

## مدیریت بهینه ریزش شبکه‌های خانگی به همراه استراتژی هوشمند قیمت گذاری منابع تولید

### توزیع شده انرژی بر پایه روش نظریه بازی

معصومه جوادی<sup>۱</sup>،<sup>۲</sup> موسی مرزبند<sup>۳</sup>، سید مازیار میرحسینی مقدم<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق - قدرت، پردیس علوم و تحقیقات گیلان، دانشگاه آزاد اسلامی،

رشت، ایران

javadi.masoomeh@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق - قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، رشت، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی برق - قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

m.mirhosseini@liau.ac.ir, m.marzband@liau.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، مدلی ابتکاری برای مدیریت تقاضای بار با توجه به مقدار توان تولیدشده و پیش‌بینی قیمت تسویه بازار ارائه شده است که در آن پارامترهای عدم قطعیت مرتبط با منابع کنترل‌ناپذیر و نیز تقاضای بار در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، یک استراتژی قیمت‌گذاری براساس نظریه بازی همکارانه با احتساب عدم قطعیت‌های قیمت ارائه شده است که در آن، تعیین پیشنهاد قیمت بهینه بازیگران، متناسب با تابع هدف تعریف شده است. متدولوژی ارائه شده برای استراتژی قیمت‌گذاری تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، متأثر از قیمت‌های پیشنهادی دیگر بازیگران بوده است و بر مبنای ماکزیمم کردن سود آن‌هاست. در این مقاله، یک ساختار کلی برای بازار خرده‌فروشی الکترونیسته با حضور ریزش‌بکه‌ها و بر پایه نظریه بازی، با استفاده از الگوریتم رهاسازی و تابع نیکایدو - ایزودا (نامگذاری شده به صورت الگوریتم REM-NIRA) پیشنهاد شده است. در بازار پیشنهادی، مصرف‌کنندگان با هدف مینیمم‌سازی قیمت تسویه بازار و تولیدکنندگان با هدف حداکثرسازی سود در رسیدن به نقطه تعادل نش با یکدیگر همکاری می‌کنند. این کار از طریق مدیریت در بهره‌برداری محلی از منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازهای انرژی و بارهای پاسخگو و در ارتباط با شبکه بالادست صورت می‌گیرد. نتایج به دست آمده، بیانگر آن است که به‌طور کلی می‌توان چهارچوب پیشنهادی را بر روی شرایط بازی مختلف در بازار الکترونیسته و بر مبنای بازی همکارانه مابین بازیگران مشارکت‌کننده در بازار با استراتژی‌های قیمت‌گذاری گسسته پیاده‌سازی کرد.

**واژه‌های کلیدی:** بازار انرژی الکتریکی، نظریه بازی، ریزش‌بکه، مدیریت انرژی، مدیریت سمت تقاضا.<sup>۱</sup>

#### علائم اختصاری

نام کمیت	توضیحات
Bidding strategy based on cooperative game (BSCG)	استراتژی قیمت‌گذاری بر مبنای بازی همکارانه
Deterministic optimization method	روش بهینه‌سازی قطعی
Dispatchable/non-dispatchable resources	منابع کنترل‌پذیر / کنترل‌ناپذیر

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۱۲/۲۰

نام نویسنده مسئول : موسی مرزبند

نشانی نویسنده مسئول: گیلان - لاهیجان - دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

۷۰ مدیریت بهینه ریزشبه‌های خانگی به همراه استراتژی هوشمند قیمت‌گذاری منابع تولید توزیع‌شده انرژی بر پایه روش نظریه بازی

منابع توزیع‌شده انرژی	Distributed energy resource (DER)
آبگرمکن الکتریکی	Electrical water heat (EWH)
ذخیره‌کننده انرژی	Energy storage (ES)
قیمت تسویه بازار	Market clearing price (MCP)
ریزشبکه	Microgrid (MG)
میکروتوربین	Microturbine (MT)
بار غیرپاسخگو	Non-responsive load (NRL)
فتوولتائیک	Photovoltaic (PV)
بار پاسخگو	Responsive load demand (RLD)
بازار خرده‌فروشی بر مبنای تابع نیکایدو - ایزودا و الگوریتم رهاسازی	Retail electricity market/Nikaido-Isoda/Relaxation algorithm (REM-NIRA)
وضعیت شارژ	State-of-charge (SOC)
روش بهینه‌سازی تصادفی	Stochastic optimization method
قیمت خرید/فروش سیستم	System buy/sell price (SBP/SSP)
تست آرایه متعامد تاگوچی	Taguchi's orthogonal array testing (TOAT)
توربین بادی	Wind turbine (WT)
خرید و فروش توان از / به MG	MG+, MG-
انتقال / اضافه‌شدن توان از / به بار پاسخگو	RLD+, RLD-
تابع درآمد / هزینه / هدف بازیگر $i$ در زمان $t$ (£)	$R_t^i / C_t^i / J_t^i, i \in \{1,2,3\}$
توان خروجی / پیشنهاد قیمت منابع کنترل‌ناپذیر $k$ در زمان $t$ تحت سناریوی $s$ (kW, £/kWh)	$P_{t,s}^k, \pi_{t,s}^k$
توان خروجی / پیشنهاد قیمت منابع کنترل‌پذیر $l$ در زمان $t$ تحت سناریوی $s$ (kW, £/kWh)	$P_{t,s}^l, \pi_{t,s}^l$
توان خروجی / پیشنهاد قیمت منابع ES در زمان $t$ تحت سناریوی $s$ (kW, £/kWh)	$P_{t,s}^{ES}, \pi_{t,s}^{ES}$
بازه زمانی	$\Delta t$
احتمال وقوع سناریوی $s$ برای توان / قیمت منبع $A$ (شامل منابع کنترل‌ناپذیر و کنترل‌پذیر) در زمان $t$	$\rho_{t,s}^A$
تعداد سناریوهای عدم قطعیت	$N_s$
قیمت بهینه خرید / فروش الکتریسیته با شبکه توزیع از / به MG (£/kWh)	$\pi_t^{SBP}, \pi_t^{SSP}$
هزینه تولید و یا تأمین الکتریسیته منبع کنترل‌پذیر / کنترل‌ناپذیر $A$ در زمان $t$ (£)	$C_t^A$
حداقل / حداکثر توان خروجی $A$ (kW)	$\underline{P}^A, \bar{P}^A$
راندمان الکتریکی منابع کنترل‌ناپذیر $A$ (%)	$\zeta$
قیمت پیشنهادی سوخت در لحظه $t$ (£/kWh)	$\pi_t^f$
مقدار میانگین وزنی سناریوهای عدم قطعیت $A$	$\mu_t^A$
ماکزیمم RLD+ / RLD- بین دو دوره متوالی برای تمامی دوره‌های زمانی (kW)	$k_\delta, k_t$
نرخ بین حداکثر RLD+ / RLD- و تقاضای ثابت NRL برای تمامی دوره‌های زمانی	$k_e, k_e$
متغیر باینری توان تقاضای انتقال‌پذیر در هر بازه زمانی	$X_t^{RLD-}$

## ۱- مقدمه

باید از امکان استفاده از شبکه بالادست، منابع کنترل ناپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی محلی خود بهره‌مند شوند تا با برآورده کردن توابع هدف تعریف‌شده برای بازیگران خود، مصرف‌کننده و تولیدکننده در بهترین شرایط عملکرد خود قرار گیرند. این وظیفه برعهده سیستم مدیریت انرژی‌ای گذاشته می‌شود که ضمن برآورده کردن قیود فنی و اقتصادی مربوط به هر منبع تولید و مصرف، بهترین گزینه را برای برقراری تعادل توان در شبکه قدرت برقرار کند [۳]-[۱۱]. برای دستیابی به این هدف، این مقاله با استفاده از نظریه بازی در جست‌وجوی راهی برای درک رفتار همکاریانه خریداران و فروشندگان الکتریسیته و کشف استراتژی‌هایی است که منجر به ماکزیمم کردن منفعت تمامی این بازیگران با اهداف متضاد در بازار رقابتی می‌شود. به تازگی، مقالات بسیاری برای مطالعه و مدل‌سازی رفتار شرکت‌کنندگان بازار الکتریسیته با استفاده از روش‌های نظریه بازی در زمینه‌هایی مانند برنامه‌ریزی انرژی و توان، بهره‌برداری اقتصادی و اجرای فرآیند تسویه بازار ارائه شده است [۱۲]-[۱۷]. تفاوت عمده کارهای صورت‌پذیرفته عمدتاً بر روی متدولوژی پیاده‌سازی شده، شبکه تحت مطالعه، کاربرد آن و نوع مدل بازار است. علاوه بر این، کار پژوهشی ارائه‌شده در این مقاله، ادامه مقالات ارائه‌شده نویسندگان بوده است [۳]-[۱۱]؛ به نحوی که منجر به ارائه چهارچوبی جامع برای بررسی تأثیرگذاری بازیگران مختلف با اهداف متضاد بر روی ساختار بازار شود. بازیگران در این ساختار، اهداف مشخص خود را دنبال می‌کنند و گاهی این اهداف با اهداف سایر بازیگران در تضاد است. به عبارت دیگر، درحالی که بازیگران تولیدکننده به دنبال افزایش سود شخصی خود (با افزایش قیمت الکتریسیته) هستند، بازیگران مصرف‌کننده به دنبال کاهش قیمت بازار هستند. به اختصار، در جدول (۱) تفاوت مقالات ارائه‌شده از نویسندگان و سایر مراجع از دیدگاه مدل‌سازی ریاضی، مدل بازار و الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. درخور ذکر است، مدل قبلی بار پاسخگوی ارائه‌شده از نویسندگان در این مقاله بهبود چشمگیری یافته است. در مدل بار پاسخگوی پیشنهادشده، علاوه بر تأثیرپذیری مدل از میزان توان تولیدشده از منابع، تأثیر قیمت تسویه بازار و میزان افزایش سود بازیگران نیز مدنظر قرار گرفته است.

