Yousefi, "Evaluation of nonlinear models for time-based rates demand response programs," Electrical Power and Energy Systems, vol. 65, pp. 282-290, 2015.
- [11] A. Ghaderi, M. Parsa Moghaddam, M. K. Sheikh-El Eslami, "Energy efficiency resource modeling in generation expansion planning," Energy, vol. 68, pp. 529-537, 2014.
- [12] D. Hurley, P. Peterson, M. Whited, "Demand response as a power system resource," The Regulatory Assistance Project (RAP), pp. 1-76, 2013. Available: www.raponline.org/document/id/6597.

- [1] J. C. Lee, "Load representation for dynamic performance analysis," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 8, pp. 472-482, 1993.
- [2] P. Ju, "Load Modeling in China -- Research, Applications & Tendencies," IEEE Conference, 2008.

- [26] C. C. Lee, Y. B. Chiu, "Electricity demand elasticities and temperature: Evidence from panel smooth transition regression with instrumental variable approach," *Energy Economics*, vol. 33, pp. 896-902, 2011.
- [27] G. H. Chen, T. T. Lie, "the impact of climate change on new Zealand's electricity demand," *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power System*, pp. 808-813, 2010.
- [28] M. Hekkenberg, R. M. J. Benders, et. al., "Indications for a changing electricity demand pattern: The temperature dependence of electricity demand in the Netherlands," *Energy Policy*, vol. 37, pp. 1542-1551, 2009.
- [29] B. Psiloglou, C. Giannakopoulos, S. Majithia, M. Petrakis, "Factors affecting electricity demand in Athens Greece and London, UK: a comparative assessment," *Energy*, vol. 34, pp. 1855-1863, 2009.
- [30] C. L. Hor, S. J. Watson, S. Majithia, "Analyzing the impact of weather variables on monthly electricity demand," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 2078-2085, 2005.
- [31] A. J. Conejo, M. Carrion, J. M. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets* New York: Springer, 2010.
- [32] Daily day-ahead LMP, 2014. Available: www.pjm.com/markets-and-operations/energy/day-ahead/lmpda.aspx.
- [33] R. Nesaee Kalati, M. K. Sheikh-El-Eslami, "Determination of DSM strategy to participate in the capacity market (in Persian)," M. S. Thesis, Tarbiat Modares University, 2015.
- [34] A. Abdollahi, M. Parsa Moghaddam, M. Rashidinejad, M. K. Sheikh-El-Eslami, "Investigation of economic and environmental-driven demand response measures incorporating UC," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 12-25, 2012.
- [35] P. Wang, Y. Xiao, Y. Ding, "Nodal Market Power Assessment in Electricity Markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 1373-1379, 2004.
- [36] University of Washington Electrical Engineering, <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [13] R. McNamara, M. Rudd, "Energy bill: demand side response and the capacity market in focus," *An Initial Report by Smart grid GB*, pp. 1-32, 2013.
- [14] "Retail electricity consumer opportunities for demand response in PJM's wholesale markets" PJM, 2012. Available: www.pjm.com/markets-and-operations/demand-response.aspx.
- [15] Y. Xiao, Q. Su, B. C. Chiu, J. Bastian, A. Angle, "Demand response modeling in PJM capacity market," *IEEE General Meeting on Power and Energy Society*, pp. 1-7, 2012.
- [16] Y. Xiao, Y. Y. Lee, F. S. Bresler, J. Bastian, A. Angle, "Integration of demand response into PJM capacity market incremental auction," *IEEE General Meeting on Power and Energy Society*, pp. 1-5, 2013.
- [17] "Load management performance report 2011/2012" PJM, 2011. Available: www.pjm.com/~media/markets-ops/dsr/load-management-performance-report-2011-2012.ashx.
- [18] C. Neme, R. Cowart, "Energy efficiency participation in electricity capacity markets-The US experience," *The Regulatory Assistance Project (RAP)*, pp. 1-22, 2014. Available: www.raponline.org/document/download/id/7303.
- [19] H. G. Kwag, J. Kim, "Optimal combined scheduling of generation and demand response with demand resource constraints," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 161-170, 2012.
- [20] M. D. Felice, A. Alessandri, F. Catalano, "Seasonal climate forecasts for medium term electricity demand forecasting," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 435-444, 2015.
- [21] C. Yan, W. X. Xue, S. Wang, B. Cui, "A novel air-conditioning system for proactive power demand response to smart grid," *Energy Conversion and Management*, vol. 102, pp. 239-246, 2015.
- [22] Z. Sun, L. Li, F. Dababneh, "Plant-level electricity demand response for combined manufacturing system and heating, venting, and air-conditioning (HVAC) system," *Journal of Cleaner Production*, vol. xxx, pp. 1-8, 2016.
- [23] J. M. Carcedo, J. P. Garcia, "Temperature effects on firms' electricity demand: An analysis of sectorial differences in Spain," *Applied Energy*, vol. 142, pp. 407-425, 2015.
- [24] C. L. Hor, S. J. Watson, S. Majithia, "Analyzing the impact of weather variables on monthly electricity demand," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 2078-2085, 2005.
- [25] C. Christy, Y. Zhu, "The application of simple thermal models to improve dynamic load models," *International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, pp. 1-5, 2013.