

## مروری بر رویکردهای نظریه بازی در شبکه توزیع هوشمند با تاکید بر بازی های همکارانه

فرزام متین فرا<sup>۱</sup>، فرشته آزادی پرند<sup>۲</sup>، عبدالله لونی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار علوم رایانه، دانشگاه علامه طباطبائی، f.matinfar@atu.ac.ir

<sup>۲</sup>استادیار علوم رایانه، دانشگاه علامه طباطبائی، parand@atu.ac.ir

<sup>۳</sup>کارشناسی ارشد علوم رایانه، دانشگاه علامه طباطبائی، loni931@atu.ac.ir

### چکیده:

شبکه هوشمند برق یک شبکه مقیاس عظیم با استفاده از فناوری دیجیتال است که مولفه های تولیدی برق (تولیدکنندگان و مصرف کنندگان) را به منظور بهبود قابلیت اطمینان، امنیت و بهره وری با استفاده از سنجش، پردازش، اندازه گیری و کنترل یکپارچه و متحد می سازد. این تولید انرژی می تواند آن ها را نسبت به خرید انرژی از شبکه اصلی توزیع بی نیاز کند یا حتی باعث شود مشتریان بتوانند میزان اضافی انرژی خود را به همسایگان و دیگر مصرف کنندگانی که مایل به خرید انرژی هستند بفروشند. کاربران در سیستم جدید شبکه برق قادرند تا انرژی های مورد نظر خود را با استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی مانند صفحه های خورشیدی، مولد های الکترونیکی و... تولید کنند. با این وجود، این فناوری ها باید بر پایه ابزارهای ریاضی محض قرار گیرند تا بطور قاطع و صریح چنین عملیات های پیچیده ای را کنترل و مدلسازی نمایند. در نظریه بازی به مدلسازی رفتار عامل های مستقل و عقلانی پرداخته می شود که هر کدام خواستار بیشینه کردن سود خود هستند. در این مقاله به بررسی کامل کارهای انجام شده در حوزه شبکه های هوشمند برق با اتخاذ از نظریه بازی، بالاخص بازی های همکارانه پرداخته ایم. در ادامه کاربرد های نظریه بازی در سه حوزه شبکه هوشمند شامل ریزشبکه، مدیریت سمت تقاضا و ارتباطات ارائه شده است که مفصلاً در ادامه به تشریح آنها می پردازیم.

### کلیدواژه:

شبکه هوشمند، مدیریت سمت تقاضا، بازی های همکارانه، ائتلاف، تابع مطلوبیت.

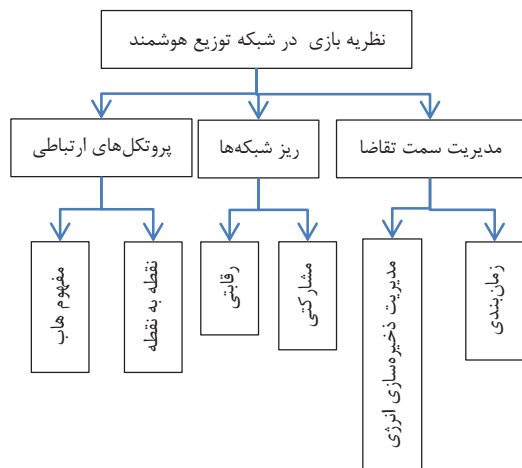
### مقدمه

کنندگانی که مایل به خرید انرژی هستند بفروشند. ماهیت پیچیده این شبکه ما را بر این می دارد تا از ابزارهای پیشرفته و دقیق به منظور غلبه بر چالش های موجود در سطوح مختلف کنترل، طراحی و اجرا استفاده کنیم. در این مقاله به بررسی کارهای انجام شده در حوزه شبکه های هوشمند برق با اتخاذ از نظریه بازی، بالاخص بازی های همکارانه پرداخته ایم. در حوزه بازی های همکارانه، تمرکز این مقاله بر روی پاسخ به سه سوال می باشد که:

- الف) چرا همکاری بین عامل ها ارزشمند است؟
- ب) چگونه ائتلاف هایی به منظور همکاری در حال تشکیل و شکل گیری هستند؟
- ج) چرا و چطور نظریه بازی می تواند همکاری بین عامل ها را مدلسازی نماید؟

از دلایل تشکیل ائتلاف ریزشبکه ها می توان به رسیدن به سود بیشتر و اتلاف انرژی کمتر اشاره کرد. حال باید ببینیم کدام یک از ائتلاف های موجود به منظور همکاری از دید هر ریزشبکه بهینه می باشد. در این مورد انتظار می رود نظریه بازی به عنوان ابزاری قدرتمند و تحلیلی در جهت بهبود و مدلسازی عملکرد سیستم در این شبکه و شبکه های آتی مورد استفاده قرار گیرد.

شبکه های برق امروزی با مسائل گوناگونی از قبیل مسائل زیست محیطی، مدیریتی و حوزه امنیت مواجه هستند. در مقابل، ساختار پیچیده شبکه های هوشمند آتی استفاده از مجموعه تکنولوژی های پیشرفته را به همراه دارد. در حقیقت یک شبکه هوشمند شامل گره های هوشمند است (مدیریت مولفه های شبکه هوشمند توسط عامل های هوشمند انجام می شود و پشت هر عامل هوشمند یک تصمیم گیرنده عقلانی- انسان- وجود دارد) که می تواند بصورت کارآمد با مشتریان خود تعامل و مبادله انرژی نماید. ساختار شبکه هوشمند برق در مقایسه با شبکه برق سنتی بگونه ای تغییر کرده است که تمام موجودیت ها می توانند نقش تولیدکننده و مصرف کننده داشته باشند یعنی موجودیت ها می توانند هم به تولید و هم به مصرف انرژی پردازند. اینکار به چند دلیل صورت گرفته است که می توان به افت فشار در زمان اوج مصرف برای تولیدکنندگان و کمتر شدن هزینه نهایی برای مصرف کنندگان اشاره کرد. این تولید انرژی می تواند آن ها را نسبت به خرید انرژی از شبکه اصلی توزیع بی نیاز کند یا حتی باعث شود مشتریان بتوانند میزان اضافی انرژی خود را به همسایگان و دیگر مصرف



شکل ۱: تقسیم‌بندی پژوهش‌های انجام شده در رابطه با کاربرد نظریه بازی‌ها در شبکه توزیع هوشمند

در ادامه روند مقاله بصورت زیر می باشد. در ابتدا به بررسی مفاهیم بنیادی نظریه بازی و ارتباط آن‌ها با شبکه هوشمند برق پرداخته شده است. سپس در ادامه به کاربرد نظریه بازی‌ها در شبکه هوشمند در سه حوزه کلیدی پرداخته شده است که عبارتند از: مدیریت سمت تقاضا<sup>۱</sup>، شبکه‌های توزیع در ریز شبکه‌ها<sup>۲</sup>، و پروتکل‌های ارتباطی<sup>۳</sup>. پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد نظریه بازی‌ها در شبکه توزیع هوشمند، مربوط به یکی از سه حوزه مطرح شده می‌باشند. در شکل ۱، تقسیم‌بندی پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با کاربرد نظریه بازی‌ها در شبکه‌های هوشمند انرژی نشان داده شده است. بنابراین در ادامه علاوه بر توضیح و معرفی هر حوزه، نمونه‌های پژوهشی گوناگونی آورده شده است.

### بررسی مفاهیم نظریه بازی<sup>۴</sup>

به طور خلاصه نظریه بازی مطالعه تصمیم گیری استراتژیک است. به بیان دیگر، نظریه بازی مطالعه مدل‌سازی ریاضی تعامل یا رقابت بین تصمیم گیران عقلانی و منطقی است. در نظریه بازی انتخاب استراتژی بازیکنان متأثر از سایر بازیکنان است که هر بازیکن در نهایت به دنبال رسیدن به مطلوبیت و حداکثر کردن سود خویش است. نظریه بازی در حالت کلی به دو شاخه اصلی تقسیم می شود: الف) بازی های غیر مشارکتی (رقابتی)<sup>۵</sup> و ب) بازی های مشارکتی یا همکاریانه. بازی های رقابتی به تصمیم گیرندگان این امکان را می دهد تا بدون هماهنگی و ارتباط با دیگران و بصورت خودخواهانه و مستقل در پی بهینه کردن خواسته خویش باشند. این شاخه شامل دو بخش بازی های ایستا و پویا است. یکی از مهم ترین راه حل ها در این

به منظور گردآوری چنین شبکه مقیاس بزرگی نیاز است از مدل‌ها و الگوریتم های قدرتمندی استفاده شود تا بتوان ویژگی‌های مورد نیاز چنین شبکه ای را بخوبی ارائه نمود. از مهم ترین ویژگی های این شبکه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱]:

- ۱- نیاز به عملیات های توزیع شده در شبکه های هوشمند برای اهداف کنترلی و ارتباطی.
- ۲- ماهیت غیرهمگن شبکه های هوشمند که شامل گره های هوشمند گوناگون با توانایی ها و اهداف مختلف است مانند مترهای هوشمند و وسایل برقی و ...
- ۳- نیاز به الگوریتم هایی با پیچیدگی کم زمانی که به خوبی بتوانند سناریوهای همکاریانه و رقابتی درون شبکه های هوشمند را بررسی نمایند.

