مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۱۲-۱

بهره‌برداری تاب‌آور، رفاهی و اقتصادی نانوشبکه هوشمند

سعید باقری[۱]، حسین طالبی[۲]، علیرضا فریدونیان[۳]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، s.bagheri@mail.kntu.ac.ir

[۲] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، htalebi@mail.kntu.ac.ir

[۳] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ، fereidunian@eetd.kntu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵ ویرایش: ۱۳۹۶/۱۱/۳ پذیرش:۱۳۹۷/۱/۲۱

چکیده: امروزه، بدلیل مشکلات تولید انرژی، هزینه زیاد و آلودگی محیط زیست، مدیریت مصرف انرژی الکتریکی از مسایل اصلی پژوهشی دنیا شده است. با پیشرفت شبکه هوشمند، وجود یک سیستم یکپارچه، دقیق و سریع می‌تواند هم رضایت ساکنین را برآورده سازد، و نیز کاهش هزینه را دربر داشته باشد و حالات بهینه عملکرد وسایل را تعیین کند. مفهوم تاب‌آوری برای کاهش قطعی‌های بارهای حساس معرفی شده است. در این پژوهش، یک نانوشبکه نمونه با چندین نوع وسایل متفاوت شامل منابع تولید پراکنده، ذخیره‌ساز و خودرو برقی، ونیز وسایل مصرف‌کننده انرژی در نظر گرفته شده است. کارآرایی روش پیشنهادی با زمانبندی دقیق عملکرد وسایل، درنظرگیری آسایش ساکنین و یافتن حالات بهینه عملکرد و نیز حضور نایقینی‌ها و سناریوسازی‌های دقیق‌تر نشان داده شده است. همچنین، در بخش اصلی پژوهش، تفاوت میان دو حالت درنظرگیری تاب‌آوری و درنظر نگرفتن آن نیز لحاظ شده است و نتایج حاصل با هم مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: نانوشبکه، خانه هوشمند، مدیریت انرژی ، تاب‌آوری، بهینه سازی هزینه، نایقینی، ابرمکعب لاتین، تولید پراکنده.

Resilient, Comfort and Economic Operation of Smart Nanogrid

Saeed Bagheri and Hossein Talebi, Alireza Fereidunian

Abstract: Nowadays, the management of power consumption has been one of the main concerns for researchers, because of energy generation problems, high cost and environment pollutions. An integrated, fast and accurate system can earn satisfaction of occupants and also cost reduction. Some loads are very vulnerable to natural disasters, thus this interruptions are costly for customers. The resiliency concept is introduced accordingly. The model presented in this research is a Nanogrid, equipped with DGs, batteries and electric vehicle, and power consumer. This research devotes an effort to optimize household energy cost, occupants comfort and Nanogrid resiliency with optimal scheduling of all elements considering uncertainty of distributed energy. If needed, utility can reduce potential peaks occurrence in grid, too. Finally, the performance of the method is discussed by simulation on a typical model. Simulation results under different pricing and weather modes, show effectiveness of proposed model on reducing the quantities of each considered cost functions.

Keywords: Nanogrid, Resilience, energy management, renewable energy sources, uncertainty, stochastic programming.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

شرح اختصار

روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین	LHS
برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	MILP
سیستم مدیریت انرژی خبره	EEMS
قیمت‌گذاری بلادرنگ	RTP
وضعیت شارژ (میزان انرژی ذخیره شده)	SOC
خودروی الکتریکی	PEV
بهینه سازی ازدحام ذرات	PSO
نرخ زمان تأخیر	DTR
انتظار انرژی تأمین نشده	EENS

شرح علامت

مقدار آستانه پیک تقاضا از شبکه	$P_{\text{thr.}}^{peak}$
طول بازه‌ی زمانی	δ
قیمت هر کیلووات ساعت انرژی دریافتی از شبکه بیش‌تر از مقدار آستانه	pdP
میانگین سرعت باد	v_{aw}،v_m
سرعت کات‌این و کات‌آف	v_{co} ، v_{ci}
سرعت نامی و سرعت اعمال شده به توربین بادی	v_{aw} ، v_r
توان خروجی توربین بادی به ازای سرعت باد v	$P_w(v)$
توان خروجی فتوولتائیک به ازای تابش si	$P_{PV}(si)$
بازده سلول های خورشیدی	η^{PV}
مساحت کل فتوولتائیک	S^{PV}
توان نامی توربین بادی	P_{rated}
بازده شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی	η_{PEV}^{ch} ، η_{PEV}^{dch}
انرژی ذخیره شده در خودروی الکتریکی در بازه tام	SOC_t^{PEV}
توان شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی در بازه زمانی tام	$P_t^{PEV,ch}$ $P_t^{PEV,dch}$
توان شارژ/دشارژ خودروی الکتریکی	P_t^{PEV}
توان مصرفی خودروی الکتریکی توسط لوازم خانگی غیر قابل کنترل زمانی در بازه tام	$P_t^{demand.non_sch}$
بازه زمانی آغاز به کار وسیله jام	t_j^{start}
شاخص نشان دهنده هر وسیله	j
زودترین بازه زمانی آغاز به کار	t^{ESt}
دیرترین بازه زمانی پایان عملکرد	t^{LF}
تعداد بازه عملکرد وسیله بعد از آغاز به کار	t^{OD}
بازه زمانی پایان عملکرد وسیله jام	t_j^{finish}
متغیر باینری وضعیت عملکرد وسیله jام در بازه tام	$OS_{t,j}$
توان مصرفی وسیله jام در بازه زمانی tام	$P_{t,j}^{sch}$
کل توان مصرفی وسایل کنترل زمانی در بازه tام	$P_t^{demand.sch}$
نرخ زمان تأخیر وسیله jام	DTR_j
پارامتر تأخیر	ρ
دمای اتاق و هوای محیط در بازه زمانی tام	$\theta_t^{amb}, \theta_t^{room}$
دمای تنظیم سیستم سرمایش و گرمایش در بازه زمانی tام	$\theta_t^{set,heater}$ ، $\theta_t^{set,cooler}$
مقدار حاشیه ای دمای عملکرد و ثابت کاهش دما	$\theta_{cooler}^{g}, \theta_{margin}$
وضعیت عملکرد سیستم سرمایش در بازه زمانی tام	OS_t^{cooler}
ثابت ترمودینامیکی اتاق و ثابت تبادل گرمایی بین انسان و محیط	k_{human}, k_{th}^{room}
تعداد افراد حاضر در اتاق در بازه زمانی tام	$n_{\text{occupants}}(t)$
ضریب اثرگذاری دمایی سیستم سرمایش	$k_{cooler}^{eff.}$
توان دریافتی سیستم سرمایش در بازه زمانی tام	$P_t^{demand,cooler}$
توان الکتریکی مصرفی در سیستم سرمایش	P^{cooler}
تابع هزینه عملکرد نانوشبکه	NOC
هزینه نگهداری توربین بادی، سلول خورشیدی و باتری	m^{pv}, m^{batt}, m^{wt}
مسافت طی شده توسط خودرو برقی (کیلومتر)	$\text{D}_\text{t}^{\text{PEV}}$
انرژی مصرف شده در خودروی الکتریکی به ازای هر کیلومتر پیمایش	C_{PEV}
توان سلول‌های خورشیدی و توربین بادی طبق داده های پیش‌بینی	P_t^{pv}, P_t^{wt}
قیمت خرید و فروش برق از/ به شبکه	q_t, b_t
توان دریافتی و ارسالی از/ به شبکه بالادست در بازه t	$P_t^{grid,sell}$ $P_t^{grid,buy}$
شماره سناریو	s
توان خروجی از توربین بادی و سلول خورشیدی در بازه tام از سناریوی sام	$P_{s,t}^{pv}, P_{s,t}^{wt}$
احتمال سناریوی sام	π_s

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

۱- مقدمه

ساختمان‌های تجاری و مسکونی بیش از ۵۰٪ مصرف انرژی الکتریکی اروپا را به خود اختصاص می‌دهندکه عموما دارای بازده پایین می‌باشند. بر اساس مفهوم خانه‌های هوشمند، این واحدها را می‌توان به گره‌های یک شبکه هوشمند تبدیل کرد که بخش چشم‌گیری از انرژی مصرفی توسط انرژی‌های تجدیدپذیر، به صورت محلی در ریزشبکه خانه-ها تولید شده و تمامی تولیدکنندگان و مصرف کنندگان به صورت هوشمند مدیریت می‌گردند. با پیشرفت فناوری مخابرات و اطلاعات و نیز تکنولوژی ساخت، مفاهیم و فناوری‌های جامعی برای خانه‌های هوشمند اتخاذ شده است. با این روش، خانه‌های هوشمند یک مشتری فعال در نظر گرفته می‌شوند که با شبکه هوشمند در یک تعامل نزدیک با محیط محلی و سطح بالاتر شبکه هوشمند، مذاکره و همکاری می‌کنند. خانه‌های اخیرا توسعه یافته و وسایل برقی‌شان (گرم‌کننده‌ها، دستگاه تهویه هوا، تجهیزات سرگرمی، وسایل خانگی و ...)، راهبرد کنترل و ساختار شبکه موجب ارتقا بازده انرژی و بهبود مدیریت ریزشبکه برق محلی و شبکه دوردست از طریق مدیریت انرژی فعال سمت بار، و جمع آوری مقدار زیادی از منابع انرژی تجدیدپذیر پراکنده کم قدرت و در نتیجه کاهش چشمگیر استفاده از منابع سنتی، می‌گردد [۱]. خانه هوشمند، نمودی از یک نانوشبکه است. با توجه به تعاریف نانوشبکه و دستاوردهای اخیر در این زمینه، خانه‌های هوشمند یک سیستم مهم در اجزای شبکه می‌باشد. با توجه به اهمیت بحث تاب‌آوری و پیشرفت سیستم‌های خانه هوشمند، اگر بتوان یک نانوشبکه را در برابر رخداد خطا مقاوم کرد، ریزشبکه بالادست می‌تواند به اجزای دیگر شبکه خود برسد و توان را تامین کند. در بحث تاب‌آوری در خانه هوشمند، رخدادهای متفاوتی می‌تواند تاثیرگذار باشد. به دلیل قابلیت کارکرد حالت جزیره‌ای نانوشبکه، می‌توان نانوشبکه را یک بخش مناسب برای افزایش تاب‌آوری درنظر گرفت[۲].