تجدید ساختار صنعت برق و معرفی شبکه‌های هوشمند، باعث توسعه و استفاده بیشتر فن‌آوری‌هایی درخصوص منابع توزیع‌شده انرژی (DER) شده است. شبکه‌های هوشمند باید به نحوی طراحی شوند که پویایی بیشتری در ساختار و شرایط عملیاتی داشته باشند تا تولید متناوب انرژی با منابع کنترل‌ناپذیر و نوسانات ناشی از تقاضای بار را به بهترین شکل ممکن مدیریت کنند. ارائه تکنیک‌های مدیریت سمت تقاضا و مدیریت منابع ذخیره‌سازی انرژی پراکنده، از عناصر کلیدی در استقرار زیرساخت‌های هوشمند و پویا در شبکه‌های هوشمند سیستم قدرت هستند [۱]. از طرفی دیگر، شرکت‌های توزیع برای تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان، انرژی را از شبکه انتقال خریداری کنند. علاوه بر این، این شرکت‌های توزیع ممکن است بخواهند انرژی را از ریزشبکه‌های (MG) خانگی (که به شبکه متصل است) خریداری کنند. ممکن است MGهای مستقل مالکیتی مجزا داشته باشند؛ از این رو، هر یک از آن‌ها در راستای کسب سود بیشتر، خواهان فروش برق با قیمت بالاتری باشند. بنابراین، یکی از موضوع‌های کلیدی در این رابطه، چگونگی اتخاذ قیمت‌دهی مناسب برای انرژی تولیدشده از MGها و نحوه مشارکت آن‌ها در بازار خرده‌فروشی الکتریسیته است. ارائه سیستم مدیریت انرژی الکتریکی بر پایه منابع تولید کنترل‌ناپذیر می‌تواند راه‌حلی امیدبخش را برای تطبیق نفوذپذیری بالای این منابع با ویژگی تولید نامتناوب و فن‌آوری‌های شبکه هوشمند در حال توسعه، فراهم کند. در این ساختار، مصرف‌کنندگان نیز قادرند تا در بازار خرده‌فروشی الکتریسیته مشارکت کنند و برای حداکثرسازی سود خود با یکدیگر و دیگر بازیگران این ساختار رقابت کنند. در واقع، مصرف‌کنندگان تنها پذیرندگان قیمت نبوده‌اند؛ بلکه به همراه تأمین‌کنندگان برق از طریق بهره‌برداری‌های محلی و مدیریت تولیدکنندگان پراکنده، دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی و بارهای توزیع‌پذیر، خود نیز جزء پذیرندگان قیمت محسوب می‌شوند [۲]. در چنین ساختاری، MGها می‌توانند به عنوان بازیگران تولیدکننده و یا مصرف‌کننده در بازه‌های زمانی مختلف ایفای نقش کنند. MGها در رویارویی با تأمین تقاضای توان مربوط به خود

۷۲ مدیریت بهینه ریزشکبه‌های خانگی به همراه استراتژی هوشمند قیمت‌گذاری منابع تولید توزیع‌شده انرژی بر پایه روش نظریه بازی

## ۲- فلوچارت مربوط به ساختار پیشنهادشده

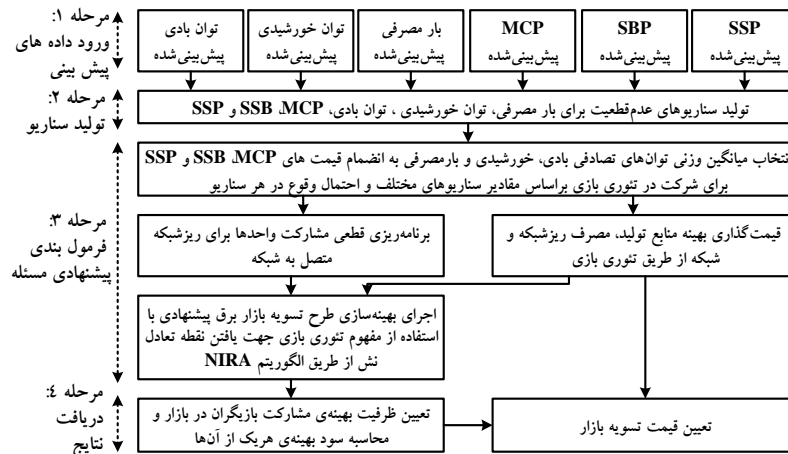
### برای پیوستن بازیگران به بازار

به صورت محلی دربرگیرنده منابع DER، شامل منابع کنترل‌ناپذیر، منابع کنترل‌پذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ES)، بارهای پاسخگو (RLD) و بارهای غیرپاسخگو (NRL) هستند که می‌توانند به‌طور مستقل و یا متصل به شبکه بالادست، بارهای محلی خود را تغذیه کنند. ساختار کلی پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است.

ساختار پیشنهادی بازار خرده‌فروشی الکتریسیته در این مقاله، راه‌حلی برای فراهم‌کردن سهم بالای مشارکت تولیدکنندگان پراکنده در کاهش قیمت تمام‌شده الکتریسیته و افزایش سود آن‌ها در کنار همکاری مؤثر و مداومشان با مصرف‌کنندگان ارائه می‌دهد. در ساختار MG‌های خانگی،

جدول (۱): تفاوت مقاله ارائه‌شده و مراجع دیگر

عنوان	مقاله ارائه‌شده	[۱۲]، [۱۳]	[۳]-[۱۱]
ساختار خانه سبز	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
پخش بار	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
مدل کارنو	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
مدل تابع عرضه	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
متغیر تصمیم‌گیری کمیت	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
متغیر تصمیم‌گیری قیمت پیشنهادی	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
عدم قطعیت پارامترهای عدم قطعیت	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
روش بهینه‌سازی قطعی	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
روش بهینه‌سازی تصادفی	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
مدیریت توان	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
مدیریت انرژی	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
برنامه‌ریزی مشارکت منابع	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
قیود شارژ و دشارژ باتری	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
هزینه شارژ باتری	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
مدل‌سازی بار پاسخگو	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
استراتژی قیمت‌گذاری	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
چندهدفه	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
نظریه بازی همکارانه	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
نظریه بازی غیرهمکارانه	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



شکل (۱): فرآیند پیاده‌سازی ساختار بازار پیشنهادشده

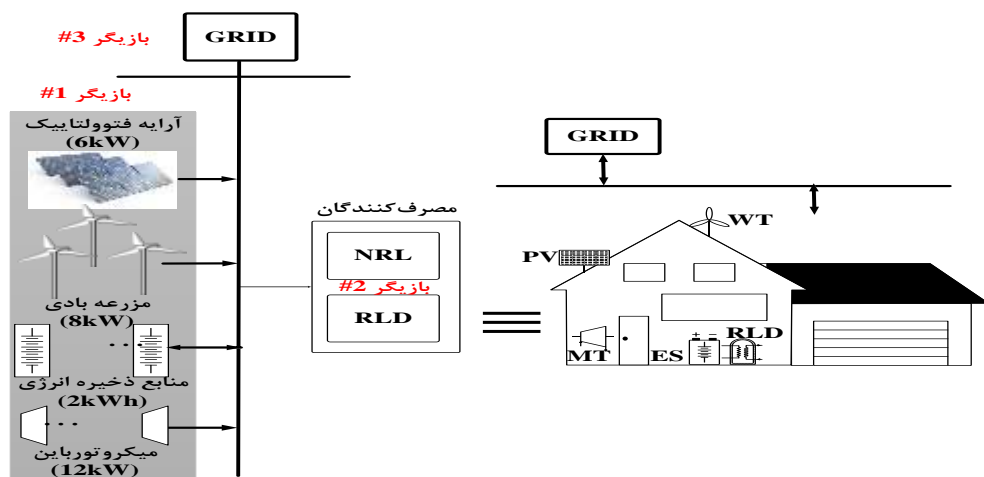
### ۳- شبکه قدرت تحت مطالعه

بار، WT و PV نیز از [۵]-[۷]، [۱۱] گرفته شده‌اند. مجموعه منابع تولید به‌عنوان بازیگر ۱، RLD به‌عنوان بازیگر ۲ و شبکه بالادست به‌عنوان بازیگر ۳ در نظر گرفته شده است. سناریوهای اعمال‌شده بر روی شبکه تحت مطالعه به شرح زیر انجام شده است: (حالت شارژ اولیه باطری (SOC) در تمامی سناریوها معادل ۵۰٪)

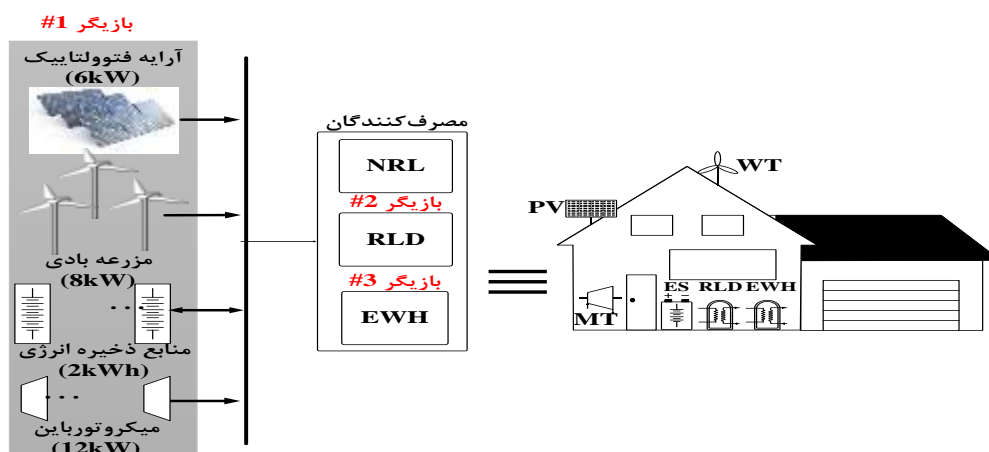
سناریوی #1: عملکرد نرمال؛ سناریوی #2: افزایش ناگهانی (به میزان ۱۰٪) در مقدار توان تولیدشده از منابع کنترل‌ناپذیر؛ سناریوی #3: کاهش ناگهانی (به میزان ۱۰٪) در مقدار توان تولیدشده از منابع کنترل‌ناپذیر و سناریوی #4: تغییر مد عملکرد از مد اتصال به شبکه به مد ایزوله‌شده.