شبکه هوشمند با ادغام تکنیک های مهندسی برق و فناوری ارتباطات از طریق حسگرهای ابزار دقیق برقی و مترهای هوشمند جایگزین مناسبی برای شبکه برق قدیم می باشد. انتظار می رود شبکه های ارتباطی داده تحت تاثیر فاکتورهای تصمیم گیری که مسایل تصمیم گیرندگان را هدایت می کند قرار گیرند.

به منظور رفع چالش‌ها و غلبه بر آنها، بر حسب ماهیت حوزه‌ها، تکنیک های گوناگونی (مانند شبکه عصبی مصنوعی، منطقی فازی، الگوریتم های تکاملی و ازدحامی، بهینه سازی ریاضی و...) برای مدل کردن این سیستم بکار می روند. ولی هیچ کدام از تکنیک های مذکور پارامتر عقلانی بودن عامل‌های توزیع شده در مدل هایشان قید نمی کنند. در حقیقت پشت هر عامل هوشمند یک تصمیم گیرنده عقلانی/منطقی وجود دارد که در صدد رسیدن به خواسته خود یا حداکثر کردن سود حاصله است. در نتیجه، نظریه بازی با در نظر گرفتن این مهم، بعنوان عاملی برای رسیدن به نقطه تعادل و همگرایی می تواند بعنوان یک چارچوب قدرتمند برای پاسخگویی به این نیازها در فاز طراحی و تحلیل سیستم های ارتباطی در نظر گرفته شود. تمام رویکردهای نظریه بازی در این حوزه به منظور افزایش کارایی می باشند که با فرضیاتی در نهایت بهینه‌گی شبکه را به همراه دارند.

1 Demand-side management  
2 Micro-grid distribution networks  
3 Communication protocols  
4 Game Theory  
5 Non-Cooperative Games

### بازی‌های مشارکتی

در بازی‌های مشارکتی [۴] گروه‌هایی (ائتلاف)<sup>۷</sup> از بازیکنان به منظور همکاری و رسیدن به مطلوبیت بصورت جمعی تشکیل می‌شود. بنابراین در این بازی‌ها این گروه‌ها هستند که با یکدیگر رقابت می‌کنند. بازی‌های رقابتی این امکان را فراهم می‌کنند که بدانیم چگونه می‌توانیم این انگیزه را در افراد ایجاد کنیم که به صورت یک گروه با یکدیگر همکاری کرده و یک موجودیت واحد را تشکیل دهند. باید به این نکته توجه کنیم که زمانی بازیکنان در یک گروه خاص برای همکاری شرکت می‌کنند که سود عایدی هر بازیکن از آن گروه بیشتر از زمانی باشد که فرد بصورت انفرادی عمل می‌کند. در غیر اینصورت هیچ انگیزه‌ای برای تشکیل ائتلاف از طرف بازیکنان وجود ندارد.

### بازی‌های پتانسیل<sup>۸</sup>

در نظریه بازی به یک بازی، بازی پتانسیل [۵] گویند اگر انگیزه تمام بازیکنان برای تغییر تصمیماتشان را بتوان به صورت یک تابع جامع به نام تابع پتانسیل بیان کرد. این ویژگی ابزار مناسبی است که به وسیله آن می‌توان تعادل را در یک بازی بررسی کرد زیرا تمامی سودهای کاربران در یک تابع جمع شده است. در ادامه به بررسی کارهای انجام شده و کاربردهای متنوع نظریه بازی در حوزه‌های مختلف شبکه‌های هوشمند پرداخته شده است.

### نظریه بازی و تصمیم‌گیران توزیع شده<sup>۹</sup>

یکی از ویژگی‌های شبکه‌های هوشمند وجود تصمیم‌گیران توزیع شده است. عرضه‌کنندگان و مشتریان موجودیت‌هایی منطقی هستند که نفع شخصی خود را دنبال می‌کنند و تلاش می‌کنند سود خود را حداکثر نمایند. نظریه بازی به طور ذاتی تصمیم‌گیران توزیع شده را در نظر می‌گیرد و رفتار موجودیت‌ها را در چنین سیستمی مدل‌سازی می‌کند.

### مدیریت سمت تقاضا

در این بخش به بررسی مساله مدیریت سمت تقاضا در شبکه‌های هوشمند پرداخته شده است. مدیریت سمت تقاضا یکی از بخش‌های اصلی شبکه‌های هوشمند آتی است که به منظور کنترل مصرف انرژی مشتری پباده سازی می‌شود [۶]. مدیریت سمت تقاضا تعامل میان دو موجودیت درون شبکه را شامل می‌شود: شرکت‌های ارائه دهنده انرژی و مشتریان. مدیریت سمت تقاضا شامل برنامه‌های نگهداری و بهبود مصرف

بازی‌ها تعادل نش<sup>۶</sup> است که در این تعادل هیچ بازیکنی از تغییر استراتژی در جهت افزایش مطلوبیت با ثابت ماندن استراتژی‌های دیگر بازیکنان سود بیشتری نمی‌برد. در بازی‌های همکاریانه، ممکن است که بازیکنان به منظور برخورداری از سود با هم رقابت نکنند، بلکه به منظور دستیابی به منافع بیشتر بر سر انتخاب برخی از استراتژی‌ها با هم توافق کنند. این بازیکنان مجاز به برقراری ارتباط و هماهنگی هستند. در سمت دیگر، نظریه بازی مشارکتی شامل دو بخش بازی‌های ائتلافی (در این بخش بازیکنان با تشکیل گروه‌های ائتلافی و مشارکتی در پی رسیدن به مطلوبیت ائتلاف و در نهایت مطلوبیت خود هستند) و چانه زنی نش (در چانه زنی نش بازیکنان به منظور رسیدن به سود خود با هم راه چانه زنی را پیش می‌گیرند که می‌تواند در نهایت به توافق بیا نجامد). در [۲]، راه حل بازی‌های همکاریانه ارائه شده است. در این تحقیق چگونگی ایجاد گروه‌هایی به جهت همکاری برای افزایش سود و در نهایت رسیدن به نقطه تعادل ارائه شده است. علاوه بر یک شبکه هوشمند بیش از یک عرضه‌کننده انرژی وجود دارد و در کنار آن، تمامی عرضه‌کنندگان و مصرف‌کنندگان تصمیم‌گیرانی هستند که براساس میزان مصرف انرژی و هزینه آن، نوع رفتار و استراتژی خود در مقابل دیگر تصمیم‌گیرندگان سیستم را تعیین می‌کنند.

### بازی‌های غیرمشارکتی

بازی‌های غیرمشارکتی [۳] بازی‌هایی را شامل می‌شود که در آن‌ها فرآیند تصمیم‌گیری موجودیت‌ها، بدون تعامل و همکاری با یکدیگر انجام می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که در بازی‌های غیرمشارکتی ممکن است نوعی از تعامل یا همکاری بین بازیکنان مشاهده شود اما این فرآیند به صورت آگاهانه و براساس هماهنگی بازیکنان با یکدیگر نبوده است. همانطور که بطور مختصر در بالا اشاره شد این بازی‌ها به دو بخش ایستا و پویا تقسیم می‌شوند که در حالت ایستا سابقه بازی و اطلاعات قبلی اعم از انتخاب استراتژی‌ها و مطلوبیت انتخاب استراتژی، بازیکنان را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد و بازی غیرمشارکتی به عنوان فرآیندی تک مرحله‌ای تصور می‌شود. بازیکنان در حالت پویا اطلاعات گذشته، سابقه یا تاریخچه بازی را در انتخاب استراتژی‌های خود دخیل می‌کنند و اقدامات بازیکنان متأثر از این اطلاعات است. بازی‌های غیرمشارکتی می‌تواند برای مدلسازی مدیریت مستقل سمت تقاضا، نظارت بلادرنگ، پیاده‌سازی و کنترل ریزشبکه‌ها، بازار و قیمت‌گذاری پویا و ... مورد استفاده قرار گیرد [۱].