امروزه با وجود تحقیقات و تکنولوژی‌های نوین در زمینه خانه هوشمند، ویژگی‌هایی به خانه هوشمند اضافه شده است که می‌توان به وسیله آن، زیرساخت‌های مناسب را برای سیستم‌های کنترلی به منظور پایش و کنترل مصرف انرژی فراهم آورد[۳]. همچنین مدیریت سمت تقاضا[1] که روشی برای بیشینه کردن سود برای تولیدکننده و مصرف کننده ارایه می‌دهد، که کیفیت انرژی[2] و پاسخگویی بار[3] اجزای اصلی این مفهوم هستند و با این دو قسمت می‌توان به دستاوردهای مورد نظر در مدیریت سمت تقاضا دست یافت که این دستاوردها شامل، پیک‌سایی، افزایش پایایی و کاهش هزینه می‌شود [۴].

پژوهش‌های مختلفی در زمینه تاب‌آوری و نانوشبکه انجام شده است که حتی در برخی موارد اسمی از تاب‌آوری به میان نیامده؛ اما در دل خود یک سیستم تاب‌آور ساخته شده و نتایج مفید آن بازگو شده است که همگی در حالات اضطرار بررسی شده‌اند.

در [۵] از یک مفهوم به عنوان "قابلیت باززیستی" استفاده شده است که از نظر مهندسی برق به معنای احتمال ادامه برق‌رسانی می‌باشد که خود نمودی از تاب‌آور کردن سیستم می‌باشد. این مفهوم وابسته به تولید، تقاضا، ساعت روز و مدت زمان قطعی است. روش برنامه‌ریزی به صورت تصادفی است. وضعیت شارژ (SOC) ، میزان حداقلی شارژ باقی‌مانده در باتری را نشان می‌دهد. استراتژی کنترلی آن تنها بر روی باتری است و به سه حالت در نظر گرفته شده است. حالت اول باتری تا آخرین لحظه دشارژ شود و شارژ آن تنها با تولید محلی باشد. در حالت دوم وقتی شبکه متصل است باتری هیچ‌گاه تا آخر دشارژ نشود و در حالت سوم یک SOC2 پایه برای حالت اضطراری تعیین شود که در صورت لزوم از SOC1 به SOC2 برود. در [۶] آنالیز تاثیر مدیریت انرژی در مواقع خروج تولید، در صورت اتصال خودرو به خانه هوشمند کار شده است. استراتژی استفاده شده مد عملکرد خفیف شده است. در حالت برقدار بودن سیستم کنترلی به صورت عادی کار می‌کند و خودرو اولویت شارژ را دارد. این پژوهش حالات قطع و برق و مدت زمان آن را اولویت قرار داده است. یعنی پس از قطعی برق بایک استراتژی خاص کار می‌کند تا از مرکز دلیل و زمان قطعی را دریافت کند. حال استراتژی‌های دیگر را بر اساس تخمین مدت زمان قطع برق اعمال می‌کند. ارزیابی تاب‌آوری نیز تنها به وسیله مقایسه حالت با خودرو برقی و بدون خودرو برقی انجام شده است. به گونه‌ای که با تحلیل نمودار توان، مشاهده می‌شود که مدت زمان و میزان توان برق‌رسانی در حالت جزیره‌ای با کمی حساسیت بهبود یافته است که این خود نمودی از تاب-آوری در نانوشبکه می‌باشد.

در [۷] یک مدل از سیستم مدیریت انرژی خانگی مطرح شده است که استراتژی مدیریتی را با هدف افزایش تاب‌آوری نشان می‌دهد.

در مرجع [۸] مسأله زمانبندی منابع انرژی ساختمان با بررسی یک ساختمان کم انرژی کاربردی مقایسه شده‌است. تابع هدف آن، کمینه‌کردن هزینه کلّی برق و گاز طبیعی هنگام عملکرد ساختمان در بازه‌های مختلف زمانی می‌باشد درحالی‌که قید تعادل انرژی و قیود عملکرد پیچیده وسایل و تجهیز تغذیه انرژی نیز رعایت می‌شوند. برنامه پاسخ‌گویی بار یک مسأله بهینه‌سازی چالش برانگیز است. به‌منظور حل این مسأله به‌طور مؤثر، یک رویه ابتکاری در [۹] برای دستیابی به راه‌حلی نزدیک به بهینه با هزینه‌های محاسباتی کم، ارائه شده‌است. این مرجع در عین حال که کنترل مناسبی برای لوازم خانگی گرمایی ارائه می‌دهد ولی به‌دلیل استفاده از نرخ قیمت-گذاری زمان استفاده و بازه‌های شبیه‌سازی یک ساعته از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. مرجع [۱۰] مفهوم خانه تبادل انرژی صفر را بیان کرده است و بررسی آماری و تحلیلی جامع بر روی چندین خانه در نقاط مختلف دنیا انجام شده است؛ بدین معنی که فرایند هوشمندسازی و بهینه‌سازی مصرف برق، به وسیله جایگزینی منابع انرژی تجدیدپذیر، به عنوان جانشینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی و خروج وابستگی خانه‌ها به شبکه برق را بیان می‌کند و تاثیر حضور این مفهوم را به خوبی نشان می‌دهد. که در مرجع [۱۱] بهره‌برداری و مشارکت بهینه سلول خورشیدی، توربین بادی و تولید کوچک برق‌آبی به عنوان منابع تولید انرژی یک خانه درنظر گرفته شده‌اند که منجر به ارایه شمایی از یک خانه هوشمند انرژی صفر

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

کارامد، چه از نظر عدم آلودگی و چه از نظر هزینه را به خوبی به نمایش می‌گذارد. همچنین، این پژوهش به وسیله نرم‌افزار Homer انجام شده است. در [۱۲]، زمانبندی بهینه مصرف انرژی خانه‌های هوشمند با استفاده از یک روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور کمینه‌کردن مصرف انرژی پیش‌بینی شده برای یک روز، عملکرد منابع انرژی توزیع شده و لوازم خانگی مصرف-کننده برق بر اساس قیمت‌گذاری بلادرنگ، پنجره زمانی وسایل برقی و خروجی انرژی تجدیدپذیر پیش‌بینی شده، زمانبندی و برنامه‌ریزی شده-است. برای کاهش پیک دیماند از شبکه، طرح قیمت‌گذاری بار پیک تقاضا نیز اتخاذ شده‌است. در عین جامع بودن این پژوهش در آن زمانبندی مناسبی برای تخلیه انرژی باقی‌مانده در باتری خودروی الکتریکی در ساعات مورد نیاز در نظر گرفته نشده است. در [۱۳] با استفاده از الگوریتم-های برنامه‌ریزی خطی، هزینه عملکرد ریزشبکه کمینه شده و وضعیت شارژ باتری بهینه شده‌است. این مرجع بیشتر به‌صورت جزئی روی رفتار فرکانس بالای اجزاء به مطالعه پرداخته است. مرجع [۱۴]یک استراتژی مشارکت بهینه جدید را برای یک ژنراتور بادی پیشنهاد داده است که یک تجهیز ذخیره‌ساز انرژی را برای مشارکت در فرایند تخصیص واحد روز پیشرو بکار می‌گیرد هر چند از بحث مدیریت انرژی خانه و چگونگی اجرای آن صحبتی به میان نیامده است. مرجع [۱۵] یک سیستم زمانبندی بهینه لوازم خانگی را با یک باتری به‌عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی تحت تعرفه برق زمان استفاده، شرح می‌دهد. اندازه‌گیری‌های مربوط به مصرف توان لوازم خانگی و پروفیل‌های تقاضا از قبل بدست آمده‌اند. در این مقاله، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط با قیود عملیاتی کاربردی‌تر برای زمانبندی باتری، فرموله و حل شده‌است. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دو زمینه‌ی صرفه‌جویی در هزینه‌ها و پیک‌سایی مورد بررسی قرار گرفته است هرچند در این مرجع از وجود منابع انرژی باد و خورشید در خانه بهره گرفته نشده است.

پژوهش‌های فراوانی در مورد این موضوع انجام شده است که چند مورد از آن‌ها در این بخش مرور شد. اما در هیچ‌کدام از این پژوهش‌ها، بحث تاب‌آوری به میان نیامده است و یا به صورت خیلی مختصر در مورد آن بحث شده است و تنها از مفهوم سطحی تاب‌آوری به منظور تداوم برق‌رسانی استفاده شده است؛ همچنین مقالات بسیار کمی در بحث تاب-آوری در یک نانوشبکه ارایه شده است و همچنان خلا در این موضوع احساس می‌شود.