به منظور تست قابلیت ساختار پیشنهادی، یک MG در تعامل با شبکه توزیع در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده است. مشخصات کل سیستم و اصول طرح کنترلی هر یک از DERها به‌طور مفصل در [۵]-[۷]، [۱۱] تشریح شده است. در شکل (۲) پیکربندی سیستم تحت مطالعه نشان داده شده است.

MG تحت مطالعه، دربرگیرنده مجموعه‌ای از منابع تولید شامل توربین بادی (WT)، فتوولتائیک (PV)، میکروتوربین (MT) و ذخیره‌کننده انرژی (ES) و نیز مصرف‌کنندگان شامل RLD و NRL است. داده‌های پیش‌بینی شده برای تقاضای



الف) مد اتصال به شبکه بالادست



ب) مد ایزوله‌شده

شکل (۲): شماتیک MG خانگی تحت مطالعه

#### ۴- پیاده‌سازی ریاضی مسئله

در این بخش، فرمول‌بندی ریاضی مسئله ارائه شده است. چهارچوب کلی ارائه شده به راحتی با دیگر سیستم‌های توزیع برق با سطوح بالای مشارکت مشتریان درخور بسط و تنظیم است.

#### ۴-۱- توابع هدف و قیود مسئله در مد اتصال به

##### شبکه

مؤلفه‌های کلیدی ساختار بازار پیشنهادی دربرگیرنده سه بازیگر شامل مجموعه‌های تولید (بازیگر #1) و مصرف (بازیگر #2) در MG و شبکه توزیع (بازیگر #3) هستند که توابع هدف و قیود مسئله برای هر یک از آن‌ها می‌تواند به صورت زیر تعریف شود.

#### ۴-۱-۱- تابع هدف

**بازیگر #1** منابع تولید در شبکه تحت مطالعه، متشکل از منابع کنترل‌پذیر (MT در این مطالعه)، کنترل‌ناپذیر (PV، WT) در این مطالعه و ES هستند. سود حاصل از مجموعه‌های تولید در ساعت  $t$ ام (یعنی  $J_t^i|_{i=1}$ ) می‌تواند به صورت رابطه زیر محاسبه شود:

$$\max J_t^i = R_t^i - C_t^i, t = \{1, 2, \dots, 24\}, i = 1 \quad (1)$$

$$R_t^i = \pi_t^{SBP} \times \left[ \sum_{l=1}^n P_t^l + \sum_{k=1}^{n'} P_t^k + P_t^{ES-} - P_t^n \right] \times \Delta t \quad (2)$$

در اینجا،  $n$  و  $n'$  به ترتیب بیانگر تعداد منابع تولید کنترل‌پذیر و کنترل‌ناپذیر هستند.

$$P_t^n = \mu_t^{NRL} = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_t^{NRL,s} \times P_t^{NRL,s}}{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_t^{NRL,s}} \quad (3)$$

$$C_t^i = \sum_{l=1}^n C_t^l + \sum_{k=1}^{n'} C_t^k + C_t^{ES+} + C_t^{MG+} + C_t^{RLD-} \quad (4)$$

$$C_t^l = \pi_t^l \times P_t^l \times \Delta t, C_t^k = \pi_t^k \times P_t^k \times \Delta t, C_t^{ES+} = \pi_t^{ES+} \times P_t^{ES+} \times \Delta t \quad (5)$$

هزینه خرید الکتریسیته از MG با رابطه زیر محاسبه

می‌شود:

$$C_t^{MG+} = \pi_t^{SSP} \times P_t^{MG+} \times \Delta t \quad (6)$$

$P_t^{MG+}$  مقدار توان لازم MG برای تأمین کمبود تولید الکتریسیته خود از طریق شبکه بالادست در بازه زمانی  $t$  است.

هزینه خرید بار انتقال‌پذیر ( $C_t^{RLD-}$ ) از MG با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_t^{RLD-} = \pi_t^{RLD-} \times P_t^{RLD-} \times \Delta t \quad (7)$$

در این مقاله  $\pi_t^{RLD-}$  با توجه به رابطه زیر در نظر گرفته شده است:

$$\pi_t^{RLD-} = \varepsilon \times \pi_t^{SSP} \quad (8)$$

در روابط ذکر شده، حد بالا و پایین قیمت‌های پیشنهادی منابع شرکت‌کننده در بازار باید در قیود زیر صدق کند:

$$MC_t^l \leq \pi_t^l \leq \mu_t^{MCP}, 0 \leq \pi_t^{k/ES+} \leq \mu_t^{MCP} \quad (9)$$

در رابطه بالا،  $MC_t^l$  هزینه حاشیه‌ای مربوط به منابع کنترل‌پذیر در لحظه  $t$  است که می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$MC_t^l = \pi_t^f \times \frac{P_t^l}{\xi} \quad (10)$$

$\pi_t^{SBP}$  و  $\pi_t^{SSP}$  نیز باید قیود زیر را برآورده کند:

$$0 \leq \pi_t^{SBP} \leq \mu_t^{SBP}, 0 \leq \pi_t^{SSP} \leq \mu_t^{SSP} \quad (11)$$

با توجه به وجود سناریوهای عدم قطعیت، قیمت الکتریسیته در بازار از مقدار میانگین وزنی سناریوها به عنوان حداکثر قیمت پیش‌بینی شده مجاز در قیود استفاده شده است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t^{SBP/SSP/MCP} = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_t^{SBP/SSP/MCP,s} \times \pi_t^{SBP/SSP/MCP,s}}{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_t^{SBP/SSP/MCP,s}} \quad (12)$$

**بازیگر #2** این بازیگر در بردارنده تقاضای بار پاسخگو و تقاضای بار درخور انتقال است. هدف حداقل کردن هزینه بهره‌برداری از طریق مدیریت بارهای درخور توزیع و افزایش درآمد از طریق انتقال تقاضا است که سود به دست آمده طبق رابطه (۱) برای  $i=2$  در ساعت  $t$ ام (یعنی  $J_t^i|_{i=2}$ ) محاسبه می‌شود و در این رابطه  $R_t^i$  و  $C_t^i$  به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

قیود ES دربردارنده: (۱) حدود انرژی ذخیره شده؛ (۲) ماکزیمم مقدار انرژی ذخیره شده شارژ / دشارژ و (۳) تعادل انرژی است [۵].

**بازیگر #2:** مقدار توان تقاضای انتقال پذیر ( $X_t^{RLD-} = 1$ ) و مقدار توان پاسخ تقاضا ( $X_t^{RLD-} = 0$ )، به ترتیب در هر بازه زمانی در روابط زیر صدق می کنند:

$$P_t^{RLD-} \leq k_e \times P_t^n \times X_t^{RLD-}, \quad (20)$$

$$-k_\delta \leq P_t^{RLD-} - P_{t-1}^{RLD-} \leq k_\delta$$

$$P_t^{RLD+} \leq k_e \times P_t^n \times (1 - X_t^{RLD-}), \quad (21)$$

**بازیگر #3:** به منظور تشویق MG در تولید و برآوردن توان لازم خود و مشارکت در بازار خرده فروشی، میزان ظرفیت مشارکت شبکه بالادست در خرید و فروش توان، منوط به برآورده شدن قیود زیر انتخاب می شود:

$$0 \leq P_t^{MG+/MG-} \leq \tilde{P}_t^{MG+/MG-} \quad (22)$$

در روابط بالا،  $\tilde{P}_t^{MG+}$  و  $\tilde{P}_t^{MG-}$  به ترتیب مقادیر حاصل از واحد برنامه ریزی مشارکت منابع در مواجهه با کمبود و مازاد تولید الکتریسته در ساعت  $t$ ام ( $kW$ ) هستند.

#### ۴-۲- توابع هدف و قیود مسئله در مد جزیره ای

مؤلفه های کلیدی بازار پیشنهادی، دربرگیرنده سه بازیگر شامل مجموعه های تولید (بازیگر #1) و مصرف (بازیگران #2 و #3) در MG هستند که توابع هدف و قیود مسئله برای هر یک از آن ها می تواند به صورت زیر تعریف شود.