<sup>7</sup> Coalition

<sup>8</sup> Potential Games

<sup>9</sup> Distributed Decision Maker

<sup>6</sup> Nash Equilibrium

به مشخص کردن زمانبندی خودکار زمان مصرف انرژی باشند که درحقیقت ابزارها چه زمانی از انرژی استفاده نمایند با این هدف که هزینه هر مشتری درون شبکه نیز کمینه گردد. برای پاسخ به تمامی درخواست های مشتریان درون شبکه از سوی عرضه کننده انرژی، ظرفیت شبکه باید بیشتر از ظرفیت نقطه اوج مصرف باشد تا شبکه بتواند پایداری خود را حفظ نماید و در ساعات اوج مصرف نیز قادر به پاسخگویی باشد. برنامه های مدیریت سمت تقاضا باید دارای برنامه ریزی هایی باشند که بتوانند با کنترل الگوی مصرف انرژی و پروفایل بار کاربران، نسبت اوج به میانگین را کاهش دهند. هر چه این نسبت به یک نزدیک تر باشد تعادل شبکه در میزان مصرف انرژی بیشتر است که می تواند باعث پایداری شبکه گردد. انتقال درخواست ها به ساعت های غیر اوج مصرف، از اهداف مهم مدل های مدیریت سمت تقاضا-زمان بندی است.

یکی از راهکارهای مهم در این مدل، قیمت گذاری بلادرنگ می باشد. برنامه های قیمت گذاری مصرف براین اساس مورد توجه قرار می گیرند که قیمت گذاری انرژی برق در طول زمان به تغییر الگوی مصرف می انجامد [8]. قیمت گذاری بلادرنگ مدلی را پیاده سازی می کند که در آن قیمت انرژی برق به طور متناوب تغییر می کند که نشان دهنده هزینه تولید و عرضه آن میزان از انرژی است. یکی از روش های معمول در قیمت گذاری بلادرنگ، قیمت گذاری روزانه است که براساس آن مشتریان قیمت انرژی برق در هر روز را یک روز زودتر دریافت می کنند [9].

در [7] یک برنامه مدیریت سمت تقاضای مستقل و توزیع شده پیشنهاد شده است. براساس این مدل، یک بازی زمان بندی مصرف انرژی معرفی شده است که در آن بازی مصرف کنندگان بصورت زمان بندی مصرف انرژی و انتخاب استراتژی است. درحقیقت، این برنامه زمانبندی باید راحتی کاربر را هم در نظر داشته باشد. طبق این کار کافی است هر مصرف کننده استراتژی بهترین پاسخ<sup>۱۵</sup> را در پیش گیرد که نیازی نیست کاربران اطلاعات مصرف انرژی و پروفایل بار خود را بین یکدیگر به اشتراک بگذارند. بدین ترتیب نگرانی ها و دغدغه هایی که از جهت پخش اطلاعات مصرف انرژی افراد و حفظ حریم خصوصی حفاظت اطلاعات پیش می آید برطرف می گردد. این انگیزه در مصرف کنندگان وجود دارد تا در این بازی شرکت کنند با این هدف که هزینه های انرژی خود را کمینه گردانند.

تحقیق [10]، یک روش زمان بندی مصرف انرژی را برای مدیریت تقاضای بار خانگی و محلی با استفاده از روش برنامه ریزی خطی و نظریه بازی معرفی می کند. این مدل می تواند

انرژی، برنامه های جایگزینی سوخت، برنامه های پاسخ تقاضا و برنامه های مدیریت بار خانگی و تجاری است [7]. در تحقیق [6] یک تکنیک مدیریت سمت تقاضا بدیع به منظور کاهش بار اوج مصرف سیستم ارائه شده است. در این تحقیق درسیستم برقی هوشمند فرض می شود که کاربران توزیع شده تقاضای انرژی خود را از درخواست کننده انرژی مطالبه می کنند و ارائه دهنده انرژی بصورت پویا قیمت انرژی را بر پایه پروفایل بار کاربران به روز رسانی می کند. کاربران سعی در حداقل کردن نرخ متوسط اوج مصرف<sup>۱۱</sup> سیستم برق با استفاده از شارژ کردن باتری ها در زمان های غیر اوج مصرف و تخلیه انرژی در زمان های اوج مصرف دارند. بعلاوه یک الگوریتم مدیریت سمت تقاضا با رویکرد نظریه بازی ارائه شده است بطوریکه کاربران سعی در حداقل کردن هزینه انرژی نهایی دارند.

نظریه بازی به طور گسترده برای مدل سازی مدیریت سمت تقاضا مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی پژوهش های انجام شده در این قسمت به دو دسته زمان بندی<sup>۱۱</sup> و مدیریت ذخیره سازی<sup>۱۲</sup> تقسیم می شوند که در ادامه به بررسی موضوعی کارهای صورت گرفته در این حوزه ها می پردازیم.

### مدیریت سمت تقاضا - زمان بندی

پژوهش های این قسمت بر تعامل بین فراهم کنندگان انرژی و مصرف کنندگان نهایی متمرکز هستند. در این پژوهش ها با بکارگیری استراتژی هایی نظیر قیمت گذاری هوشمند سعی بر کنترل زمان مصرف انرژی مصرف کنندگان است. مصرف کنندگان به عنوان تصمیم گیران مستقل و عقلانی در نظر گرفته می شوند که انتخاب برنامه ریزی زمان و میزان مصرف انرژی آن ها بر روی یکدیگر تاثیر می گذارد. وسایل مصرفی برقی خانگی به دو گروه "قابل تعویض یا انتقال"<sup>۱۳</sup> و "غیر قابل تعویض یا انتقال"<sup>۱۴</sup> تقسیم می شوند. دستگاه های قابل تعویض شامل وسایل برقی هستند که مصرف کننده با توجه به نیاز خود، زمان مصرف آن دستگاه را می تواند به تعویق بیندازد، مانند اتو، تلویزیون و... برعکس، وسایل برقی غیرقابل تعویض به دستگاه هایی اشاره دارد که مصرف کننده معمولاً بطور مداوم از آنها استفاده می کند و زمان مصرف را نمی تواند به زمان دیگری موکول نماید، مانند یخچال و وسایل برقی گرمایشی و سرمایشی. درحقیقت زمانبندی مصرف انرژی راه حل هایی را به مصرف کنندگان برای وسایل برقی قابل تعویض ارائه می دهد. هدف از زمان بندی مصرف انرژی این است که ابزارهای هوشمند مشتری مانند حسگرهای و مترهای هوشمند و... قادر

<sup>10</sup> Peak-Average-Ratio

در دو شرایط متفاوت براساس ریسک پذیری یا عدم ریسک پذیری مورد مطالعه قرار گرفته است.

در تحقیق [۹] یک بازی برای قیمت گذاری بلادرنگ بهینه ارائه شده است. در این مدل شرکت های عرضه کننده مصرف انرژی تلاش می کنند سود خود را بهینه کنند. قیمت ها از طرف این شرکت ها به وسایل هوشمند مصرف کنندگان ارسال می شود. سپس مصرف کنندگان براساس قیمت دریافتی مصرف انرژی خود را برنامه ریزی و زمانبندی می کنند. بدین منظور یک بازی اشتاکلبرگ با یک سردسته و  $n$  دنبال کننده مدل شده است. در طرف شرکت عرضه کننده انرژی یک الگوریتم ژنتیک برای حداکثر کردن میزان سود ارائه شده است. در طرف مشتریان نیز از روش های آنالیزی براساس برنامه ریزی خطی<sup>۱۷</sup> استفاده شده است. در تحقیق [۱۵] بررسی شده که چگونه استراتژی های قیمت گذاری و تکنیک های بهینه سازی براساس نظریه بازی می توانند در شبکه هوشمند برای بهینه کردن پاسخ به تقاضا مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از راهکارهای مهم در شبکه توزیع هوشمند، قیمت گذاری متغیر در زمان های مختلف به منظور کنترل عرضه و تقاضا می باشد [۱۶ و ۱۷ و ۱۸]. در تحقیق [۱۸]، زمان بندی منجر به مزایای قابل توجه اقتصادی و عملیاتی شده است.