این پژوهش، بحث تاب‌آوری را در سطح نانوشبکه بیان کرده است. در این مقاله، مساله از نقطه نظر اقتصادی و نیز رفاه ساکنین مورد بررسی قرار می‌گیرد. نکته قابل توجه این است که بحث تاب‌آور بودن خانه نیز توامان درنظر گرفته شده که نتایج شبیه‌سازی با درنظرگیری نایقینی‌ها، بر محوریت تاب‌آور بودن، محاسبه و یک مقایسه با درنظرگرفتن و عدم قرارگیری تاب‌آوری در مساله انجام شده است. تفاوت اصلی این مقاله با سایر مقالات، درنظرگیری تاب‌آوری از سطح جزئی که همان نانوشبکه می‌باشد، است که مجموعه چندین نانوشبکه تاب‌آور، خودبخود ریزشبکه-ای تاب‌آور را در پی دارد.

در بخش۱ مقدمه و مروری بر ادبیات پیشین انجام شد. در بخش۲ توضیح مختصری از تاب‌آوری ودر بخش۳ روش کار ساختار شبکه نمونه قابل مشاهده است. همچنین در این بخش در مورد فرمول‌های مورد نیاز شرح داده شده است. بخش۴ مربوط به نتایج می‌باشد و به بحث و تحلیل آن‌ها پرداخته شده است. و در نهایت در بخش۵، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری قرار دارد.

۲- تاب آوری[۱]

خاموشی‌های گسترده با احتمال بسیار پایینی امکان رخ دادن دارند اما هزینه های اقتصادی اجتماعی سنگینی دربردارد. طبق گزارش انجمن اقتصادی کاخ سفید در امریکا، بیشترین دلیل قطعی برق در این کشور بر اثر حوادث جوی است. مطالعات نشان می دهد ضرر مربوط به مشکلات آب و هوایی در شبکه قدرت از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ به ۳۰۰ میلیارد دلار می رسد. در سال ۲۰۱۲ نیز طوفان سندی باعث بی برق شدن حدود ۷/۵ میلیون شهروند در ۱۵ ایالت شد و تنها بخشی از ایالات مرکزی کشور که مجهز به میکروگرید قابل کنترل بود نجات پیدا کردند که اهمیت این مفهوم را می رساند. تاب آوری، همانطور که توسط دفتر کابینه دولت انگلستان تعریف شده است عبارت است از: "منابع شبکه وسیستم، برای پیش¬بینی، جذب و انطباق و بازیابی بعد از یک رویداد مخرب است". این تعریف چهار قسمت از تاب آوری شبکه را مشخص می کند: تحمل در برابر خطا، پاسخگویی سریع، ترمیم و پایایی [۱۶]. با توجه مرجع [۱۷]، شاخص عملکرد عادی و خطا برای یک نانوشبکه، نیازمندی نانوشبکه به شبکه قدرت است. یعنی اگر بتوان محتاج بودن به شبکه قدرت بالادست را کاهش داد، به تبع آن می توان یک نانوشبکه تاب آور داشت تا در مواقع خطا، نیازمندی کمتری وجود داشته باشد و خود نانوشبکه بخشی از توان مورد نیازش را تامین نماید. در این پژوهش مفهوم تاب آوری به گونه ای دیگر بیان شده است. با توجه به اینکه تاب آوری به معنای فراتر از قابلیت اطمینان است، اگر بتوان قابلیت اطمینان را بالاتر از حد نرمال برد، به این معنا است که به سیستمی تاب آورتر دست خواهند یافت [۱۸]. بنابراین با توجه به احتمال قطعی برق از شبکه بالادست، اگر بتوان نیازمندی به سیستم بالادست را کاهش داد می توان سیستم را تاب آور کرد.

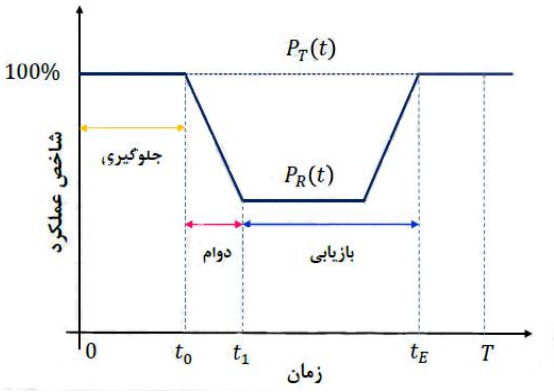
در مفهوم تاب آوری، وابستگی شدید به عواقب یک حادثه، تطبیق پذیری سیستم و سرعت بازیابی آن به زمان، فاکتورهای مهمی هستند که باید در بررسی به آن ها توجه شود. همچنین پاسخ دهی سیستم پیش از

[۱] Resiliency

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

اختلال، پس از آن و در طول حادثه مهم است [۱۹-۲۱]. در شکل۱ روند تاب آوری در یک سیستم قدرت مشخص شده است. شاخص عملکرد،MoP می باشد. با وجود اینکه این نمودار در سیستم قدرت تعریف شده است، اما می توان روی هر سیستمی اجرا کرد. اما برای ظاجرای این رابطه، بسته به نوع مطالعه، MoP مورد نظر باید انتخاب شود. در شکل۱، یک نمود ریاضی وار مشاهده می شود که دو تابع $P_T(t)$ و $P_R(t)$ مشخص شده اند که به ترتیب تابع مقدار شاخص عملکرد در حالت عادی و در حالت خطا می باشد. در رابطه(۱)، $R(t)$ شاخص اندازه گیری تاب آوری می باشد.

$$R(T)=\frac{\int_0^T P_R(t)dt}{\int_0^T P_T(t)dt} \qquad (۱)$$

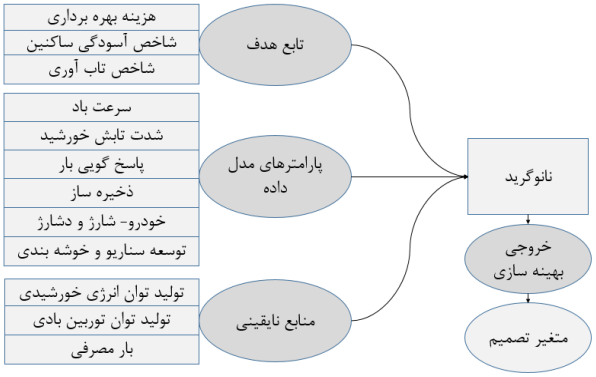


شکل۱: نمودار مربوط به شاخص تاب¬آوری[۲۲].

با توجه مرجع [۲۲]، شاخص عملکرد عادی و خطا برای یک نانوشبکه، نیازمندی نانوشبکه به شبکه قدرت است. یعنی اگر بتوان محتاج بودن به شبکه قدرت بالادست را کاهش داد، به طبع آن می توان یک نانوشبکه تاب آور داشت تا در مواقع خطا، نیازمندی کمتری وجود داشته باشد و خود نانوشبکه بخشی از توان مورد نیازش را تامین نماید؛ این بدین معنا است که $P_R(t)$ به $P_T(t)$ نزدیک تر می شود، پس $R(t)$ افزایش می یابد.

۳- روش

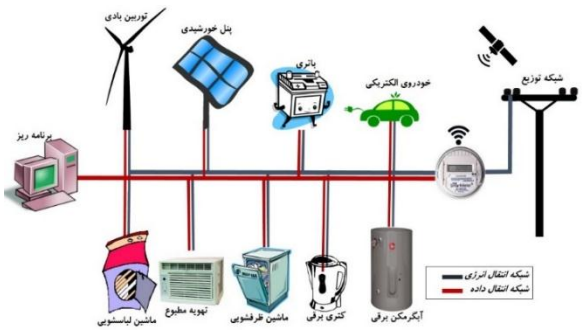
این پژوهش با هدف کمینه‌کردن هزینه کل یک نانوشبکه که شامل هزینه خرید برق از شبکه توزیع بالادستی، هزینه عملکرد هر یک از اجزاء از قبیل منابع انرژی تولید پراکنده تجدیدپذیر و باتری ذخیره‌ساز انرژی می باشد و بیشینه‌کردن سود حاصل از فروش انرژی به شبکه توزیع بالادستی در ساعات اوج بار، انجام شده است. نانوشبکه، هم‌چون ریزشبکه، انرژی تولید شده توسط منابع انرژی پراکنده اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را جمع‌آوری کرده و مطابق با فرمان صادر شده از سیستم مدیریت انرژی خانه یا ساختمان، آن را بین مصرف‌کننده‌های خانگی توزیع کرده و ممکن است سیستم ذخیره‌سازی انرژی را شارژ یا دشارژ نماید. شکل(۲) مدل مفهومی این پژوهش را ارایه می‌دهد.



شکل۲: مدل مفهومی کار مطالعاتی این مقاله

۳-۱- ساختار پیشنهادی

اجزای نانوشبکه‌ای که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است، به‌صورت شکل۳ می‌باشد.