#### ۴-۲-۱- تابع هدف

**بازیگر #1:** منابع تولید در شبکه تحت مطالعه، متشکل از منابع کنترل پذیر، کنترل ناپذیر و ES هستند.  $J_t^i$  طبق رابطه (۱) محاسبه می شود و در این رابطه در این رابطه  $R_t^i$  و  $C_t^i$  به ترتیب به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$R_t^i = ((\pi_t^{SBP} \times P_t^{RLD+}) + (\pi_t^{EWH} \times P_t^{EWH})) \times \Delta t \quad (23)$$

$$C_t^i = \sum_{l=1}^n C_t^l + \sum_{k=1}^{n'} C_t^k + C_t^{ES+} + C_t^{RLD-} \quad (24)$$

تأمین تقاضای بار EWH بر عهده تولیدات MG است. در این مقاله  $\pi_t^{EWH}$  (قیمت بهینه فروش الکتریسته توسط MG به بازیگر EWH) با توجه به رابطه زیر در نظر گرفته

$$R_t^i = \pi_t^{RLD-} \times P_t^{RLD-} \times \Delta t \quad (13)$$

$$C_t^i = \pi_t^{SBP} \times P_t^{RLD+} \times \Delta t \quad (14)$$

$P_t^{RLD+}$  مقدار تقاضای بار RLD در لحظه  $t$  است که تأمین آن بر عهده تولیدات MG بوده است و اگر MG در این امر با کمبود مواجه شود، باید نیاز خود را با خرید از شبکه پوشش دهد.

**بازیگر #3:** این مجموعه در برگیرنده میزان مشارکت شبکه توزیع در خرید توان مازاد از MG و نیز فروش توان به MG، در صورت رویارویی با کمبود است. سود حاصل از تبادل توان شبکه توزیع در ساعت  $t$ ام طبق رابطه (۱) برای  $i=3$  (یعنی  $J_t^i|_{i=3}$ ) محاسبه می شود و در این رابطه  $R_t^i$  و  $C_t^i$  به ترتیب به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$R_t^i = \pi_t^{SSP} \times P_t^{MG+} \times \Delta t \quad (15)$$

$$C_t^i = \pi_t^{SBP} \times P_t^{MG-} \times \Delta t \quad (16)$$

در این رابطه،  $P_t^{MG-}$  مقدار توان مازادی است که شبکه توزیع در ساعت  $t$ ام و برحسب  $kW$  برای برقراری قیود تعادل توان و تشویق MG برای تولید بیشتر و نیز مشارکت در بازار خرده فروشی و تبادل با یکدیگر، بر پایه پیشنهاد قیمت  $\pi_t^{SBP}$  از MG خریداری می کند.

هر یک از بازیگران ذکر شده تصمیمات خود را بسته به قیود فنی و کلی اتخاذ می نمایند که در ادامه توضیح داده شده است.

#### ۴-۱-۲- قیود محلی و کلی

قیود تعادل:

$$\sum_{l=1}^n P_t^l + \sum_{k=1}^{n'} P_t^k + P_t^{ES-} + P_t^{MG+} = P_t^n + P_t^{ES+} + P_t^{RLD+} - P_t^{RLD-} + P_t^{MG-} \quad (17)$$

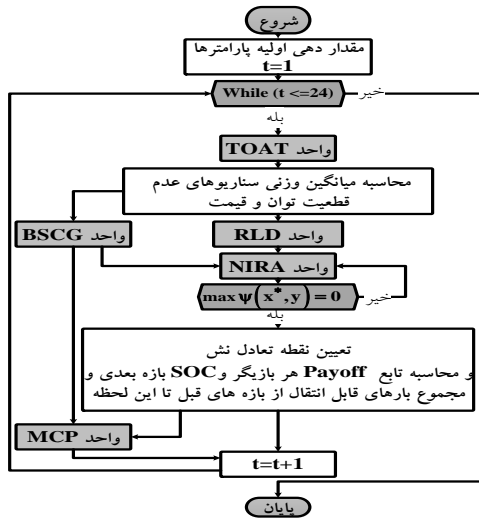
**بازیگر #1:** منابع تولید MG تحت شرایط زیر بهره برداری می شود:

$$\underline{P}_t^l \leq P_t^l \leq \bar{P}_t^l, 0 \leq P_t^k \leq \mu_t^k, \forall t \quad (18)$$

$$\mu_t^k = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_t^{k,s} \times P_t^{k,s}}{\sum_{s=1}^{N_s} \rho_t^{k,s}}, \forall k \quad (19)$$

۷۶ مدیریت بهینه ریزشکبه‌های خانگی به همراه استراتژی هوشمند قیمت‌گذاری منابع تولید توزیع‌شده انرژی بر پایه نظریه بازی

شده است: به نام‌های واحد TOAT، واحد RLD، واحد BSCG، واحد NIRA و واحد MCP تشکیل شده است. شبه کد مربوطه در الگوریتم ۱ ارائه شده است.



شکل (۳): الگوریتم پیشنهادشده برای پیاده‌سازی REM-

### NIRA

الگوریتم ۱: شبه کد مربوط به الگوریتم REM-

#### NIRA

(۱) شروع

(۲) مقداردهی اولیه پارامترها

While  $t \leq 24$

(۳) واحد TOAT

- تولید سناریوهای تصادفی توان و قیمت با احتمال وقوع مربوطه از طریق الگوریتم تاگوچی.

(۴) واحد میانگین وزنی

- محاسبه میانگین وزنی متغیرهای عدم قطعیت توان و قیمت ((۳)، (۱۲) و (۱۹)).

(۵) واحد RLD

- اجرای برنامه‌ریزی مشارکت منابع، تعیین مقدار ظرفیت مشارکت منابع تولید / مصرف / شبکه، تعیین متغیر باینری  $X_t^{RLD-}$  و  $X_t^{ES+}$ .

(۶) واحد BSCG

- اجرای نظریه بازی همکارانه برای تعیین قیمت‌های بهینه تأمین / خرید / فروش انرژی از منابع تولید / مصرف MG و شبکه.

$$\pi_t^{EWH} = \sigma \times \pi_t^{SBP} \quad (25)$$

$\sigma$  در این رابطه بیانگر مقدار ثابتی کوچکتر از ۱ است. بازیگر #۲ این بازیگر دربردارنده تقاضای پاسخگو و تقاضای درخور انتقال است.  $J_t^i|_{i=2}$  مانند مد متصل به شبکه محاسبه می‌شود.

بازیگر #۳ این بازیگر دربردارنده بار مصرفی EWH بوده است و هدف، حداقل کردن هزینه بهره‌برداری آن است که در ساعت  $t$  ام می‌تواند به صورت رابطه زیر محاسبه شود:

$$\min J_t^i = \pi_t^{EWH} \times P_t^{EWH} \times \Delta t, i = 3 \quad (26)$$

هر یک از بازیگران ذکرشده تصمیمات خود را بسته به قیود فنی و کلی سیستم می‌گیرند.

۴-۲-۲- قیود محلی و کلی

قید تعادل:

$$\sum_{l=1}^n P_t^l + \sum_{k=1}^{n'} P_t^k + P_t^{ES-} = P_t^n + P_t^{ES+} + P_t^{RLD+} - P_t^{RLD-} + P_t^{EWH} \quad (27)$$

بازیگر #۱ MG منابع تولید خود را در مد جزیره‌ای نیز مانند مد متصل به شبکه بهره‌برداری می‌کند.

بازیگر #۲ مقادیر مجاز این بازیگر در مد جزیره‌ای نیز مانند مد متصل به شبکه است.

بازیگر #۳ مقدار تقاضای تغذیه‌شده EWH در هر بازه زمانی ( $X_t^{RLD-} = 1$ ) منوط به برآورده شدن قیود زیر انتخاب می‌شود:

$$0 \leq P_t^{EWH} \leq \tilde{P}_t^{EWH} \times (1 - X_t^{RLD-}), P_t^{EWH} \leq P_t^{RLD+} \quad (28)$$

در روابط بالا،  $\tilde{P}_t^{EWH}$  مقدار حاصل از واحد برنامه ریزی مشارکت منابع در تأمین EWH در ساعت  $t$  ام ( $kW$ ) است.