#### مدیریت سمت تقاضا - مدیریت ذخیره سازی انرژی

در شبکه های هوشمند آتی، ابزارهای ذخیره سازی از بخش های بسیار مهم هستند که می توانند تاثیر قابل توجهی بر روی مدیریت سمت تقاضا داشته باشند. یک مصرف کننده می تواند انرژی را در زمان های غیراوج مصرف ذخیره کرده و در زمان های اوج مصرف به جای درخواست انرژی برق از شبکه، از انرژی ذخیره شده استفاده کند. به کمک ابزارهای بهبودیافته و ارزان ذخیره سازی انرژی، مصرف کنندگان می توانند انرژی مورد نیاز خود را برای مدت های طولانی ذخیره نمایند.

در تحقیق [۶] یک روش مدیریت سمت تقاضا معرفی شده است که باعث کاهش نسبت اوج به میانگین می شود. بدین منظور، فرض شده است که مشتریان از ابزارهای ذخیره سازی انرژی استفاده می کنند. در این مدل شرکت های عرضه کننده، انرژی قیمت انرژی را براساس رفتار مشتریان به روزرسانی می کنند. بازی معرفی شده در این مدل، با هدف کمینه کردن هزینه های انرژی هر کدام از مشتریان است. الگوریتم توزیع شده ای برای این منظور معرفی شده است که صرفاً به اطلاعات مبادله شده بین شرکت عرضه کننده انرژی و مشتری نیاز دارد و نیازی به تبادل اطلاعات در بین کاربران نیست. در [۱۹] تبادل انرژی در بین ذخیره سازها مورد بررسی قرار گرفته است. این ذخیره سازها از نظر جغرافیایی پراکنده هستند. سپس یک

نقطه بهینه مصرف انرژی و مدل زمانی بهینه مصرف را شناسایی کند. برای این منظور نتایج شبیه سازی های توزیع شده و متمرکز در این مقاله آورده شده است. در مقاله ای دیگر در [۸]، یک روش خودکار پاسخ به تقاضا معرفی شده است که استقلال هر کدام از مشتریان و همچنین همکاری های بین آن ها را در نظر گرفته است. برای این منظور از نظریه بازی برای مدل سازی رفتار کاربران در یک بازار با استفاده از مدل قیمت گذاری روز قبلی معرفی شده است که نقطه بهینه زمان بندی مصرف را جستجو می کند. همچنین در این مدل سازی، زمان بندی خودکار مصرف انرژی ابزارهای خانگی مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه سازی انجام شده بر روی ۲۰ خانه و هر کدام شامل ۲۰ وسیله مصرفی انرژی بوده است. تحقیق [۱۱] یک روش ارزیابی بلادرنگ عملکرد شبکه را معرفی کرده است. در این تحقیق تمرکز اصلی بر روی مشکلات احتمالی شبکه است که ممکن است شبکه را مختل نماید و تلاش شده است آن ها پیش از رخ دادن شناسایی شوند. برای این منظور از اصول نظریه بازی و درخت تصمیم و مساله مشهور زندانی<sup>۱۶</sup> استفاده شده است. الگوریتم معرفی شده در این مقاله شرایط شبکه را بررسی می نماید و حالت تعادل شبکه را با یافتن نقاط دارای ضعف عملکرد و بهبود آن نقاط حفظ می کند.

در [۱۲] تعادل عرضه و تقاضا درون شبکه های هوشمند بررسی شده است که در آن مصرف کنندگان نقش عمده ای را بازی می کنند. هدف اصلی این است که کاربران چه به عنوان خریدار یا فروشنده راغب به مبادله انرژی بین خود باشند تا به بهبود وضعیت شاخص اوج به میانگین بیانجامد. بدین منظور یک بازی اشتاکلبرگ معرفی شده است. در [۱۳] رویکرد متفاوتی در برابر مدیریت سمت تقاضا اتخاذ شده است. مدل معرفی شده در این مقاله براساس ایجاد تمایل بین مصرف کنندگان در یک بازی غیرمشارکتی است که اجازه می دهد رفتار مصرف کنندگان برای رسیدن به نقطه بهینه سود کنترل شود. در این مدل نشان داده شده است که نقطه تعادل نش بازی معرفی شده، در انتخاب هایی در بین کاربران است که هزینه های آن ها را کمینه می کند. سپس دو روش برای یافتن تعادل نش بهینه معرفی شده است. مدل اول براساس ویژگی های یک کلاس خاص از بازی های پتانسیل است که نقطه تعادل نش، نقطه کمینه تابع پتانسیل است. روش دوم براساس یک رویکرد کنترل محور وابسته به پویایی بازی است. در [۱۴] یک چارچوب چند هدفه تصادفی براساس نظریه بازی معرفی شده است که تعامل های بازیکنان درون گروه و بیرون از گروه را در گستره وسیع از بازیکنان مدل می کند. بازی معرفی شده

دو مدل بازار برای هماهنگی عرضه و شکل گیری تقاضا در سیستم شبکه هوشمند ارائه شده است. در این تحقیق تمرکز اصلی بر ارائه بازار هایی است که مشتریان بسته به مقدار انرژی که دارند، مقدار بار خود را منطبق بر مقدار عرضه افزایش یا کاهش می دهند.

در تحقیق [۲۴] مدل های بیشتری ارائه شده است که برای هماهنگی عرضه و تقاضا در سیستم شبکه هوشمند مناسب هستند. در این مدل تابع قیمت گذاری برق بصورت متغیر با زمان در راستای تابع هدف وسایل خانگی مشتری با رفاه اجتماعی است. در تحقیق [۲۴]، قیمت گذاری پویا برای کنترل تقاضای برق با هدف دستیابی به صرفه جویی انرژی با استفاده از بازی های تراکم در نظریه بازی های غیر مشارکتی ارائه و مطرح شده است. در این تحقیق همچنین ویژگی های مهم بازی تراکم مدیریت سمت تقاضا بررسی شده و نشان داده شده که چگونه تعادل با استفاده از الگوریتم توزیع شده بدست خواهد آمد.

تحقیق [۲۵]، مثال هایی در مورد ذخیره سازی انرژی و تاثیر آن بر دامنه نوسانات درخواست ها و نقاط تعادل در بازی ارائه کرده است و در [۲۶]، به مجموعه ای از ساختمان ها به عنوان یک خوشه نگاه شده است و یک روش بر مبنای نظریه بازی برای ذخیره سازی انرژی در خوشه ها ارائه شده است.

در ادامه به کارهای انجام شده در حوزه ریز شبکه ها (دسته دوم پژوهش ها) و مدلسازی آنها با اتخاذ از نظریه بازی پرداخته شده است.

### ریز شبکه ها و تشکیل ائتلاف

مفهوم ریز شبکه ها به صورت مجموعه ای از تولیدکنندگان انرژی های نو مانند صفحه های خورشیدی، توربین های بادی، مولدهای الکتریکی و... تعریف می شود که در درون شبکه توزیع قرار دارد و می تواند انرژی مورد نیاز یک منطقه محدود جغرافیایی را تامین کند. مفهوم ریز شبکه به عنوان گروه شبکه منابع انرژی توزیع شده می باشد و این ریز شبکه ها انرژی برق را برای نواحی کوچک جغرافیایی فراهم می کنند. شبکه های هوشمند آتی مجموعه ای از تعداد زیاد این ریز شبکه ها خواهند بود. بنابراین هر ریز شبکه که مازاد انرژی یا درخواستی برای انرژی برق از طرف ریز شبکه دیگر دارد، برای این ریز شبکه ها و مشتریان درون این نواحی سودمند خواهد بود که به جای درخواست این انرژی از شبکه اصلی، انرژی را بین خود مبادله کنند [۱]. در این راستا، بازی های همکاریانه به منظور تبادل انرژی بین ریز شبکه ها از اهمیت به سزایی برخوردار هستند که در آن ریز شبکه های درون یک شبکه توزیع و تولید می توانند با یکدیگر ائتلاف تشکیل داده و همکاری می نمایند. در سیستم

بازی غیرمشارکتی معرفی شده است که هر دارنده ذخیره ساز می تواند در مورد حداکثر میزان انرژی در نظر گرفته شده برای فروش در یک بازار محلی با هدف حداکثر کردن سود خود تصمیم گیری کند. قیمت گذاری در این مدل براساس مدل چانه زنی تعیین می شود. بازی معرفی شده دارای یک نقطه تعادل نش است و الگوریتمی معرفی شده است که به این نقطه همگرا می شود. در [۲۰] مدیریت مستقل سمت تقاضا در حضور ابزارهای ذخیره سازی انرژی مطالعه شده است. در نتیجه یک بازی غیرمشارکتی معرفی شده است. در این بازی، بازیگران یا همان مصرف کنندگان که به مصرف یا ذخیره سازی انرژی می پردازند. مشتریان درخواست های انرژی خود را به شرکت عرضه کننده ارسال می کنند. براین اساس قیمت تمام شده انرژی براساس درخواست های تمامی کاربران درون سیستم تعیین می شود. به وسیله یک کنترل کننده مرکزی و زمان بندی مصرف و ذخیره سازی انرژی، شرکت عرضه کننده در صدد است تا فاصله زمانی بین درخواست انرژی و تامین انرژی را کمینه گرداند. حفظ حریم خصوصی اطلاعات کاربران در این مدل پیش بینی شده است به طوریکه حداقل اطلاعات بین کاربران مبادله شود.