شکل۳: اجزای نانوگرید مورد مطالعه

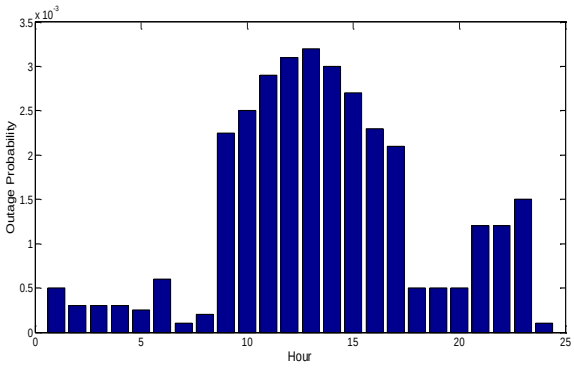
نانوشبکه مورد مطالعه از بخش‌های منابع تولید، شبکه اصلی، لوازم خانگی و کنترل‌کننده تشکیل شده است. کنترل‌کننده نانوشبکه، وظیفه مدیریت انرژی یک خانه هوشمند را بر عهده دارد. بخش‌های اصلی این سیستم کنترل‌کننده عبارتند از: بخش پیش‌بینی، بخش زمان‌بندی و بخش کنترل لحظه‌ای. بخش پیش‌بینی وظیفه‌ی جمع‌آوری داده های مورد نیاز از جمله سرعت باد، تابش خورشید و دمای هوا را از پایگاه‌های داده‌های هواشناسی معتبر دارد. بخش کنترل لحظه‌ای اطلاعات مربوط به وضعیت عملکرد سایر اجزاء را از طریق سنسورها و شبکه مخابراتی در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌دهد. بخش زمان‌بندی به‌عنوان بخش تصمیم‌گیری سیستم مدیریت انرژی عمل می‌کند.

۳-۲- فرضیات پژوهش

در این پژوهش، مدل پیشنهادی برای مدیریت انرژی نانوشبکه، برخی فرضیات در عملکرد اجزاء در نظر گرفته شده است. به‌طور خلاصه، این فرضیات در هریک از بخش‌ها عبارتند از شبکه بالادست، منابع تجدیدپذیر و بارها.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

در شبکه بالادستی داده‌های مربوط به قیمت برق برای یک روز پیش‌رو، به‌صورت خودکار از طرف شرکت توزیع به کامپیوتر سیستم برنامه‌ریز، ارسال می‌گردد. این داده‌ها شامل قیمت‌های بلادرنگ و قیمت توان پیک دریافتی از شبکه بالادستی، در صورت اعمال قیمت‌گذاری پیک تقاضا از شبکه، می‌باشد که برای بازه‌های زمانی یک ساعته ارائه می‌شوند. همچنین در منابع تجدیدپذیر، داده‌های مربوط به دما، سرعت باد و تابش خورشید برای روز آینده، به‌صورت خودکار توسط برنامه‌ریز از پایگاه‌های پیش‌بینی آب و هوا دریافت می‌گردد. داده‌های تاریخی کاملی نیز درباره میانگین و انحراف استاندارد سرعت باد و تابش خورشید، از قبل در کامپیوتر برنامه‌ریز، ذخیره شده است. بارهای الکتریکی با توجه به روش کنترل آن‌ها به سه دسته تقسیم شده‌اند: بدون قابلیت تنظیم زمان عملکرد، با قابلیت تنظیم زمان عملکرد و با قابلیت تنظیم دمای عملکرد. احتمال قطع برق شبکه بالادست به صورت شکل۴ است. با استفاده از شکل۴ می‌توان با کمک تعاملی که مفهوم قابلیت اطمینان با تاب‌آوری دارد سیستم را در تمامی ساعات روز با هدف تاب‌آورتر کردن، بهینه کرد.



شکل۴: احتمال قطع برق برای هر ساعت در یک روز نمونه[۲۳]

۳-۳- هدف پژوهش

هزینه کل عملکرد نانوشبکه در این پژوهش را می‌توان به دو قسمت اصلی هزینه‌های نگهداری تجهیزات و هزینه خرید انرژی از شبکه بالادستی تقسیم کرد. هزینه خرید انرژی از شبکه بالادستی نیز طبق سازوکار از پیش تعیین شده بین خانه و شرکت توزیع انجام می‌پذیرد. در کنار هزینه عملکرد نانوشبکه، هزینه آسودگی خاطر ساکنین و هزینه تاب‌آوری نانوشبکه در برای وقوع خاموشی، نیز در نظر گرفته می‌شوند.

کمینه سازی:

هزینه آسودگی‌خاطر ساکنین+ هزینه تاب‌آوری انرژی + هزینه عملکرد نانوشبکه

٤- مدل سازی

نانوشبکه در نظر گرفته شده در این پژوهش مجهز به شبکه‌ای است که انرژی تولید شده توسط توربین بادی و سلول‌های خورشیدی را دریافت کرده و بین لوازم خانگی مصرف‌کننده انرژی، توزیع می‌کند. ضمناً ذخیره ساز متصل شده به آن قابلیت شارژ یا دشارژ انرژی را در زمان‌های برنامه‌ریزی شده دارد. علاوه بر آن، نانوشبکه با اتصال به شبکه توزیع بالادستی، امکان تبادل توان دو طرفه دارد.

٤-١- مدل‌سازی خرید و فروش

هدف از پاسخگویی بار تنها مصرف برق کمتر در ساعات پیک نیست، بلکه می‌تواند جلوگیری از بروز پیک‌های ناخواسته در ساعات کم‌باری نیز باشد. بنابراین به ازای مقادیر انرژی دریافتی بیش‌تر از مقدار آستانه در هر بازه زمانی t، جریمه‌ای به هزینه خرید برق از شبکه اضافه می شود که از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید[۲۴]:

$$\left(P_t^{grid,buy} - P_{\text{thr.}}^{peak}\right)\cdot \delta \cdot pdP \qquad (۲)$$

رابطه‌ی (۲)، نوع خاصی از قیمت‌گذاری بلادرنگ[۴] می‌باشد.

٤-٢- مدل‌سازی توربین بادی

برای مدل‌سازی بخش مربوط به توان توربین بادی از تابع احتمالاتی ریلی[۵] استفاده شده است. به صورتی که ابتدا به وسیله تابع ریلی چندین نمونه از داده‌های اولیه باد تولید شده و سپس با استفاده از رابطه (۳)، خروجی توربین بادی قابل محاسبه خواهد بود: [۲۵]

$$P_w(v)=\begin{cases}0 & ,0\le v_{aw}\le v_{ci}\\ P_{rated}\times\dfrac{(v_{aw}-v_{ci})}{(v_r-v_{ci})},P_{rated} & v_r\le v_{aw}\le v_{co},v_{ci}\le v_{aw}\le v_r\\ 0 & ,v_{co}\le v_{aw}\end{cases} \qquad (۳)$$

٤-٣- مدل‌سازی پنل خورشیدی

در این بخش نیز مانند تولید توان بادی، ابتدا به وسیله تابع بتا داده‌های اولیه تولید شده و سپس به وسیله رابطه (۴) میزان تولید توان سیستم پنل خورشیدی قابل محاسبه خواهد بود[۲۵]:

$$P_{PV}(si)=\eta^{PV}\times S^{PV}\times si \qquad (kw) \qquad (۴)$$

٤-٤- مدل‌سازی ذخیره‌ساز و خودرو الکتریکی

برای مدل‌سازی خودروی الکتریکی[۶] و ذخیره‌ساز، از مدل بکار رفته در مرجع [۲۶] استفاده شده است. با توجه به اینکه خودرو نیز نوعی ذخیره-ساز می‌باشد روابط این دو المان تقریبا به مانند هم هستند. این خودروها از باتری‌های قابل شارژ استفاده می‌کنند که می‌توانند با اتصال به پریزهای برق موجود در خانه، عمل شارژ و دشارژ را انجام دهند. بنابراین اگر مدیریتی صورت نگیرد، عمل شارژ و دشارژ در مواقع نامناسب می‌تواند اثرات نامطلوب از جمله پرشدگی خطوط روی شبکه بگذارد. در حقیقت یک خودرو برقی همانند سیستم ذخیره‌سازی عمل می‌کند که در ساعاتی از روز حضور ندارد.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

$$0 \le P_t^{PEV,ch} \le P_{PEV,ch}^{\max} \quad (۵)$$

$$0 \le P_t^{PEV,dch} \le P_{PEV,dch}^{\max} \quad (۶)$$

$$P_t^{PEV} = \frac{P_t^{PEV,dch}}{\eta_{PEV}^{dch}} = P_t^{PEV,ch} \cdot \eta_{PEV}^{ch} \quad (۷)$$

$$SOC_{t+1}^{PEV} = SOC_t^{PEV} + \delta \cdot \eta_{PEV}^{ch} \cdot P_t^{PEV,ch} - \delta \cdot P_t^{PEV,dch} / \eta_{PEV}^{dch} - D_t^{PEV} \cdot C_{PEV} \quad (۸)$$

$$SOC_{PEV}^{\min} \le SOC_t^{PEV} \le SOC_{PEV}^{\max} \quad (۹)$$

برای یک خودروی الکتریکی، زمان خروج و ورود آن و میزان مسافت طی شده در روز پیش‌رو، توسط کاربر خودرو تعیین می‌گردد. در این ساعات باتری‌های خودرو برای شارژ یا دشارژ در نانوشبکه در دسترس نیستند. بنابراین $P_t^{PEV,ch}$ و $P_t^{PEV,dch}$ در این ساعات صفر هستند[۲۶]. پارامترهای ذخیره‌ساز خودرو مشابه با پارامترهای ذخیره‌ساز تعبیه شده در خانه هوشمند است و تنها ترم آخر رابطه (۷) در آن وجود ندارد و به جای آن رابطه حرارتی سیستم ذخیره‌ساز درنظر گرفته می‌شود.