### ۵- پیاده‌سازی الگوریتم REM-NIRA

فلوچارت پیشنهادشده برای پیاده‌سازی الگوریتم REM-NIRA در شکل (۳) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، این فلوچارت از پنج واحد اصلی



تاگوچی به دلیل برآورد تأثیر عوامل بر پاسخ میانگین و تغییرات از آرایه‌های متعامد استفاده می‌کنند. یک آرایه متعامد به معنی متعادل بودن طرح است؛ به طوری که سطوح فاکتور از وزن‌دهی یکسانی برخوردارند. به همین دلیل، می‌توان هر عامل را مستقل از سایر عوامل ارزیابی کرد؛ زیرا اثر یک عامل بر تخمین یک عامل متفاوت دیگر تأثیری ندارد. چگونگی انتخاب ماتریس آرایه‌های متعامد و توضیحات مفصل‌تر در خصوص روش تاگوچی به تفصیل در [۸]، [۲۵] شرح داده شده است. این واحد برای لحاظ کردن عدم قطعیت مربوط به تقاضای بار و تأثیر تغییر شرایط محیطی بر روی توان تولیدشده از منابع تجدیدپذیر و نیز قیمت‌های تأمین و تبادل الکتریسته در بازار با استفاده از روش TOAT پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۰] از روش TOAT برای به‌دست‌آوردن راه‌حل‌های قوی در مسائل آزمایشی طراحی تولید استفاده شده است. در بهره‌برداری با عدم قطعیت، TOAT با حداقل تعداد سناریو تضمین می‌کند که سناریوهای آزمایشی در نظر گرفته شده، اطلاعات آماری خوبی را ارائه می‌دهند و به‌طور چشمگیری تعداد تست را کاهش می‌دهد [۲۰]، [۲۶]. برای مدل‌های مختلفی ثابت شده است که از بین تمامی سناریوهای ممکن، TOAT توانایی انتخاب سناریوی بهینه را دارد [۲۵]. در مقایسه با روش مونت کارلو، TOAT سناریوهای تست بسیار کمتری ارائه می‌دهد و منجر به کاهش زمان محاسبات می‌شود [۲۶]. این روش قابلیت خود به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی برای حل مسئله پخش بار و مسائل توزیع اقتصادی توان در سیستم‌های قدرت را به اثبات رسانده است [۲۰]. عدم قطعیت‌های موجود در مسئله مطرح‌شده با سناریوهای ایجادشده مطابق با فلوچارت شکل (۴) پیاده‌سازی شده است. ساختار پیشنهادشده شامل سه مرحله اصلی به شرح زیر است:

مرحله ۱: انتخاب ماتریس متعامد با توجه به تعداد عدم قطعیت‌های موجود در سیستم؛

مرحله ۲: ایجاد  $n$  مقدار برای تقاضای بار، MCP،

## ۷) تعریف بردار شروع با توجه به نتایج گام ۵

### ۸) واحد NIRA

- تعریف پارامترهای لازم الگوریتم REM-NIRA؛
- تعریف توابع هدف بازیگران؛
- بررسی قیود بازیگران.
- تشکیل تابع نیکایدو - ایزودا [۱۲] و [۱۳]؛
- محاسبه نقطه نش با رعایت قیود [۱۲] و [۱۳]؛
- پیشینه‌سازی تابع نیکایدو - ایزودا و تشکیل تابع پاسخ بهینه [۱۲] و [۱۳]؛
- اعمال الگوریتم رهاسازی و بهبود تابع پاسخ بهینه تا برقراری شرط توقف [۱۲] و [۱۳]؛
- تعیین داده‌های خروجی، نقطه تعادل نش، سود بازیگران و SOC بازه بعدی.

## ۹) تعیین قیمت تسویه بازار

### پایان حلقه While

## ۱۰) پایان

واحدهای NIRA و MCP در [۱۲] به تفصیل توضیح داده شده‌اند. به دلیل خارج‌بودن این واحدها از اسکوپ این مقاله، در ادامه تنها واحدهای TOAT، RLD و BSCG شرح داده شده است.

## ۵-۱- واحد TOAT

برای پیاده‌سازی عدم قطعیت می‌توان از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده کرد؛ ولی حجم زیاد محاسبات و نیاز به اعمال سناریوهای زیاد از معایب این روش محسوب می‌شود [۱۸]، [۱۹]. در صورتی که روش تاگوچی، تعداد سناریوهای کمتری را بررسی کرده است و به کاهش حجم محاسبات و در نتیجه کاهش چشمگیری در زمان در مقایسه با روش مونت کارلو منجر می‌شود [۲۰]. علاوه بر این، روش نظریه تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی در [۲۱] برای اعمال عدم قطعیت بررسی شده است. ساختارهایی بر مبنای مدل‌سازی فازی و مبتنی بر سناریو نیز در مراجع [۲۲]-[۲۴] ارائه شده است. طرح‌های

۷۸ مدیریت بهینه ریزشکته‌های خانگی به همراه استراتژی هوشمند قیمت‌گذاری منابع تولید توزیع‌شده انرژی بر پایه روش نظریه بازی

منابع وابسته بوده است؛ با این وجود، مدل RLD پیشنهادی هم به مقادیر MCP، توان تولیدی و به میزان سود کسب‌شده بازیگران نیز حساس است. در هر بازه زمانی ابتدا مقدار MCP که عدم قطعیت نیز بر روی آن اعمال شده است، بررسی می‌شود. اگر چنانچه مقدار MCP نسبت به نقطه تنظیم بزرگ باشد، الگوریتم، متناسب با وضعیت تولید منابع کنترل‌ناپذیر و نیز NRL مبادرت به انتقال بخشی از بار طبق قیود تعریف‌شده می‌کند. اگر چنانچه مقدار MCP کوچک باشد، در این صورت، متناسب با مقدار توان تولیدشده از منابع کنترل‌ناپذیر، سه حالت ممکن است رخ دهد. حالت‌های رخ داده می‌تواند به شرح زیر باشد:

۱- مقدار کل توان تولیدی برابر با مقدار کل توان مصرفی باشد؛

۲- مقدار کل توان تولیدی بیشتر از مقدار کل توان مصرفی باشد؛

۳- مقدار کل توان تولیدی کمتر از مقدار کل توان مصرفی باشد.

الگوریتم، متناسب با هر یک از حالت‌های رخ داده، استراتژی‌هایی مطابق با فلوجارت ارائه‌شده در شکل (۵) اتخاذ می‌کند.

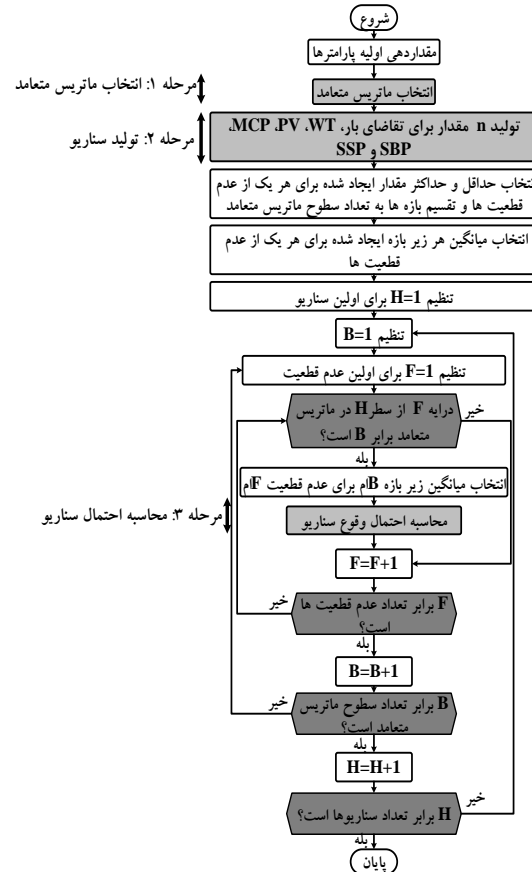
### ۵-۳- واحد BSCG

به‌منظور تعیین پیشنهاد قیمت‌های ارائه‌شده از شرکت‌کنندگان در بازار پیشنهادی، درخصوص تأمین، خرید و فروش الکتروسیته از واحد استراتژی قیمت‌گذاری بر پایه بازی همکارانه (BSCG) استفاده شده است. تعادل نش در این واحد، بیانگر استراتژی‌های ماکزیمم / مینیمم برای مشارکت‌کنندگان در بازار است؛ یعنی منفعت واقعی برای هر بازیگر تولیدکننده باید در یک بازی همکارانه، ماکزیمم شود؛ درحالی‌که هزینه عملکرد شبکه تحت مطالعه در یک بازی غیرهمکارانه باید مینیمم شود [۳۲].

قیمت‌گذاری برای  $n$  بازیگر مشارکت‌کننده در بازار با  $m$  استراتژی در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود،  $S_m^G$  بیانگر استراتژی  $m$ ام برای بازیگر مشارکت‌کننده  $m$ ام است.  $S_m^G$  نیز بیانگر

SBP و SSP با استفاده از تابع توزیع نرمال [۲۷]، [۲۸]، برای WT با استفاده از تابع توزیع ویبول [۲۹]، [۳۰] و برای PV با استفاده از تابع تابش [۳۱]؛

مرحله ۳: محاسبه احتمال وقوع سناریو ایجادشده با استفاده از توابع توزیع مربوط به قیمت الکتروسیته، بار، WT و تابع تابش مربوط به PV.