تحقیق [۲۱] بررسی جامعی از مدیریت سمت تقاضا به وسیله بازی های غیرمشارکتی و مشارکتی است. در این مدل شبکه هوشمندی مدل سازی شده است که شامل کاربران قدیمی در کنار کاربران جدید است که این کاربران دارای ابزارهای توزیع شده تولید و ذخیره سازی انرژی هستند. برای مثال این کاربران ممکن است از صفحه های خورشیدی در پشت بام خانه های خود استفاده نمایند تا بتوانند نیازهای خود به انرژی را تامین کنند یا حتی مازاد انرژی خود را ذخیره نمایند. به وسیله یک سازوکار قیمت گذاری روز گذشته که به وسیله یک واحد مرکزی مستقل انجام می شود، کاربران جدید خواستار کاهش هزینه های انرژی خود با استفاده از تامین و ذخیره سازی انرژی هستند بطوریکه کمترین درخواست ممکن را به شبکه اصلی داشته باشند. دو روش بهینه سازی در این مقاله معرفی شده است. روش اول بر پایه بهبود تابع سود کاربران و روش دوم روش بهینه سازی برای کل سیستم است. در روش اول یک بازی غیر مشارکتی برای هر کدام از کاربران مطرح شده است. روش دوم همکاری بین کل کاربران سیستم است و در جهت بهبود عملکرد کلی سیستم مطرح شده است.

در [۲۲] رویکردی متفاوت درباره مشکلات حاصل از تولید توزیع شده انرژی توسط کاربران با علایق مختلف، تولید نامتوازن، روش های تولید انرژی های نو و هزینه بالای نگهداری و ذخیره سازی انرژی است. در این مقاله الگوریتمی برای فائق آمدن بر این مشکلات نیز معرفی شده است. در تحقیق [۲۳]

مدیریت و کنترل زمان اوج مصرف و پشتیبانی انرژی مشتریان صورت می گیرد.

**ب) همکاری بین مصرف کننده-مصرف کننده** که می تواند به کاهش هزینه مصرف کننده منجر شود

**ج) همکاری بین تولیدکننده-مصرف کننده** که باهدف کمک به تولیدکننده برای تولید انرژی و ارائه الگوهای مصرف از سوی مشتری است.

نظریه بازی با فرض عقلانی بودن موجودیت ها و ارائه استراتژی های مناسب، آنها را به سمت رسیدن به مطلوبیت بیشتر سوق می دهد. در ادامه به تفصیل، به معرفی رویکردهای همکاری و رقابتی نظریه بازی در این حوزه اشاره شده است.

### ریزشبکه ها - مشارکتی

در تحقیق [۲۷] الگوریتمی ارائه شده است که در آن هر ریزشبکه می تواند با دیگر ریزشبکه ها ائتلاف تشکیل داده و با آن ها همکاری کند. بنابراین می تواند ائتلاف انرژی حاصل از تعامل با دیگر ریزشبکه ها و یا شبکه اصلی را کاهش دهد.

همانطور که در کار [۲۷] ارائه شده است، می توان از بازی های مشارکتی برای ارائه سازوکار مبادله انرژی مشارکتی در شبکه های فشار قوی آتی استفاده کرد. شبکه ی توزیع متشکل از ایستگاه فرعی<sup>۱۸</sup> را در نظر بگیرید که به شبکه ی فشار قوی اصلی برق و ریزشبکه ها (با تعداد  $N$ ) متصل شده است. هر ریزشبکه  $i \in N$  تقاضای انرژی موجودیت خاصی را تأمین می کند (برای مثال گروه مصرف کنندگان یا تقاضای ناحیه ای کوچک) و اختلاف بین تقاضا و تولید آن با متغیر  $Q_i$  تعریف شده است که می تواند برای هر ریزشبکه متغیر باشد. در مدت زمان مشخص، بسته به تولید برق و تقاضای مصرف کنندگان، هر ریزشبکه  $i \in N$  یا برق مازاد برای فروش دارد،  $Q_i > 0$ ، یا باید برق را برای تأمین نیاز خود مصرف نماید،  $Q_i < 0$ .

بدون در نظر گرفتن ذخیره سازی، هر ریزشبکه  $i \in N$  به مقدار  $Q_i$  با شبکه ی هوشمند اصلی با استفاده از ایستگاه فرعی انرژی مبادله می کند. این انتقال با اتلاف برق در طول خطوط توزیع همراه است. در این شرایط، با تمرکز بر این اتلاف برق، مطلوبیت غیرمشارکتی هر ریزشبکه کمتر می شود. در نتیجه ی انتقال برق به عنوان اتلاف برق در طول خط توزیع بصورت زیر بیان می شود:

$$u(\{i\}) = -\omega_i P_{i0}^{loss} \quad (1)$$

که  $P_{i0}^{loss}$  اتلاف برق در مدت زمان تبادل برق بین ریزشبکه  $i$  و ایستگاه فرعی است و،  $\omega_i$  قیمت پرداخت شده بوسیله ی ریزشبکه  $i$  در هر واحد اتلاف برق و علامت منها برای حداکثرسازی مسئله، اضافه شده است. اتلاف برق  $P_{i0}^{loss}$  تابع

مشتریان را با استفاده از انتقال انرژی بوسیله خطوط انتقال به ایستگاه های فرعی دارد که در نهایت برق با ولتاژ پایین به دست مشتریان خواهد رسید. حال با وجود اینکه تعداد ریز شبکه ها رو به افزایش است و بحث توزیع شدگی این شبکه بسیار مهم است ریزشبکه ها به منظور تأمین تقاضای برق مشتریان بصورت محلی و توزیع شده می توانند این کار را انجام دهند. در نتیجه، ریز شبکه ها می توانند بصورت محلی با هم همکاری نمایند و ائتلاف تشکیل دهند.

در راستای اهمیت این حوزه از پژوهش لازم به ذکر است که مبادله انرژی ریزشبکه ها با شبکه برق اصلی دارای معطلاتی است که می توان به این موارد اشاره کرد:

۱- انتقال انرژی نیازمند استفاده از مبدل<sup>۱۸</sup> ها است که با کاهش سطح ولتاژ همراه است و برای جبران این افت ولتاژ نیازمند افزایش ولتاژ مبدل ها و استفاده بیشتر برق هستیم.

۲- افزایش وابستگی ریز شبکه ها به شبکه برق اصلی و تهدید ماهیت توزیع شدگی سیستم.

۳- اتلاف انرژی به اندازه  $I^2 R$  و افزایش آن در فواصل طولانی. ائتلاف ها می توانند انرژی را از ائتلافی دیگر خریداری کرده و یا به فروش برسانند. بنابراین ارتباط با شبکه اصلی کاهش یافته و اتلاف انرژی در طول مسیر انتقال نیز کاهش می یابد. بنابراین به دلایل مذکور برای ریزشبکه ها بعتراست با یکدیگر همکاری نمایند.

اگر همه موجودیت های شبکه هوشمند برقی، اعم از عامل های تولید کننده و مصرف کننده، بعنوان موجودیت های منطقی و عقلانی در نظر گرفته شوند، آنگاه بدیهی است که این موجودیت ها بدنبال رسیدن به حداکثر سود خود با خرید/فروش انرژی هستند. حال بین ریزشبکه ها همکاری ارزشمند خواهد بود که سودعایدی هر ریزشبکه از همکاری حداقل برابر با سود زمانی باشد که بصورت مستقل و انفرادی کار می کند. درحقیقت سود حاصل از همکاری انگیزه ای برای ایجاد تعامل بین ریزشبکه هاست. در غیراینصورت هیچ ریزشبکه ای تمایل به همکاری با سایرین ندارد. در ادامه باید به این نکته اشاره کرد که ائتلاف هایی در حال شکل گیری هستند که برای هر ائتلاف، هیچ یک از اعضا از همکاری ضرر نکنند و ریز شبکه ها رسیدن به مطلوبیت بیشتر را در گرو تشکیل ائتلاف ببینند.