٤-۵- مدل‌سازی مصرف‌کنندگان انرژی در خانه

تجهیزات خانه از قبیل لوازم خانگی هوشمند، سنسورها و منابع تولید پراکنده از طریق یک شبکه محلی خانگی به هم متصل و مرتبط شده‌اند. الگوریتم زمان‌بندی بار در سیستم مدیریت انرژی خانه، برای ایجاد زمان‌بندی بهینه بار بر اساس اطلاعات اجزاء، تنظیمات مصرف‌کنندگان و مکانیزم قیمت‌گذاری اجرا می‌شود. هسته‌ی عملیاتی زمان‌بندی بار، بهره گیری از قابلیت انعطاف بار، مطابق با خروجی‌های منابع انرژی و مکانیزم قیمت‌گذاری، با هدف کمینه‌کردن هزینه انرژی ضمن حفظ راحتی مصرف‌کنندگان می‌باشد. سه دسته وسایل شامل لوازم غیر قابل برنامه-ریزی، قابل کنترل با تنظیم زمانی و لوازم قابل کنترل با تنظیم دمایی وجود دارد. دسته اول، لوازم غیر قابل برنامه‌ریزی که در مواقع نیاز استفاده می-شوند. دسته دوم که قابلیت تنظیم زمانی دارند می‌توانند با برنامه مشخص در زمان‌هایی با قیمت مناسب روشن یا خاموش شوند که روابط آن‌ها به صورت زیر می‌باشد.

$$OS_{t,j} = \begin{cases} 0 \text{ or } 1 & ,t_j^{ESt} \le t \le t_j^{LF} \\ 0 & ,otherwise \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$OS_{t,j} = \begin{cases} 1 & ,t_j^{start} \le t \le t_j^{start} + t_j^{OD} - 1 \\ 0 & ,otherwise \end{cases} \quad (۱۱)$$

$$P_{t,j}^{sch} = \begin{cases} P_j & , OS_{t,j} = 1 \\ 0 & , OS_{t,j} = 0 \end{cases} \quad (۱۲)$$

$$P_t^{demand.sch} = \sum_{j=1}^{J} P_{t,j}^{sch} \quad (۱۳)$$

معادله (۱۰) بیان می‌کند که هر وسیله تنها در محدوده‌ی زمانی مشخص خود، یعنی پنجره زمانی‌اش می‌تواند عملکرد داشته باشد. معادله (۱۱) نشان می‌دهد که هر وسیله بعد از شروع عملکرد، تا پایان زمان عملکردش، روشن می‌ماند. معادله (۱۲) نیز توان مصرفی هر وسیله در هر بازه را نشان می‌دهد. اما دسته سوم لوازم برقی با تنظیم دمایی می‌باشند که با تنظیم دما می‌توان مصرف برق را کنترل کرد. این وسایل شامل سیستم گرمایشی و سرمایشی خانه، یخچال و فریزر می‌باشد و روابط ریاضی مشابهی بر آن‌ها حاکم است. براساس [۲۴] و [۲۷] روابط مربوط به این دسته وسایل به صورت زیر است.

$$OS_t^{cooler} = \begin{cases} 1 & , \theta_t^{room} > \theta_t^{set.cooler} \\ 0 & , \theta_t^{room} \le \theta_t^{set.cooler} - \theta_{margin} \\ OS_{t-1}^{cooler} & ,otherwise \end{cases} \quad (۱۴)$$

$$\theta_t^{room} = \theta_{t-1}^{room} + k_{th}^{room} \cdot (\theta_{t-1}^{amb} - \theta_{t-1}^{room}) + k_{human} \cdot n_{\text{occupants}}(t-1) \cdot (\theta_{human} - \theta_{t-1}^{room}) + k_{cooler}^{eff} \cdot \theta_{cooler}^{g} \cdot OS_{t-1}^{cooler} \quad (۱۵)$$

$$P_t^{demand.cooler} = OS_t^{cooler} \cdot P^{cooler} \quad (۱۶)$$

٤-۶- نرخ زمان تاخیر[۷]

برای نمایش ریاضی آسایش ساکنین طبق [۲۸] یک رابطه در نظر گرفته شده است. ساکنین خانه معمولاً ترجیح می‌دهند تا هر وسیله در یک زمان مشخص به‌منظور اجتناب از قیمت‌های پیک، عملکرد داشته باشد و در عین حال کارشان را قبل از رسیدن به یک زمان مشخص تمام کنند. از این‌رو، پارامتری به نام نرخ زمان تأخیر (DTR) به عنوان شاخصی برای آسودگی خاطر ساکنین در نظر گرفته می‌شود که به‌صورت (۱۷) تعریف می‌گردد[۲۸]:

$$DTR_j = \frac{t_j^{start} - t_j^{ESt}}{(t_j^{LF} - t_j^{OD}) - t_j^{ESt}} \quad (۱۷)$$

از آن‌جایی‌که پارامتر تأخیر بزرگتر از ۱ است، ρ^{DTR_j} به‌صورت نمایی با افزایش DTR_j پیوسته افزایش می‌یابد یعنی هرچه وسیله تأخیر بیش‌تری در عملکرد خود در پنجره زمانی‌اش پیدا کند، مقدار مربوط به هزینه تأخیر آن، افزایش به‌مراتب بیش‌تری پیدا می‌کند. در حقیقت ρ به عنوان پارامتر تاخیر است. برای ساکنین خانه مطلوب است که مقدار رابطه (۱۸) تا جایی که ممکن است و منافع مادی آن‌ها را به خطر نمی‌اندازد، کوچک و کوچک‌تر باشد؛ هرچه این مقدار کوچکتر باشد وسایل نزدیک‌تر به زمان تنظیم شده کار می‌کنند.

$$\sum_{j \in J} \rho^{DTR_j} \quad (۱۸)$$

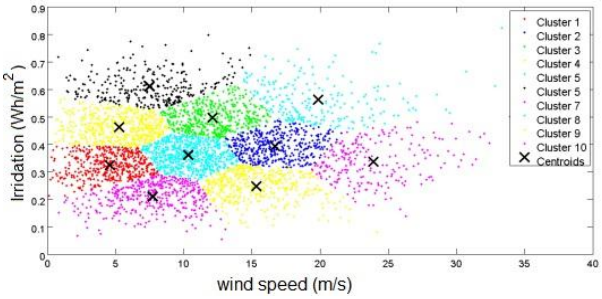
٤-۷- تولید سناریو برای در نظرگیری نایقینی

روش نمونه برداری ابرمکعب لاتین[۸](LHS) به‌منظور ترکیب و تولید سناریوهای تولیدات توان باد و خورشید بکار گرفته شده‌است. روش LHS، منافع زیادی از لحاظ افزایش بازده نمونه برداری و زمان اجرای سریع‌تر در مقایسه با روش نمونه برداری مونت کارلو سنتی ارائه می‌دهد[۲۵]. روش LHS به دو گام شامل نمونه‌برداری و ترکیب تقسیم‌بندی شده‌است. در مرحله نمونه‌برداری ۳۰۰۰ نمونه برای نشان دادن طبیعت تصادفی سرعت

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

باد و تابش خورشید تولید شده‌است. برای این هدف تابع توزیع تجمعی سرعت باد و تابش خورشید به ۳۰۰۰ بازه با احتمال‌های برابر ۱/۳۰۰۰ تقسیم شده‌است. حال برای هر بازه زمانی ۳۰۰۰ زوج داده سرعت باد و شدت تابش خورشید در اختیار است. با توجه به تعداد بالای سناریوها، زمان اجرای برنامه نیز به شدت افزایش می‌یابد. این یک چالش است، زیرا برای برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته انرژی و تقاضا، اپراتور مجبور است تا جائی که ممکن است سریع تصمیم بگیرد. بنابراین به‌منظور کاهش زمان محاسبات، از روش الگوریتم خوشه‌بندی K-means [۹] برای مرتب کردن سناریوهای اصلی سرعت باد و تابش خورشید داخل دسته‌هایی بر اساس تشابه و فاصله بین آن‌ها انتخاب شده‌است. این روش براساس رویه تکراری بنا شده که مرکز ثقل هر دسته به‌عنوان مقدار میانگین سرعت باد و تابش خورشید اختصاص داده شده به هر دسته تعریف شده‌است[۲۵].

مرکز ثقل برای هر دسته، یک سناریو را که شامل ۲ مقدار متفاوت مثلاً مقادیر میانگین سرعت باد و تابش خورشید است، نشان می‌دهد. شکل۵ نیز یک نمونه خوشه‌بندی و تعیین مرکز ثقل خوشه‌های سناریوهای سرعت باد و شدت تابش خورشید هستند. تعداد سناریوهای موجود در هر دسته تقسیم بر تعداد کل سناریوهای اصلی، احتمال هر سناریو را نشان می‌دهد.