شکل (۴): واحد عدم قطعیت بر پایه روش TOAT

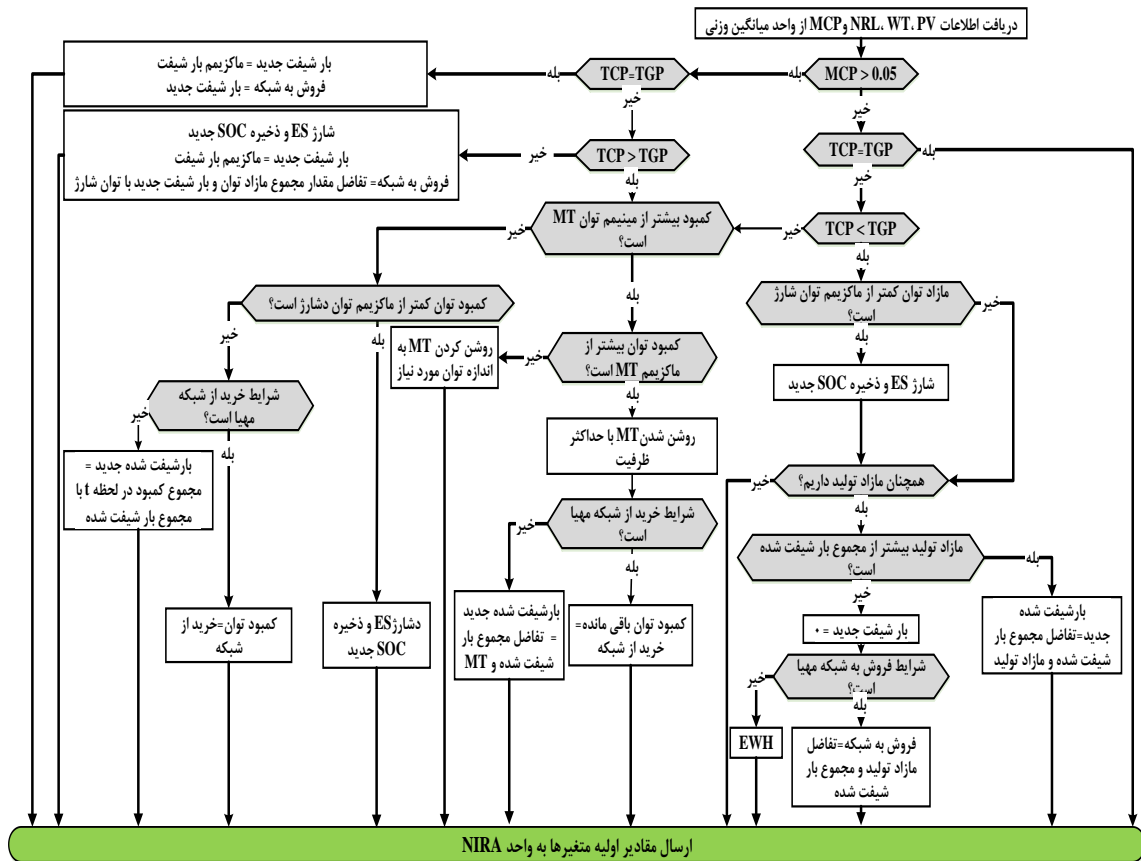
### ۵-۲- واحد RLD

برای تعیین نقطه تنظیم توان مربوط به منابع تولید و مصرف از الگوریتم RLD مطابق شکل (۵) استفاده شده است. درحقیقت این واحد برای هر حوزه انرژی مبتنی بر مقادیر میانگین وزنی سناریوهای عدم قطعیت واحد TOAT (منابع کنترل‌ناپذیر، NRL و MCP)، مقادیر اولیه را برای تمامی متغیرهای تعریف‌شده براساس قیود فنی و اقتصادی مربوط به هر المان برای واحد NIRA تعیین می‌کند.

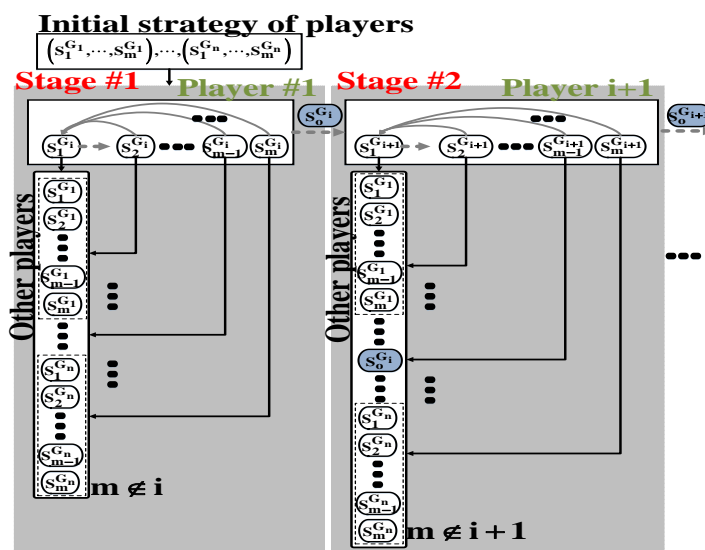
هرچند در [۵]–[۱۱] مدل RLD تنها به مقدار توان تولید

ساختارهایی با تعداد بسیار زیادی بازیگر می‌توان از روش‌های پردازش موازی برای کاهش زمان محاسبه استفاده کرد. عملکرد این واحد بر پایه نظریه بازی مطابق با فلوجارت شکل (۷) برای  $n$  بازیگر سیستم قدرت پیاده‌سازی شده است. با اجرای این واحد بر پایه مقادیر میانگین وزنی سناریوهای عدم قطعیت ( $\mu_4^{MCP}$ ,  $\mu_4^{SBP}$  و  $\mu_4^{SSP}$ )، می‌توان قیمت‌های بهینه را تعیین کرد. چهارچوب پیشنهادی درخور استفاده برای یافتن تعادل نش در بازی‌های اطلاعات ناکامل با در نظر گرفتن قیود بازیگران است. به محض اینکه توابع منفعت بازیگران برای تمامی استراتژی‌ها اجرا شود، بهترین استراتژی هر بازیگر برای تعیین بهترین استراتژی دیگر بازیگران در مرحله بعدی استفاده می‌شود. بهترین مجموعه استراتژی بازیگران بیانگر تعادل نش است.

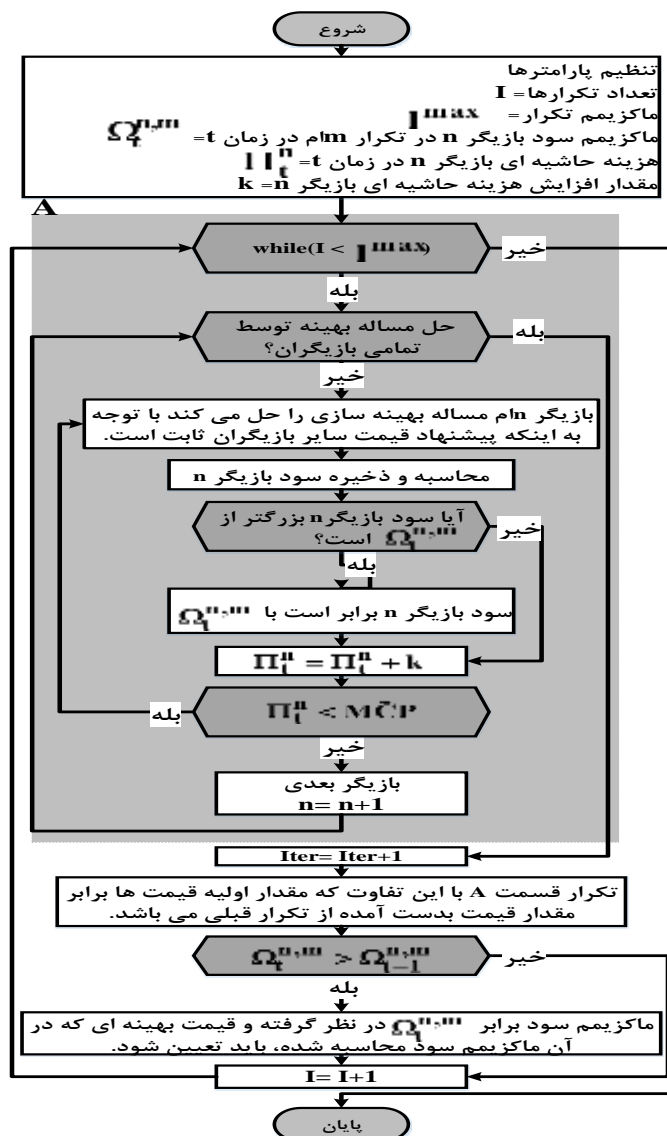
استراتژی بهینه بازیگر  $n$  ام است. در مرحله #1 استراتژی بهینه هر مشارکت‌کننده بازار با ثابت نگه‌داشتن استراتژی سایر بازیگران تعیین می‌شود. نقطه تعادل نش برای بازیگران به‌وسیله استراتژی‌های بهینه‌شان برای ماکزیم کردن توابع منفعت متناظر این استراتژی تعریف می‌شود. در مراحل بعدی، استراتژی بهینه به‌دست آمده برای یک بازیگر در مرحله قبلی برای سایر بازیگران استفاده می‌شود. پیچیدگی محاسباتی به تعداد مشارکت‌کنندگان در بازار و استراتژی‌های آن‌ها وابسته است. مقیاس مسئله به‌صورت نمایی می‌تواند با افزایش تعداد بازیگران، افزایش پیدا کند. از آنجایی که توابع منفعت بازیگران در هر مجموعه از استراتژی‌های انتخاب‌شده، مستقل از مجموعه استراتژی‌های دیگر بازیگران است، بنابراین، توابع منفعت می‌تواند با استفاده از پردازش موازی محاسبه شود؛ در نتیجه، برای



شکل (۵): فلوجارت پیاده‌سازی شده برای مدل‌سازی RLD



شکل (۶): فلوچارت پیاده‌سازی شده برای مدل‌سازی



شکل (۷): واحد BSCG

منظور از  $\Pi_n'$  در شکل (۷) هزینه نهایی بازیگر  $n$  ام است.  $\Pi_n'$  از طریق اجرای مکرر نظریه بازی با گام  $k$  در محدوده مجاز قیمت‌های الکتروسیته تعیین می‌شود که در بخش فرمول‌بندی ریاضی مسئله مشخص شده‌اند. در این فرایند با محاسبه سود بازیگر  $n$  در هر تکرار و مقایسه آن با تکرار قبلی، قیمت بهینه منابع برای تأمین و تبادل الکتروسیته مشخص می‌شود.  $\mu^{MCP}$  حد بالای محدوده مجاز قیمت بازیگر  $n$  ام است. به‌طور خلاصه، مراحل اجرای الگوریتم به شرح زیر است:

- ۱- ثابت نگه داشتن استراتژی تمامی بازیگران در مقدار مینیمم قیمت پیشنهادی و یافتن ماکزیمم مقدار تابع منفعت یک بازیگر با توجه به استراتژی انتخاب‌شده؛
- ۲- تغییر استراتژی بازیگر مربوطه به‌همراه ثابت نگه داشتن استراتژی دیگر بازیگران و محاسبه مقدار تابع منفعت بازیگر مربوطه در هر مرحله؛
- ۳- تعیین استراتژی با ماکزیمم مقدار منفعت به عنوان استراتژی بهینه برای بازیگر مربوطه؛
- ۴- تکرار آیت‌های ۱-۳ برای تمامی بازیگران.