در شبکه هوشمند برقی هر تولیدکننده به دنبال کنترل زمان اوج مصرف و افت فشار خود از طرف مشتری است و هر مشتری به دنبال کمینه کردن هزینه خود است.

همکاری ریزشبکه ها می تواند به سه دسته تقسیم شود.

**الف) همکاری بین تولیدکننده-تولیدکننده** که به منظور

<sup>19</sup> Sub-Station

<sup>18</sup> Transformer

است در حالی که  $P_{ij}^{loss}$  اتلاف برق در طول خط تولید در طول انتقال برق محلی در  $S$  بین فروشنده  $i$  و خریدار  $j$  را نشان می‌دهد. این اتلاف برق همانطور که قبلاً بیان شد، تابع عوامل گوناگون مانند فاصله و ولتاژ توزیع است.

در تحقیق [۲۸]، یک سازوکار تشکیل ائتلاف بهینه برای ریز شبکه ها در شبکه هوشمند بررسی شده است که در آن هدف از تشکیل ائتلاف ۱- حداقل کردن بار انرژی و وابستگی به شبکه برق اصلی ۲- حداقل کردن اتلاف شبکه برق کلی و ۳- حداکثر کردن انتقال انرژی درون ائتلاف است. بدین منظور دو الگوریتم سلسله مراتبی پیشنهادی ارائه شده که در نهایت می تواند بهینگی ائتلاف را در پی داشته باشد. همچنین تحقیق [۲۸] ارائه دهنده تابع مطلوبیت مشابه کار [۲۷] است که لزوم تشکیل ائتلاف بین ریز شبکه ها را بررسی می نماید. در این کار ریز شبکه ها با معیار تابع مطلوبیت که در ادامه بیان خواهد شد سعی در ایجاد همکاری با یکدیگر دارند. در ابتدا یک حاشیه سود<sup>۲۰</sup> بصورت زیر تعریف شده است که ارائه دهنده هرواحد سود ریز شبکه هاست هنگامی که با سایرین تبادل انرژی دارند.

$$uf = \begin{cases} 0 & pm \leq 0 \\ 1 & pm \geq \delta \\ \frac{pm}{\delta} & 0 < pm < \delta \end{cases} \quad (3)$$

که در آن  $pm$  حاشیه سود دلخواه و  $\delta$  به عنوان مقادیر مطلوب حاشیه سود در نظر گرفته می شود. مطلوبیت هر ریز شبکه بصورت  $U_i = \frac{uf}{1+|D_i-S_i|}$  می باشد که  $|D_i-S_i|$  اختلاف مقدار تولید و تقاضای انرژی برای هر ریز شبکه است. در نهایت تابع مطلوبیت هر ائتلاف در هر مان بصورت زیر محاسبه می شود.

$$U_C = \frac{1}{1+E_C+L_C} \quad (4)$$

که در آن  $L_C = \sum loss(i,j)$  مجموع اتلاف انرژی درون هر ائتلاف است و مشابه کار [۲۷] تابع عواملی مانند فاکتور اتلاف انتقال، فاصله جغرافیایی، برق مورد نیاز برای انتقال و ... است. همچنین  $E_C = \sum |D_i-S_i|$  مقدار برق موجود برای تقاضا و تولید در هر ائتلاف است.

در رابطه با تخصیص عقلانی سود ائتلاف بین اعضای هر ائتلاف روش های گوناگونی مانند راه حل هسته، ارزش شاپلی، راه حل نیاکلوس، راه حل چانه زنی نش و شاخص قدرت شپلی-شوبیک وجود دارند. در این تحقیق برای تخصیص عقلانی این سود بین اعضای هر ائتلاف از روش ارزش شاپلی بصورت زیر استفاده کرده است که این روش درمقایسه با روش هسته به هر ریز شبکه یک مقدار منحصر بفرود تخصیص می دهد.

$$\phi_i(N, v) = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(|N|-|S|-1)!}{|N|!} [v(S \cup i) - v(S)] \quad (5)$$

عوامل گوناگون مانند فاصله جغرافیایی بین ریز شبکه ها و ایستگاه فرعی، ولتاژ انتقال برق، مقدار برق منتقل شده  $Q_i$  و همچنین اتلاف در ایستگاه فرعی است. به جای تبادل برق تنها با ایستگاه فرعی، ریز شبکه هائی توانند گروه مشارکتی (ائتلاف) که بازار مبادله ای انرژی محلی را تشکیل می دهد، ایجاد کنند. در داخل این ائتلاف، ریز شبکه ها، برق را به طور محلی در بین یکدیگر منتقل خواهند کرد، در نتیجه اتلاف های برق کاهش و استقلال ریز شبکه ها بهبود می یابد. این کاهش اتلاف برق عمدتاً نتیجهی دو عامل است: ۱) ریز شبکه های گوناگون نزدیک به هم قرار خواهند داشت، در نتیجه برق را در طول فواصل کوتاه تر منتقل خواهند کرد و ۲) مبادله ی برق بصورت محلی به جلوگیری از اتلاف برق در سطح ایستگاه فرعی کمک خواهد کرد. در نتیجه، بسته به محل و نیازهای برق، ریز شبکه ها انگیزه و سود متقابلی برای همکاری دارند تا برق را به صورت محلی در شبکه ی توزیع مشخص شده خود خرید و فروش نمایند.

در ادامه بازی مشارکتی بین ریز شبکه ها ارائه می شود. ائتلاف  $S \subseteq N$  به عنوان تعداد ریز شبکه هائی که همکاری می کنند تعریف می شود که به دو گروه تقسیم خواهند شد: گروه فروشندگان که بوسیله  $S_S \subset S$  و گروه خریداران که با  $S_B \subset S$  بیان شده است، به طوری که  $S_S \cup S_B = S$ . در هر ائتلاف، فروشندگان در  $S_S$  برق را با خریداران در  $S_B$  همچنین با ایستگاه فرعی مبادله خواهند کرد.

در حقیقت زمانی یک ائتلاف تشکیل خواهد شد که انگیزه تشکیل ائتلاف از طرف بازیکنان وجود داشته باشد. معیاری که نشان دهنده سود عایدی هر ائتلاف است تابع مطلوبیت نامیده می شود. این تابع به هر ائتلاف عددی حقیقی نسبت می دهد که نشان دهنده سود آن ائتلاف است. در نهایت هر ریز شبکه با استفاده از سود ائتلاف، مقدار سود عایدی خود را از ائتلاف محاسبه می کند.

مطلوبیت ائتلاف  $S$  و نحوه ی هماهنگی و ارتباط بین فروشندگان و خریداران بیان خواهد شد (یعنی کدام خریدار انرژی را برای کدام فروشنده ارائه می کند). هماهنگی فروشندگان و خریداران وظیفه ی چالش برانگیزی است که با استفاده از تکنیک های نظریه بازی به آن خواهیم پرداخت.

با ارائه ی ارتباط بین خریداران و فروشندگان که حاصل از الگوریتم هماهنگی بین خریداران و فروشندگان داخل ائتلاف  $S$  است مطلوبیت ائتلاف  $S$  بصورت زیر خواهد بود:

$$u(S, \Pi) = -(\sum_{i \in S_B, j \in S_S} \omega_i P_{ij}^{loss} + \sum_{i \in S_S} \omega_i P_{i0}^{loss} + \sum_{j \in S_B} \omega_j P_{j0}^{loss}) \quad (2)$$

که  $\omega_i$  عامل قیمت گذاری، و  $P_{i0}^{loss}$  و  $P_{i0}^{loss}$  اتلاف برق در طول توزیع برق بین فروشندگان و خریداران در  $S$  و ایستگاه فرعی

<sup>20</sup> Profit Margin



ریزشبکه می دهد تا در جهت حداکثر سازی سود خود با یافتن بهترین ائتلاف طبق پرتو اردر حرکت کند. در حقیقت هر ریزشبکه با شروع از یک نقطه صفر با ادغام و انفصال در هر ریزشبکه پی آمد عایدی از آن ائتلاف را برای خود متصور می شود و در نهایت بهترین ائتلاف را جهت همکاری انتخاب می کند.