شکل۵: سناریوهای سرعت باد و تابش خورشید و خوشه‌بندی آن‌ها برای ساعت۳ بعد از ظهر یک روز نمونه‌ای

۸-٤- فرمول‌بندی تاب‌آوری

با توجه به [۱۹]، با درنظرگیری تعریف و مفهوم تاب‌آوری ذکر شده، می‌بایست حالت عملکرد در زمان بحران نزدیک به حالت عملکرد در زمان عادی کارکرد سیستم شود. در یک نانوشبکه تداوم برق‌رسانی اهم موضوع است که به وسیله این کار با درنظر گرفتن شاخص انتظار انرژی تأمین نشده توسط شبکه بالادستی، به‌عنوان تابع هزینه تاب‌آوری، انجام می‌شود؛ که معیار مناسبی برای این نزدیک‌سازی دو حالت عملکرد خواهد بود. EENS[۱۰]، شاخص انتظار انرژی تأمین نشده توسط شبکه بالادستی است. این شاخص، امید ریاضی انرژی تأمین نشده نانوشبکه در زمان قطعی برق می‌باشد که مقدار آن از رابطه (۱۹) بدست می‌آید و در آن p_t^{outage} احتمال قطع برق (ناپایایی شبکه بالادستی) در هر بازه زمانی است:

$$EENS = \sum_{t=1}^{T} \delta(p_t^{outage} \times P_t^{grid,buy}) \ (kwh) \qquad (۱۹)$$

۵- فرمول‌بندی ریاضی مساله

در این پژوهش با استفاده از روابط مربوط به تابع هزینه که در بخش بعدی قابل مشاهده است و به وسیله روش بهینه‌سازی بهبودیافته الگوریتم ازدهام ذرات (PSO) به حل مساله پرداخته شد و بهینه‌سازی انجام شده است.

۵-۱- تابع هدف نهایی مساله

تابع هدف بهینه‌سازی نهایی ، مجموع وزن‌دار سه تابع هزینه تعریف شده است. همچنین قیود نیز باید رعایت شوند تا بهترین پاسخ یافته شود.

$$\min : w_1 \cdot F_1(NOC) + w_2 \cdot F_2(DTR) + w_3 \cdot F_3(EENS) \qquad (۲۰)$$

که در آن $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ و $w_1, w_2, w_3 \in [0,1]$ در رابطه (۲۰)، w_1 ، w_2 و w_3 ضرایب وزنی هستند که اهمیت هر یک از توابع هزینه و میزان تأثیرگذاری آنها را بر تابع هدف نهایی تعیین می کنند.

۵-۲- تابع هزینه عملکرد نانوشبکه

برای یافتن تابع هدف باید مساله براساس هزینه چینش شود و روابط به یک تابع هزینه برسد و سپس آن بهینه شود. تمامی اجزای سیستم دارای هزینه عملکرد و تعمیرنگهداری می‌باشند که به صورت رابطه (۲۰) آمده است که به دلار می‌باشد.

$$NOC = \sum_{t=1}^{T} \begin{bmatrix} \delta(m^{wt} P_t^{wt} + m^{pv} P_t^{pv} \\ + m^{batt} P_t^{batt} + b_t P_t^{grid,buy} \\ - q_t P_t^{grid,sell}) \end{bmatrix} + \sum_{s=1}^{S} \pi_s \left\{ \sum_{t=1}^{T} \left[\delta \begin{pmatrix} m^{wt} P_{s,t}^{wt} + m^{pv} P_{s,t}^{pv} \\ + m^{batt} P_t^{batt} + b_t P_{s,t}^{grid,buy} \\ - q_t P_{s,t}^{grid,sell} \end{pmatrix} \right] \right\} \qquad (۲۱)$$

که شامل هزینه عملکرد توربین باتری به ازای میزان تولید توان، هزینه عملکرد پنل خورشیدی، باتری و اختلاف توان‌های خریداری شده و فروخته شده از/به شبکه می‌باشد.

۵-۳- قیود مساله

قیود این مساله از دو قسمت اساسی تشکیل می‌شود: قیود عملکرد اجرا که هر جزء بسته به محدودیت‌های خودش باید عملکرد مناسبی داشته باشد که در روابط قبل اعمال شده‌اند و نیز قید تعادل انرژی که روابط آن به صورت (۲۵) می‌باشد. همچنین P_t^{demand} خود از مجموع میزان مصارف تمامی سه دسته وسایل برقی پیش‌تر ذکر شده، می‌باشد که در رابطه (۲۶) بیان گردیده است.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

$$P_t^{demand} = P_t^{wt} + P_t^{pv} + P_t^{grid,buy} + P_t^{batt,dch} - P_t^{grid,sell} - P_t^{batt,ch} + P_t^{PEV,dch} - P_t^{PEV,ch}, \quad \forall t \tag{۲۵}$$

$$P_t^{demand} = P_t^{demand,non_sch} + P_t^{demand,sch} + P_t^{demand.cooler} + P_t^{demand.heater} + P_t^{demand.refri.} + P_t^{demand.freezer} \tag{۲۶}$$

۵-٤- نرمالیزه‌سازی

برای این‌که تابع هزینه بتواند وارد تابع هدف بهینه‌سازی شود، باید نرمالیزه گردد. عمل نرمالیزه‌کردن، برای هم مقیاس کردن توابع هزینه موجود در تابع هدف نهایی انجام می‌شود.

$$F_1(NOC) = \frac{NOC}{NOC_{\max}} \tag{۲۷}$$

$$F_2(DTR) = \frac{\sum_{j\in J}\rho^{DTR_j}}{\left(\sum_{j\in J}\rho^{DTR_j}\right)_{\max}} \tag{۲۸}$$

$$F_3(EENS) = \frac{EENS}{(EENS)_{\max}} \tag{۲۹}$$

در (۲۷)،(۲۸) و (۲۹) ، F_1 تابع نرمالیزه هزینه عملکرد، F_2 تابع آسایش ساکنین و F_3 نرمالیزه‌شده تاب‌آوری می‌باشد.

٦- نتایج شبیه‌سازی

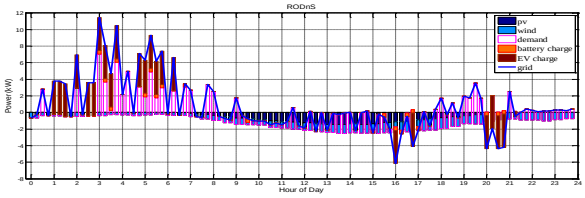
در این بخش به ارایه نتایج و تفسیر نتایج شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. داده‌های اولیه شامل مقادیر میانگین سرعت باد و انحراف استاندارد آن، میانگین تابش خورشید و انحراف استاندارد آن و دمای هوا در هر ساعت از مرجع [۲۹] دریافت شده است. این اطلاعات برای شهر آبردین از ایالت آیداهو در امریکا، برای یک روز تابستانی و یک روز زمستانی در سال ۲۰۱۵ می‌باشد. توربین بادی نیز از کتابخانه نرم‌افزار Homer و پنل خورشیدی به مساحت ۱۲ متر مربع با بازده ۹۰٪ در نظر گرفته شده است. همچنین محدودیت پیک تقاضا به ازای ۵ کیلووات در ۱۰ دلار بسته شده است. اطلاعات لوازم برقی از [۲۴] و [۲۷] استخراج شده‌اند. پنجره زمانی ۱۵ دقیقه‌ای می‌باشد و روند بهینه‌سازی به روش حالت ابتکاری ازدحام ذرات انجام داده شده است. همچنین ضرایب وزنی تابع هدف به صورت برابر درنظرگرفته شده‌اند؛ یعنی هر سه پارامتر تابع هدف از یک درجه اهمیت برخوردار هستند.

٦-١- حالت‌های مطالعه

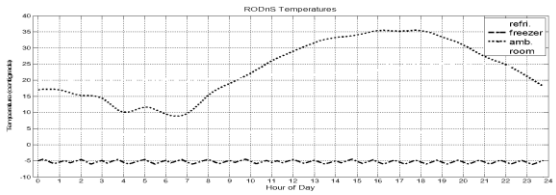
با توجه به روش قیمت‌گذاری، زمان آغاز به کار وسایل، نرخ زمان تأخیر و روز مورد مطالعه، مجموعاً ۱۶ حالت شبیه‌سازی در نظر گرفته می شود. ابتدا نتایج بدون درنظر گرفتن تابع هزینه تاب‌آوری، بدست آمده، سپس اثر تابع هزینه تاب‌آوری روی دو مورد از حالت‌هایی که از لحاظ هزینه بهتر بودند، بررسی می‌شود. هر یک حالت‌های شبیه‌سازی در این بخش، در موارد زیر با هم تفاوت دارند. در بخش قیمت‌گذاری دو حالت –با درنظرگیری پیک تقاضا از شبکه (P) و –بدون درنظرگیری پیک تقاضا از شبکه (R)، در بحث زمان آغاز به‌کار وسایل دو حالت –زودترین زمان آغاز به‌کار (E) و –زمان آغاز به‌کار بهینه (O)، همچنین در بحث نرخ زمان تأخیر نیز دو حالت –در نظرگیری نرخ زمان تأخیر (Dy) و –بدون در نظر گیری نرخ زمان تأخیر (Dn) و در پایان، یک روز –تابستانی (S) و –زمستانی (W) مطالعات انجام شده است.

٦-٢- مقایسه تعادل توان در حالات مختلف

شکل‌های ۶ و ۷ تعادل توان در بخش تولید و تعادل دما را در این بخش نشان می‌دهند که یکی از این حالت‌ها می‌باشد.