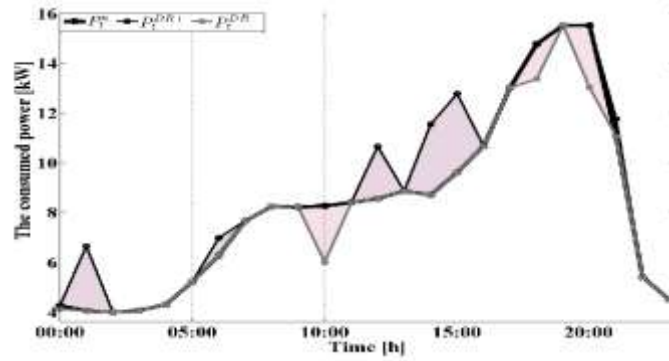
## ۶- بحث و بررسی نتایج

در شکل (۸) مقدار توان انتقال داده‌شده و RLD در هر بازه زمانی تحت سناریوهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۸) الف تا د مشاهده می‌شود، عمدتاً در ساعات پایانی روز که مقدار MCP بزرگ‌تر از بقیه بازه‌های زمانی است (مطابق شکل ۱۰)، الگوریتم، مقداری از بار مصرفی را به بازه‌های دیگر انتقال داده است. همچنین در بازه‌هایی که مقدار MCP کمتر از مقدار پیش‌بینی‌اش تحت عدم قطعیت باشد، الگوریتم سعی کرده است مقداری RLD در این بازه‌ها تغذیه شود. همان‌طور که از شکل (۸) الف مشاهده می‌شود، به میزان چشمگیری مقدار RLD افزایش یافته است. در سناریوی #3 با توجه به کاهش مقدار توان تولیدشده از منابع کنترل‌ناپذیر، مقدار RLD نیز کاهش درخور توجهی کرده است. در سناریوی #4، با توجه به عدم حضور شبکه بالادست، مقدار توان انتقال داده‌شده تقریباً با

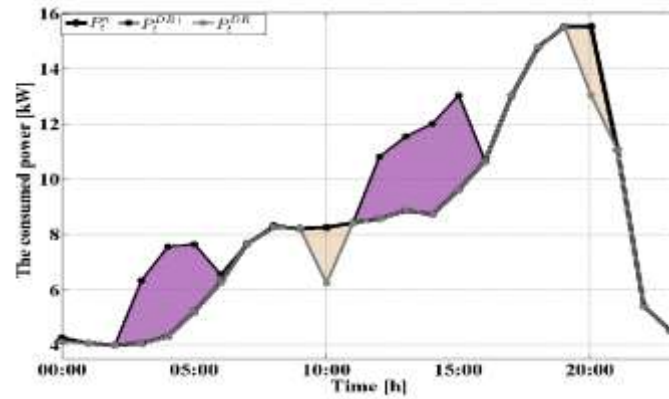
مقدار توان RLD معادل است.

مقدار تابع منفعت برای تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و شبکه بالادست در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، در تمامی سناریوها (به‌جز سناریوی #4) مقدار توابع منفعت برای تمامی بازیگران منفی شده است. در سناریوی #2 ضمن افزایش مقدار توان تولیدی منابع کنترل‌ناپذیر، بازیگران تولیدکننده ضرر کمتری را متقبل می‌شوند. در عوض مصرف‌کنندگان به‌دلیل افزایش توان مصرفی RLD باید بهای بیشتری را برای تأمین توان لازم خود پرداخت کنند. در سناریوی #3 با کاهش میزان توان تولیدی کنترل‌ناپذیر، بازیگران تولیدکننده باید میزان توان درخواستی منابع مصرف را از طریق منابع کنترل‌پذیر و یا شبکه سراسری تأمین کنند که قیمت پیشنهادی آن‌ها به مراتب بالاتر از قیمت پیشنهادی منابع کنترل‌ناپذیر است؛ بنابراین، مقدار هزینه بیشتری را منابع تولید باید برای تأمین توان لازم صرف کنند. در این سناریو، از آنجایی که منابع مصرف، کاهش یافته است (با کاهش توان RLD)، در نتیجه مقدار هزینه مصرف‌کنندگان نیز کاهش محسوسی کرده است. در سناریوی #4 شبکه در شرایط عملکرد ایزوله است؛ بنابراین تابع منفعت بازیگران تولیدکننده مثبت شده است و بازیگران مصرف‌کننده نیز باید بهای بیشتری را برای تأمین توان لازم خود، با توجه به حضورنداشتن شبکه بالادست پرداخت کنند. در شکل (۱۰) مقدار MCP در هر بازه زمانی تحت سناریوهای مختلف ارائه شده است.

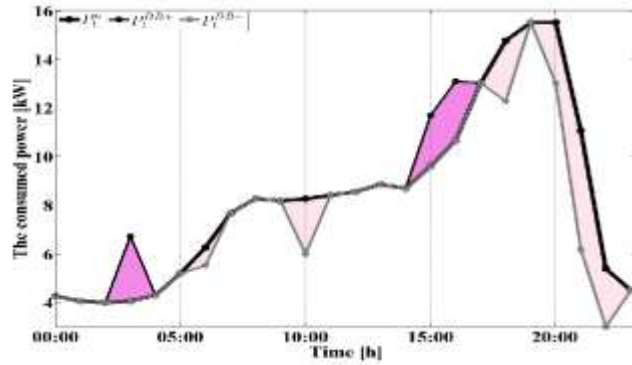
$\lambda_1''$  و  $\lambda_1'$  به ترتیب مقدار MCP پیش‌بینی و مقدار آن با اعمال عدم قطعیت هستند. درخور ذکر است، مقدار  $\lambda_1''$  به واحد BSCG ارسال شده است و به‌منظور تعیین پارامترهای دیگر استفاده می‌شود. تحت سناریوهای #1 تا #4 به ترتیب به میزان ۱۲٫۵٪، ۷۵٪، ۷۱٪ و ۴۲٪ از بازه‌های زمانی مقدار MCP به‌دست‌آمده از مقدار  $\lambda_1''$  کمتر شده است. این موضوع نشان‌دهنده عملکرد مناسب واحد BSCG در تعیین پیشنهاد قیمت بهینه منابع تولید است.



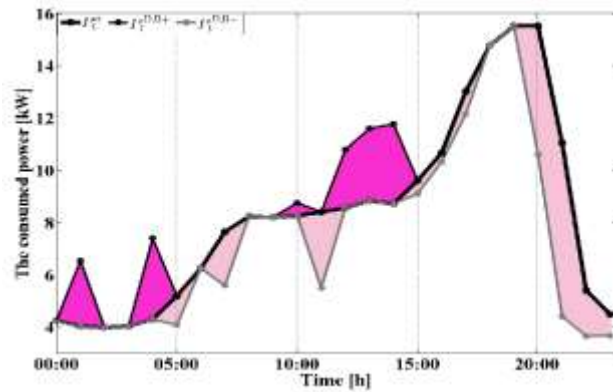
الف) سناریوی #1



ب) سناریوی #2

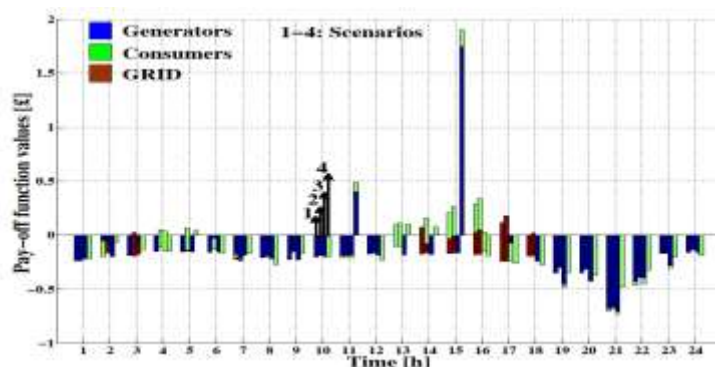


ج) سناریوی #3

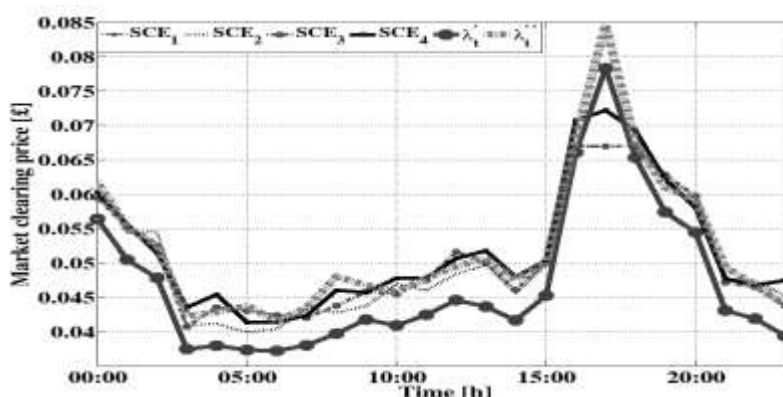


د) سناریوی #4

شکل (۸): مقدار بار RLD+ و RLD- تحت سناریوهای اعمال شده



شکل (۹): مقدار تابع منفعت برای تولیدکنندگان، مصرف کنندگان و شبکه بالادست تحت سناریوهای مختلف



شکل (۱۰): مقدار MCP در هر بازه زمانی برای سناریوهای مختلف

## ۷- نتیجه گیری

مشارکت بازیگران با قابلیت ارائه استراتژی‌های متعدد در ساختار بازار پیشنهادی، در راستای ارائه پیشنهاد قیمت‌های بهینه هر بازیگر در بازار خرده فروشی الکتریسیته، برپایه ماکزیمم سود اخذشده توسط آن‌ها ارائه شده است.