در [۳۱]، [۳۲] یک چارچوب برای الگوی تولید انرژی در ریزشبکه ها معرفی شده است. در این تحقیق تمرکز اصلی بر روی مسئله هماهنگی تزریق برق فعال به شبکه با استفاده از ریز تولید کننده ها<sup>۲۵</sup> است. هدف هر یک از این تولیدکنندگان برق، تزریق حداکثر مقدار برق است بطوریکه برخی محدودیت های موثر مانند محدودیت های ولتاژ برآورده شود. در این کار در ابتدا منطقه ای که مازاد برق فعال دارد مشخص شده است (یعنی مجموعه ای از تمام موجودیت هایی که مازاد انرژی دارند و محدودیت های ولتاژ را ارضا می کنند). براساس این یافته، این مسئله در نظریه بازی مطرح شده است که این تحقیق ارائه یک رویکرد نظریه بازی با اشتراک منصفانه تزریق برق بین تولید کنندگان است در حالیکه در همه زمان ها محدودیت های مذکور برآورده شوند. یک بازی تکرار شونده معرفی شده که میزانی از انرژی را که هر ریز شبکه می تواند به شبکه تزریق کند مشخص می نماید.

در تحقیق [۳۲]، [۳۳]، [۳۴] یک سازوکار قیمت گذاری بین ریزشبکه های متصل به هم با استفاده از نظریه بازی مطالعه شده است. در این کار به عدم پایداری انرژی های نو در تولید برق توجه شده است و براین اساس، یک مدل ریاضی در یک بازار آزاد با عرضه کنندگان و مصرف کنندگان انرژی معرفی شده است. در این مدل ائتلاف انرژی، قیمت گذاری بلادرنگ و نرخ تولید در جهت کمینه کردن هزینه های انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. سازوکار قیمت گذاری انرژی با استفاده از تابع مشخصه برای هر ریز شبکه صورت می گیرد و این ماهیت ناهمگون ریزشبکه ها که می توانند شامل توربین های بادی، صفحه های خورشیدی، مولدها و... شود دلیل انتخاب چنین تکنیک های تحلیلی مانند نظریه بازی در این حوزه است. نظریه بازی با کنترل و بهینه سازی سیستم های شبکه هوشمند به این مهم دست پیدا می کند. در تحقیق [۳۵] و [۳۶]، [۳۷] به این مسایل باز در این حوزه با استفاده از نظریه بازی پرداخته شده است.

همچنین در تحقیق [۳۸]، یک چارچوب از نظریه بازی ارائه شده که در آن شبکه های فشار قوی می توانند تصمیم بگیرند که برای تامین تقاضای پیش بینی شده مصرف کنندگان از انرژی استفاده کنند یا آن را ذخیره نمایند. این چارچوب بر

حال در اینجا دو سوال چالش برانگیز مطرح می شود. (۱) چگونه می توان در هر ائتلاف خاص خریداران را با فروشندگان هماهنگ و مرتبط کرد؟ و (۲) چگونه ریزشبکه ها می توانند ائتلاف هایی را به منظور حداقل کردن اتلاف انرژی تشکیل دهند؟

در رابطه با سوال اول، می توان روش های پیشرفته از دو شاخه اصلی نظریه بازی را انتخاب کرد: ۱- نظریه مزایده<sup>۲۱</sup> و بازی های هماهنگی<sup>۲۲</sup>. نظریه مزایده لزوماً یک چارچوب تحلیلی برای بررسی تعاملات بین فروشندگان است که هر یک از آن ها کالا یا لوازمی برای فروش به تعدادی خریدار علاقه مند به خرید کالا برای بهینه سازی عملکردهای مورد نظر خود دارند. نتیجه ی مزایده کالای فروخته شده و همچنین قیمتی است که برای آن معامله انتخاب می شود. در مدل بررسی شده، مشخص می شود که در هر گروه مزایده (در اینجا مزایده به گروه بندی ثابت شبکه های فشار قوی خریدار و فروشندگان اشاره دارد)، خریداران و فروشندگان گوناگون وجود خواهند داشت، یک چارچوب مناسب برای ایجاد هماهنگی بین خریداران و فروشندگان از طریق مزایده وجود خواهد داشت. استراتژی های هر بازیکن در گروه های مزایده تعیین قیمتی است که مشتاق به خرید/فروش انرژی دارد و همچنین مقداری است که می خواهد بخرد یا بفروشد. هدف هر بازیکن تعیین قیمت و پارامتر بهینه است که می خواهد آن را با استفاده از تابع هدف بهینه کند.

با استفاده از روش هایی مانند آنچه که در [۲۹]، [۳۰] ارائه شده است، می توان قیمت متعادل یا مقادیری که مبادله می شوند، یعنی هماهنگی فروشندگان با خریداران را تعیین کرد. سپس، کمیت ها برای تعیین مقادیر پرداختی هر بازیکن در ائتلاف تعیین می شوند. از این رو، جواب پرسش دوم یعنی چگونه ریزشبکه ها می توانند ائتلاف هایی را تشکیل دهند با استفاده از چارچوب بازی های مزایده ای به دست خواهد آمد.

به عنوان مثال، تحقیق در [۲۷]، [۳۱] راه حلی را برای پرسش دوم ارائه کرده است. در ابتدا به هر ائتلاف تابع مطلوبیتی مطابق بالا اطلاق شده است. در نهایت از دو مفهوم ادغام<sup>۲۳</sup> و انفصال<sup>۲۴</sup> برای تشکیل ائتلاف بصورت زیر استفاده شده است.

دو ائتلاف مجزا  $C, K$  مفروضند که پیامد هر ائتلاف با استفاده از تابع مطلوبیت بدست می آید. حال طبق پرتو اردر ائتلاف  $C$  به  $K$  ترجیح داده می شود اگر و تنها اگر  $C \succ K \iff \{ \varphi_j(C) \geq \varphi_j(K) \forall j \in C, K \}$  که در آن  $\varphi_j(C)$  تابع مطلوبیت ائتلاف  $C$  است. در نهایت مفهوم ادغام (شرکت در یک ائتلاف) و انفصال (جداشدن از یک ائتلاف) این امکان را به هر

<sup>21</sup> Auction Theory

<sup>22</sup> Matching Games

<sup>23</sup> Merge

<sup>24</sup> Split

<sup>25</sup> Micro-generators

### پروتکل های ارتباطی

واضح است که تمام موضوعات بیان شده درون یک شبکه هوشمند از جمله مدیریت سمت تقاضا، تعاملات بین ریزشبکه ها و ساختمان های هوشمند نیازمند شبکه ای قدرتمند، بهینه و قابل اعتماد است که بتواند زمینه لازم برای عملیات های هوشمند درون شبکه را فراهم کند. شبکه های هوشمند آتی مجموعه از تکنولوژی های ارتباطی هستند که باید به صورت موازی در کنار شبکه توزیع انرژی برق قرار گیرند. در [۴۶]، یک پروتکل ارتباطی نقطه به نقطه با استفاده از نظریه بازی ها معرفی شده است. استفاده از مفهوم هاب نیز می تواند جهت کنترل ارتباطات درون شبکه محلی و همچنین ارتباطات با شبکه اصلی به کار گرفته شود [۴۷]، [۴۸]، [۴۹]. در تحقیق [۴۷]، [۴۸]، یک چارچوب محاسباتی ابری برای حجم گسترده ارتباطات بلادرنگ درون شبکه معرفی شده است. برای این منظور یک هاب جهت کنترل ارتباطات درون شبکه محلی و همچنین ارتباطات با شبکه اصلی معرفی شده است و از نظریه برای مدیریت سمت تقاضا به وسیله این هاب استفاده شده است. در این تحقیق یک بازی مدیریت سمت تقاضا بین گروهی از هاب های انرژی هوشمند در چارچوب محاسبات ابری ارائه شده است. نتایج شبیه سازی رویکرد ارائه شده در این مقاله در نهایت به کاهش نرخ متوسط اوج مصرف تقاضای نهایی برق و هزینه انرژی می انجامد.

در [۴۲]، عنوان شده است که پروتکل های ارتباطی نقطه به نقطه نیز منجر به افزایش انگیزه در مشتریان به منظور مشارکت در تبادل انرژی در شبکه هوشمند می شود. این ارتباط می تواند بین ابزارهای هوشمند نیز صورت گیرد که در نهایت کاهش نوسانات شبکه را به دنبال دارد [۴۴].