شکل۶: نمودار تعادل توان الکتریکی برای حالت RODnS(بدون درنظرگیری پیک تقاضا از شبکه/زمان آغاز بکار بهینه/بدون درنظرگیری نرخ زمان تأخیر/فصل تابستان)



شکل۷: پروفیل دما برای حالت RODnS ؛(خط ممتد: دمای اتاق)،(خط‌چین: دمای داخل یخچال)،(نقطه خط: دمای داخل فریزر)،(نقطه‌چین: دمای محیط بیرون)

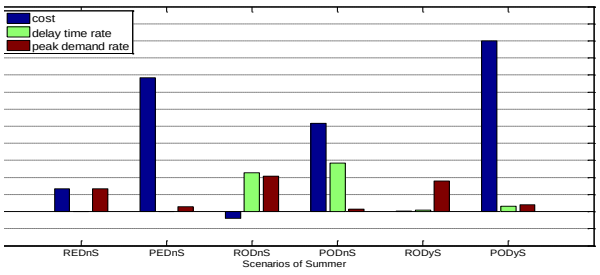
منحنی توان الکتریکی دریافتی از شبکه بالادستی در نمودارهای تعادل توان الکتریکی مربوط به حالت‌هایی که تنها از نرخ قیمت‌گذاری بلادرنگ (که در ابتدای نام آن‌ها از حرف «R» استفاده شده‌است) استفاده کرده‌اند، دارای افت و خیزهای فراوان است زیرا در این حالت‌ها، زمان‌بندی وسایل خانه و زمان‌بندی شارژ خودروی الکتریکی و باتری به گونه‌ای تنظیم می شود که در بازه‌های زمانی با قیمت انرژی کم، توان مورد نیاز نانوشبکه از شبکه بالادستی خریداری شود. این امر ضمن کاهش هزینه‌ها، باعث اعمال پیک‌های ناخواسته به شبکه می شود. ولی با اعمال نرخ قیمت‌گذاری پیک تقاضا از شبکه، پروفیل توان دریافتی از شبکه مسطح‌تر می‌شود. با مقایسه حالت‌های تابستان می‌توان دریافت که تولید انرژی بادی و خورشیدی در ساعات ۹ الی ۱۷ باعث شده است که تقاضای انرژی از شبکه بالادستی صفر و در بیش‌تر اوقات منفی شود. این بدان معنی است که نانوشبکه در این ساعات با فروش برق به شبکه در حال سودآوری است. در کنار آن

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

انتقال بارهای موجود در خانه از این ساعات به ساعات دیگر به این امر کمک فراوان می‌کند. بهینه‌ساز، بازه‌های دشارژ خودروی الکتریکی و باتری را به ساعات بیشترین قیمت انتقال داده و سودآوری به‌همراه داشته یا از هزینه‌ها می‌کاهد.

٦-٣- مقایسه تمام حالت‌ها از نظر هزینه، پیک توان، درصد زمان تأخیر و نسبت پیک دریافتی به مجموع انرژی

همان‌طور که از نمودار شکل۷ و مقایسه حالت‌هایRODnS و REDnS پیداست، حالت RODnS به‌خوبی توانسته است از هزینه‌ی نانوشبکه بکاهد. منفی شدن میله‌ی مربوط به هزینه در حالت RODnS نشان می‌دهد که این حالت نه‌تنها هزینه‌ای را به خانه تحمیل نمی‌کند بلکه اندکی سود نیز به همراه دارد. در عین حال در این حالت مقدار درصد زمان تأخیر آن و نیز پیک تقاضای توان از شبکه نسبت به سایر حالت‌ها، بالاتر است، بنابراین نمی‌تواند آسودگی خاطر کافی را برای ساکنین خانه تأمین کند. در مقایسه با RODnS، حالت RODyS که بخش تابع هزینه مربوط به زمان تأخیر را با وزن مشخصی وارد تابع هدف نموده است، توانسته است ضمن افزایش ناچیزی در هزینه نانوشبکه (حدوداً ۴٪)، مقدار درصد نرخ زمان تأخیر را تا حدود زیادی کاهش دهد (حدوداً ۲۲٪) و از این طریق رضایت خاطر ساکنین خانه را نیز فراهم آورد. بنابراین این مقایسه اثر بخشی مدل ارائه شده در این پژوهش برای کاهش نرخ زمان تأخیر وسایل را نشان می‌دهد. بنابراین دخالت دادن بخش مربوط به نرخ زمان تأخیر به تابع هدف نهایی در حالت شبیه‌سازی RODyS، مقدار قابل قبولی را برای هزینه انرژی نانوشبکه و نرخ زمان تأخیر لوازم خانگی (هزینه آسودگی خاطر ساکنین)، با مصالحه بین آن‌ها بدست می‌آورد.



شکل۸: نمودار مقایسه ای بین هزینه(ستون آبی)، نرخ زمان تأخیر (ستون سبز) و نرخ تقاضای پیک (ستون قهوه‌ای) برای حالت‌های تابستان

مقایسه بین حالت‌های RODnS و PODnS، و حالت‌های RODyS و PODyS و حالت‌های REDnS و PEDnS به‌ترتیب کاهش‌های ۱۹، ۱۵ و ۱۱ درصدی را در میزان پیک انرژی دریافتی از شبکه نشان می‌دهد و این امر اثر بخشی نرخ قیمت‌گذاری پیک تقاضا از شبکه را بر مدل ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که با وجود اعمال نرخ زمان تأخیر به تابع هدف، بهینه‌سازی کارایی خودش را از دست نداده است و ضمن کاهش هزینه‌های نانوشبکه، آسایش خاطر ساکنین را با کم‌کردن درصد زمان تأخیر وسایل فراهم می‌کند.

٦-٤- بررسی اثر درنظرگیری تاب‌آوری روی دو حالت RODnS و PODyS

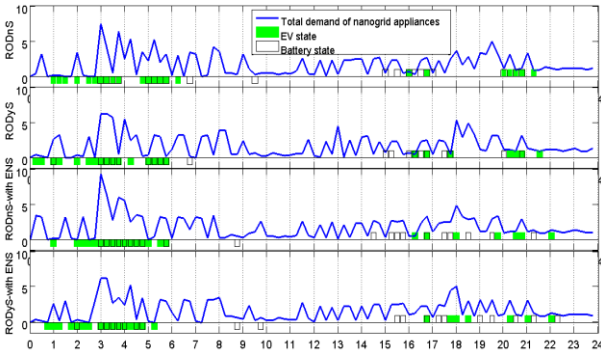
برای بررسی اثر شاخص تاب‌آوری بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی، شبیه سازی روی دو حالت RODnS و RODyS (که بهترین نتایج را از نظر هزینه برای فصل تابستان داشته‌اند)، با درنظرگیری وزن مناسب برای تابع هزینه تاب‌آوری انجام شده است. حالت‌هایی که در آن شاخص انتظار انرژی تأمین نشده به تابع هدف اضافه شده‌اند، با پسوند with ENS مشخص شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با درنظرگیری شاخص تاب‌آوری در جدول۱ آورده شده است. در این جدول هزینه عملکرد نانوشبکه، درصد زمان تأخیر، انتظار انرژی تأمین نشده و شاخص پایایی انرژی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

نام حالت	هزینه عملکرد نانوشبکه	درصد زمان تأخیر	انتظار انرژی تأمین نشده (KWh)	کل انرژی تأمین نشده (KWh)	شاخص پایایی انرژی EIR
RODnS	-۰/۹۰۱۷	۲۲/۶۱	۰/۰۲۳۴	۳۶/۱۲۸۸	۰/۹۹۹۳۵۲
RODyS	۰/۰۵۲۳	۰/۹۲	۰/۰۲۲۰	۳۶/۳۸۶۶	۰/۹۹۹۳۹۵
RODnS_with ENS	۰/۶۲۶۳	۱۵/۶۲	۰/۰۱۲۹	۴۰/۳۴۲۹	۰/۹۹۹۶۸۰
RODyS_with ENS	۱/۵۷۵۳	۳/۲۸	۰/۰۱۲۱	۳۱/۳۷۸۰	۰/۹۹۹۶۱۴

جدول۱: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با درنظرگیری شاخص تاب‌آوری و بدون درنظرگیری شاخص تاب‌آوری برای حالت‌های RODnS و RODyS

نتایج حاصل از جدول۱ نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن شاخص مربوط به انتظار انرژی تأمین نشده و اضافه‌کردن آن به عنوان تابع هزینه تاب‌آوری سیستم به تابع هدف نهایی مسئله، هرچند هزینه حدود یک دلار افزایش پیدا می‌کند ولی شاخص‌های انتظار انرژی تأمین نشده و پایایی انرژی بهبود پیدا کرده‌اند. این افزایش هزینه به دلیل افزایش تاب‌آوری است. در حالت تاب‌آور عملکرد سیستم‌های ذخیره سنگین‌تر شده و نیاز به انعطاف بیشتری خواهند داشت؛ به طوری که کلیدزنی باتری‌ها و جابجایی زمان روشن شدن وسایل تنظیم زمانی و نیز تغییر زمان روشن و خاموش شدن وسایل دمایی، با هدف افزایش شاخص تاب‌آوری است که منجر به شیفت بار به سمت زمان‌هایی که برق گرانتر است، می‌باشد. با درنظر گرفتن تابع هزینه تاب‌آوری، شاخص پایایی انرژی بهبود پیدا کرده است. این بهبود بیشتر در اثر انتقال برخی از مصارف انرژی به ساعات با احتمال قطعی کم‌تر و دشارژ انرژی باتری و خودروی الکتریکی در ساعات با تقاضای انرژی بیش‌تر از شبکه، رخ می‌دهد. با تامل بیشتر در نتایج به این مهم دست میابیم که کم‌ترین هزینه مربوط به حالت RODnS است، زیرا تابع هدف تنها هزینه انرژی نانوشبکه بوده است. همچنین کم‌ترین درصد زمان تأخیر مربوط به حالت RODyS بوده است، زیرا نرخ زمان تأخیر در تابع هدف درنظر گرفته شده است. بیش‌ترین میزان شاخص پایایی انرژی مربوط به حالت RODnS_with ENS بوده است که در آن تابع هزینه تاب‌آوری نیز در تابع هدف نهایی مسأله درنظر گرفته شده است.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]