در این مقاله، یک ساختار جدید برای پیاده‌سازی بازار خرده‌فروشی الکتریسیته با ضریب نفوذ بالای مشارکت MGهای متشکل از تولیدات منابع کنترل‌پذیر، کنترل‌ناپذیر و ES پیشنهاد شده است. ساختار ارائه‌شده براساس الگوریتم رهاسازی و با کمک تابع نیکابود - ایزودا و بر مبنای نظریه بازی غیرهمکارانه استوار است. مشتریان در اینجا فقط مصرف‌کنندگان برق نیستند، بلکه می‌توانند از طریق بهره‌برداری محلی، مدیریت DERها، ESها و بارهای RLD خود، جزء تأمین‌کنندگان برق نیز باشند. در ساختار ارائه‌شده از یک‌سو، انگیزه‌های تشویقی برای منابع DER در جهت تأمین بار و همکاری با یکدیگر برای اخذ سود بیشتر و از سوی دیگر، برای مصرف‌کنندگان برای همکاری با یکدیگر به منظور کاهش هزینه الکتریسیته، فراهم شده است. همچنین در این مقاله مکانیزمی بر مبنای تابع عرضه برای پیاده‌سازی استراتژی قیمت‌گذاری به‌منظور

## مراجع

- [1] F. Mangiatordi, E. Pallotti, P. Del Vecchio, "A non cooperative game theoretic approach for energy management in MV grid", in Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 13th International Conference on , pp. 266–271, 2013.
- [2] R. Takahashi, T. Ishiwatari, "Preparation of helical gold nanowires on surfactant tubules", Chem. Commun. (Camb), Vol. 164, No. 12, pp. 1406–1407, 2004.
- [3] F. Azarinejadian, S. M. Mirhosseini-Moghaddam, M. Marzband, N.Parhizi, " Optimal energy management system in grid connected Microgrid integrated with distributed generation by using the multi-period artificial bee colony ", Intelligent Systems in Electrical Engineering, Vol. 5, No. 3, pp 1-14, Autumn 2014.
- [4] N. Parhizi, M. Marzband, S. M. Mirhosseini-Moghaddam, F. Azarinejadian, B. Mohamadi-

- 9, No. 1, pp. 90–97, 2014.
- [16] J. P. Molina, J. M. Zolezzi, J. Contreras, H. Rudnick, M. J. Reveco, "Nash-cournot equilibria in hydrothermal electricity markets", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 3, pp. 1089–1101, 2011.
- [17] J. Krawczyk, "Numerical solutions to coupled-constraint (or generalised Nash) equilibrium problems", *Comput. Manag. Sci.*, Vol. 4, No. 2, pp. 183–204, 2007.
- [18] A. Soroudi, R. Caire, N. Hadjsaid, M. Ehsan, "Probabilistic dynamic multi-objective model for renewable and non-renewable distributed generation planning", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 5, No. 11, pp. 1173–1182, 2011.
- [19] A. Soroudi, *Taxonomy of Uncertain Modeling Techniques in Renewable Energy System Studies*. Springer Singapore, 2015.
- [20] B. Alizadeh, S. Jadid, "Uncertainty handling in power system expansion planning under a robust multi-objective framework", *Gener. Transm. Distrib. IET*, Vol. 8, No. 12, pp. 2012–2026, 2014.
- [21] B. Mohammadi-Ivatloo, H. Zareipour, N. Amjady, M. Ehsan, "Application of information-gap decision theory to risk-constrained self-scheduling of GenCos", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 28, No. 2, pp. 1093–1102, 2013.
- [22] A. Soroudi, M. Ehsan, R. Caire, N. Hadjsaid, "Possibilistic evaluation of distributed generations impacts on distribution networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 4, pp. 2293–2301, 2011.
- [23] A. Soroudi, "Possibilistic-scenario model for DG impact assessment on distribution networks in an uncertain environment", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 27, No. 3, pp. 1283–1293, 2012.
- [24] S. M. Mohseni-Bonab, A. Rabiee, B. Mohammadi-Ivatloo, "Voltage stability constrained multi-objective optimal reactive power dispatch under load and wind power uncertainties: A stochastic approach", *Renew. Energy*, Vol. 85, pp. 598–609, 2016.
- [25] H. Yu, C. Y. Chung, K. P. Wong, "Robust transmission network expansion planning method with Taguchi's orthogonal array testing", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 3, pp. 1573–1580, 2011.
- [26] R. Chatthaworn, S. Chaitusaney, "Transmission network expansion planning considering renewable energy target with Taguchi's orthogonal array testing", *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, Vol. 9, No. 6, pp. 588–599, 2014.
- [27] M. Fotuhi-Firuzabad, M. Rastegar, A. Safdarian, F. Aminifar, R. Billinton, A. Bonaert, A. Koivo, "Probabilistic Home Load Controlling Considering Plug-in Hybrid Electric Vehicle Uncertainties", 5th Ed., Vol. 1, No. 4. Springer India, 2014.
- [28] R. Billinton, A. Bonaert, A. Koivo, "Power System Reliability Evaluation", 5th Ed., Vol. 1, No. 4. New York: Gordon and Breach, 1971.
- [29] A. R. Daniel, A. A. Chen, "Stochastic simulation and forecasting of hourly average wind speed sequences in Jamaica", *Solar Energy*, Vol. 46, No. 1, pp. 1–11, 1991.
- [30] B. S. Borowy, Z. M. Salameh, "Optimum Ivatloo, "Optimal energy management system implementation in power networks with multiple Microgrids by using multi-period imperialist competition", *Intelligent Systems in Electrical Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 49–66, Spring 2015.
- [5] M. Marzband, A. Sumper, J. L. Domínguez-García, R. Gumara-Ferret, "Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and MINLP", *Energy Convers. Manag.*, Vol. 76, pp. 314–322, 2013.
- [6] M. Marzband, A. Sumper, A. Ruiz-álvarez, J. L. Domínguez-García, B. Tomoiagã, "Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone microgrids in day-ahead markets", *Appl. Energy*, Vol. 106, pp. 365–376, 2013.
- [7] M. Marzband, M. Ghadimi, A. Sumper, J. L. Domínguez-García, "Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode", *Appl. Energy*, Vol. 128, pp. 164–174, 2014.
- [8] M. Marzband, N. Parhizi, M. Savaghebi, J. M. Guerrero, "Distributed Smart Decision-Making for a Multimicrogrid System Based on a Hierarchical Interactive Architecture", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 31, No. 2, pp. 637–648, 2016.
- [9] M. Marzband, E. Yousefnejad, A. Sumper, J. L. Domínguez-García, "Real time experimental implementation of optimum energy management system in standalone Microgrid by using multi-layer ant colony optimization", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 75, pp. 265–274, 2016.
- [10] M. Marzband, N. Parhizi, J. Adabi, "Optimal energy management for stand-alone microgrids based on multi-period imperialist competition algorithm considering uncertainties: experimental validation", *Int. Trans. Electr. ENERGY Syst.*, Vol. 30, No. 1, pp. 122–131, 2015.
- [11] M. Marzband, F. Azarnejadian, M. Savaghebi, J. M. Guerrero, "An Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Bee Colony Combined With Markov Chain", *IEEE Syst. J.*, Vol. PP, No. 99, pp. 1–11, 2015.
- [12] W. Su, A. Q. Huang, "A game theoretic framework for a next-generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers", *Appl. Energy*, Vol. 119, pp. 341–350, 2014.
- [13] N. Zhang, Y. Yan, W. Su, "A game-theoretic economic operation of residential distribution system with high participation of distributed electricity prosumers", *Appl. Energy*, Vol. 154, pp. 471–479, 2015.
- [14] M. Carvalho, J. P. Pedroso, J. Saraiva, "Electricity day-ahead markets: Computation of Nash equilibria", *J. Ind. Manag. Optim.*, Vol. 11, No. 3, pp. 985–998, 2015.
- [15] K. H. Lee, "Strategy Equilibrium in Stackelberg Model with Transmission Congestion in Electricity Market", *J. Electr. Eng. Technol.*, Vol.



- photovoltaic array size for a hybrid wind/PV system", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 9, No. 3, pp. 482–488, 1994.
- [31] G. Tina, S. Gagliano, S. Raiti, "Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment", Sol. Energy, Vol. 80, No. 5, pp. 578–588, 2006.
- [32] M. E. Khodayar, M. Shahidehpour, "Optimal Strategies for Multiple Participants in Electricity Markets", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 29, No. 2, pp. 986–987, 2014.

۸۶ مدیریت بهینه ریزش‌بکه‌های خانگی به همراه استراتژی هوشمند قیمت‌گذاری منابع تولید توزیع‌شده انرژی بر پایه روش نظریه بازی