شکل۹: مقایسه پروفیل دیماند کل لوازم خانگی نانوشبکه، شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی و باتری، در حالت‌های RODnS، RODyS، RODnS— with ENS و RODyS—with ENS

شکل ۹، دیماند کل لوازم خانگی نانوشبکه، وضعیت‌های شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی و باتری را در هر یک از چهار حالت بالا نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل پیداست، در دو حالت اول که تابع هزینه تاب‌آوری درنظر گرفته نشده است، تمرکز دشارژ خودروی الکتریکی و باتری، بیش‌تر در زمان‌هایی است که قیمت برق بالا بوده و فروش انرژی برای نانوشبکه سودآوری دارد، یعنی ساعات ۱۶ الی ۱۷ و ۲۰ الی ۲۱. برای دو حالت آخر یعنی با درنظرگیری تابع هزینه تاب‌آوری در تابع هدف نهایی مسأله، مشاهده می‌شود که دشارژ خودروی الکتریکی و باتری، بیش‌تر، در زمان‌هایی انجام می‌شود که دیماند لوازم خانگی، بالاتر است و بدین صورت، وابستگی نانوشبکه به دریافت توان از شبکه بالادستی، کم‌تر می‌شود. بنابراین در صورت وقوع خاموشی، مقدار باری که در نانوشبکه از دست می‌رود، کم‌تر شده و درنتیجه، پایایی انرژی آن بیش‌تر می‌شود.

۷- تحلیل و نتیجه‌گیری

این پژوهش اثر برنامه‌ریزی در زمانبندی و سیستم دمایی را با مقایسه درنظر گرفتن تاب‌آوری و در نظر نگرفتن آن، به‌خوبی به نمایش گذاشت. ضمن در نظرگیری نایقینی‌ها در منابع تولید پراکنده و تولید سناریوهای مختلف به روش‌های جدید بهترین حالات را در سناریوسازی انجام داده و به تابع هدف نهایی وارد شود. همچنین به زمان‌های بهینه شارژو دشارژ باتری و خودرو دست یافته شد و بهترین حالات بر اساس هزینه مشخص شده‌است. فاکتور مهمی که رضایتمندی ساکنین را در بر می‌گیرد ، در نظر گرفته شد تا بر اساس آن با کمترین هزینه بهترین حالات ممکن استفاده ساکنین از وسایل و همچنین در تعیین بهینه دمای سیستم‌های حرارتی و برودتی نانوشبکه ارایه شد. با مقایسه درنظر گرفتن هزینه تاب‌آوری و درنظر نگرفتن آن مشاهده می‌شود که با وجود افزایش کمی در هزینه، مقدار انتظار انرژی تامین نشده تقریبا به نصف کاهش و شاخص‌های پایایی بهبود داشته‌اند. این بدین معنا است که با اندکی افزایش هزینه در برنامه-ریزی می‌توان از هزینه‌های اضافی در آینده جلوگیری کرد.

مراجع

[1] Vc. Gungor, D. Sahin, T. Koack, S. Ergut.C. Bucella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "Smart Grid and Smart Homes Key Players and Pilot Projects", IEEE Industrial Electronics magazine, December 2012.

[2] Momoh, J., "Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control",In Power Systems Conference and Exposition, PSCE'09. IEEE/PES, March2009.

[3] H. Morsali, S. M. Shekarabi, K. Ardekani, H. Khayami, A. Fereidunian, M. Ghassemian, H. Lesani., "Smart Plugs for Building Energy Management System", 2nd Iranian Conf. on Smart Grid, ICSG 2012.

[4] M. Kojury-Naftchali, A. Fereidunian, H. Lesani, "Identifying susceptible consumers for demand response and energy efficiency policies by time-series analysis and supplementary approaches", 24th Iranian Conf. on Elec. Engineering, ICEE 2016.

[5] Ghasemieh H, Haverkort BR, Jongerden MR, Remke A. Energy resilience modelling for smart houses. In2015 45th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks 2015 Jun 22 (pp. 275-286). IEEE.

[6] Ouyang, M., & Dueñas-Osorio, L. (2014). Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems. Structural Safety, 48, 15-24.

[۷] امینی فر. فرخ، "درآمدی بر مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت"،سخنرانی علمی، پژوهشگاه نیرو، سالن فردوسی، ۹۵/۷/۲۶

[8] Roche R, Berthold F, Gao F, Wang F, Ravey A, Williamson S. A model and strategy to improve smart home energy resilience during outages using vehicle-to-home. InElectric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International 2014 Dec 17 (pp. 1-6). IEEE.

[9] Marrone S, Gentile U. Finding Resilient and Energy-saving Control Strategies in Smart Homes. Procedia Computer Science. 2016 Dec 31;83:976-81.

[10] Guan, X., Xu, Z. and Jia, Q.S.,"Energy-Efficient Buildings Facilitated by Microgrid," IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 1, No. 2, pp. 243-252, 2010.

[11] Huang, Y., Tian, H. and Wang, L., "Demand response for home energy management system,"

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 73, pp. 448-455, 2015.

[۱۲] محمد خلیل زاده، علیرضا فریدونیان، سیدمحمد تقی بطحایی، "خانه-های تبادل انرژی صفر: بررسی آماری و ارزیابی مقایسه اقتصادی انرژی"، دومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی۱۳۹۴.

[13] M. H. Amrollahi, S.M.T. Bathaee, A. Fereidunian, A. Bahramiazar, "Integration of Renewble Energy Sources in Zero Energy Biuldings", Conf. and exhibition on Elec. Distribution Cired, 2014.

[14] Shirazi, E., Zakariazadeh, A. and Jadid, S.,"Optimal joint scheduling of electrical and thermal appliances in a smart home environment," Energy Conversion and Management , Vol. 106, pp. 181-193, 2015.

[15] Chakraborty, S., Weiss, M.D. and Simoes, M.G.,"Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency AC microgrid," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, pp. 97-109, 2007.

[16] Dukpa, A., Duggal, I., Venkatesh, B. and Chang, L.,"Optimal participation and risk mitigation of wind generators in an electricity market," IET renewable power generation, Vol. 4, No. 2, pp. 165-175, 2010.

[17] Setlhaolo, D. and Xia, X., "Optimal scheduling of household appliances with a battery storage system and coordination," Energy and Buildings, Vol. 94, pp. 61-70, 2015.

[18] Gholami. A, Aminifar. F, Shahidehpour. M, "Frontlines against the Darkness", IEEE Electrification Magazine,1 march 2016.

[19] Ouyang, M., & Dueñas-Osorio, L. (2014). Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems. Structural Safety, 48, 15-24.

[۲۰] باقری، س، فریدونیان، ع، "مدیریت انرژی نانوشبکه‌های هوشمند با رویکرد تاب‌آوری"، پنجمین کنفرانس بین المللی سیرد، ایران، تهران، ۱۳۹۵

[۲۱] باقری، س، فریدونیان، ع، "نانوشبکه هوشمند تاب‌آور با سیستم مدیریت انرژی خطی و درنظرگیری عدم قطعیت" ششمین کنفرانس بین المللی سیرد، ایران، تهران ۱۳۹۶

[22] Clark-Ginsberg. A, Stanford University, "What's the Diffrence between Reliability and Resilience", Online: https://ics-cert.us-cert.gov/sites/default/files/ICSJWG-Archive/QNL_MAR_16/reliability%20and%20resilience%20pdf.pdf , March 2017.

[۲۳] لیموزاده، ا.، درخشنده، س.، ی.، «برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره در ریزشبکه‌ها با لحاظ نمودن قیود قابلیت اطمینان»، کنفرانس ملی فناوری، داده و انرژی با رویکرد مهندسی برق و کامپیوتر ۱۳۹۴.

[24] Zhang, Di, Nilay Shah, and Lazaros G. Papageorgiou. "Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid." Energy Conversion and management 74 (2013): 209-222.

[25] Mazidi, M., Zakariazadeh, A., Jadid, S. and Siano, pp.,"Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid," Energy Conversion and Management, Vol. 86, pp. 1118-1127, 2014.

[26] Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M. and Aminifar, F., and Farrokh Aminifar. "Load commitment in a smart home." Applied Energy, Vol. 96, pp. 45-54, 2012.

[27] Tarasak, pp., Chai, C.C., Kwok, Y.S. and Oh, S.W., "Demand Bidding Program and Its Application in Hotel Energy Management." IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 2, pp. 821-828,2014.

[28] Zhao, Z., Lee, W.C., Shin, Y. and Song, K.B., "An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 3, pp. 1391 - 1400, 2013.

[29] AgriMet, "AgriMet Weather Data." [Online]. Available: http://www.usbr.gov/pn/agriment/wxdata.html

[1] Demand side management

[2] Energy efficiency (EE)

[3] Demand response (DR)

[4] Real time

[5] Rayleigh

[6] Electrical vehicle

[7] Delay time rate

[8] Latin Hypercube Sampling

[9] K-means clustering

[10] Exception of energy not supplied

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.3.4.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.3.1]