### پروتکل های ارتباطی - امنیت

در شبکه هوشمند امروزی تعداد قابل توجهی از توابع هوشمند به منظور هوشمندسازی تامین برق ارائه، پیاده سازی و طراحی شده اند. با وجود این، توابع پیچیده درمترهای هوشمند خطرهایی را به همراه دارد که آنها را مستعد به آسیب و حمله می کند. در تحقیق [۳۹] حمله گروهی موش ها<sup>۲۷</sup> ارائه شده است که آسیب پذیری مترهای هوشمند را در دنیای سایبری بررسی می کند. همینطور آنها را به دلیل سودآوری مستقیم اقتصادی در دنیای واقعی انتشار می دهد. طبق این تحقیق، بطور جدی تا بحال هیچ کار سیستماتیکی در جهت رفع این مشکل انجام نشده است. نظریه بازی یک چارچوب بسیار مناسب برای تحلیل و مقابله با این حملات است و بدین منظر قابل اتخاذ است. در این کار دو مدل بازی تحت فرضیات

مبنای دو نوع بازی قرار دارد: بازی مزایده (برای تعیین قیمت گذاری) و بازی غیر مشارکتی برای مشکل پوتلاک (فراهم بودن امکان دسترسی برای همه). این تحقیق نشان می دهد که رسیدن به نقطه تعادل در گروه عملکرد منطقی تصمیم گیرندگان است و در غیر اینصورت رسیدن به نقطه تعادل امکان پذیر نمی باشد.

فراتر از کارهای انجام شده در [۳۹] تحقیق انجام شده در [۴۰]، [۴۱] به مسایل و چالش هایی از قبیل قیمت گذاری انرژی در ریزشبکه ها، کنترل توربین های بادی و همچنین نحوه مشارکت ریز شبکه ها اشاره کرده است.

### ریز شبکه ها - رقابتی

در سیستم های مقیاس عظیم هر عدم هماهنگی بین تقاضا و تولید انرژی به وسیله اسلک باس<sup>۲۶</sup> جبران می شود که در ریز شبکه ها اغلب چنین ذخیره انرژی در دسترس نیست. با این شرایط فراهم آوردن سازوکاری که امکان فعالیت توزیع شدگی را به ریز شبکه ها بدهد مورد توجه است بطوریکه اهداف، ظرفیت ها و محدودیت های هر قسمت را در نظر می گیرد. حال اگر چارچوب کلی ریز شبکه ها توسعه یابد هم رقابت بر سر منابع انرژی که بین بارها است افزایش می یابد و هم رقابت بر سر انرژی که بین منابع است. تکنیک های مدیریتی بصورت بازی های غیر مشارکتی (رقابتی) برای کنترل بار و منابع انرژی در سیستم های برقی کوچک مقیاس مانند ریز شبکه ها در تحقیق [۲۷] بحث شده است. بدین منظور بازی های غیرمشارکتی ایستا در این زمینه مطرح شده است [۴۲]. بطور صریح مجموعه بازیکنان به دو بخش گروه بارها و گروه منابع برقی تقسیم می شود. در تحقیق [۳۴] چگونگی انتخاب استراتژی برای بارها و گروه منابع برقی شرح داده شده است. همینطور به این پرسش پاسخ داده شده است که "چگونه بار(منبع) یک استراتژی برای بهینه کردن تابع هدف است؟".

در [۴۳]، [۴۴] یک مدل عمومی قیمت گذاری معرفی کرده است. برای این منظور یک بازی غیرمشارکتی معرفی شده است که بیش از یک عرضه کننده انرژی برق در آن وجود دارد. سپس الگوریتمی معرفی شده است که عرضه کننده ای را که به نقطه نش تعادل سیستم نزدیک تر است معرفی می کند. بدین ترتیب تشکیل ائتلاف ریز شبکه ها درون شبکه مدلسازی شده است. برای این منظور یک بازی مشارکتی معرفی شده است که نشان می دهد ائتلاف ها چگونه شکل می گیرند. در [۴۵] نیز، یک بازار خرده فروشی (انرژی) به منظور خرید و فروش انرژی طراحی شده است که منجر به افزایش منافع اقتصادی گردیده است.

<sup>27</sup> Rat-group Attack

<sup>26</sup> Slack Bus

است. بدین منظور کاربرد نظریه بازی در مدل‌سازی مسائل موجود در مدیریت سمت تقاضا، ریزشکبه‌ها، ارتباطات و امنیت مورد بررسی قرار گرفت. آنچه از این بررسی نتیجه می‌شود این است که نظریه بازی می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در شبکه‌های هوشمند جهت مدل‌سازی و بهبود کارایی این شبکه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مقالات بررسی شده نشان می‌دهند که تلاش‌ها برای ارائه تابع هزینه‌های کلی در شبکه‌های هوشمند ادامه دارد. همچنین ویژگی شبکه‌های بزرگی چون شبکه هوشمند برق نیاز به الگوریتم‌های با پیچیدگی کم را نشان می‌دهد. به طور خاص نیاز به الگوریتم‌های بهبودیافته و توزیع شده در مدیریت سمت تقاضا و تشکیل ائتلاف ریزشکبه‌ها همچنان حس می‌شود. همچنین مدل‌های براساس بازی‌های تکرارشونده می‌توانند در تحقیقات آتی بیش از پیش مورد بررسی قرار گیرند.

مختلف ارائه و مقایسه شده است. نتایج تحلیل‌ها طبق نظریه بازی بررسی شده است و در نهایت به شرکت‌های برق پیشنهاد می‌شود این سیاست‌ها را جهت انجام این مهم پیگیری نمایند که شامل فاش کردن پارامترهای دفاعی به تمامی کاربران (یعنی فاش نمودن مهاجمان بالقوه) و همینطور فاش کردن مقدار کمتر نتایج از دست رفته درحمله است. با توجه نوع عملکرد هکرها و شرکت‌های ارائه دهنده انرژی دو نوع بازی ایستا و پویا معرفی شده است که در این دو بازی شرکت دهنده ارائه دهنده انرژی تلاش می‌کند از هرگونه دست کاری در وسایل اندازه گیری جلوگیری کند. نتایج نشان می‌دهد بازی پویای معرفی شده، باعث از دست رفتن مقدار کمتر انرژی برای شرکت ارائه دهنده خواهد بود.

### نتیجه گیری

در این مقاله، بررسی کاملی از مقالات در حوزه کاربردهای نظریه بازی در شبکه‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفته

### مراجع

- Transactions on Smart Grid, Volume 1, Issue 3, Page 320 – 331, Dec. 2010.
- [9] S. Dave, M. Sooriyabandara, Zhang Luyang, "Application of a gametheoretic energy management algorithm in a hybrid predictive-adaptive scenario", 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), page 1-6, Dec. 2011.
- [10] Marzband, M. et al. 2016. Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties. IET Generation, Transmission & Distribution, 10, 12 (2016), 2999–3009.
- [11] F.L. Meng, X.J. Zeng, "A Stackelberg game-theoretic approach to optimal real-time pricing for the smart grid", Soft Computing, Volume 17, Issue 12, pp 2365-2380, Springer, December 2013.
- [12] Z. Zhu, J. Tang, S. Lambotharan, W.H. Chin, Z. Fan, "An integer linear programming and game theory based optimization for demand-side management in smart grid", GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), page 1205 – 1210, Dec. 2011.
- [13] Marzband, M. et al. 2018. Smart transactive energy framework in grid-connected multiple home microgrids under independent and coalition operations. Renewable Energy. 126, (2018), 95–106.
- [14] M. Swearingen, "Real time evaluation and operation of the smart grid using game theory", Rural Electric Power Conference (REPC), April 2011, B3-1 - B3-6.
- [15] W. Tushar, J.A. Zhang, D.B. Smith, S. Thiebaux, H.V. Poor, "Prioritizing consumers in smart grid: Energy management using game
- [1] W. Saad, H. Zhu, H.V. Poor, T. Basar, "Game-Theoretic methods for the smart grid: an overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications", IEEE Signal Processing Magazine, Volume 29, Issue 5, page 86 – 105, Sept. 2012
- [2] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Basar, and A. Hjørungnes, Game Theory in Wireless and Communication Networks: Theory, Models and Applications. Cambridge, UK: Cambridge University Press, Oct. 2011.
- [3] Noam, Nisan's book (2007), Algorithmic Game Theory, Non-cooperative games, page 20
- [4] Noam, Nisan's book (2007), Algorithmic Game Theory, Cooperative games, page 21
- [5] Noam, Nisan's book (2007), Algorithmic Game Theory, Potential games, page 494
- [6] H. K. Nguyen, J.B. Song, Han Zhu, "Demand side management to reduce Peak-to-Average Ratio using game theory in smart grid", IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs), page 91-96, March 2012.
- [7] Marzband, M. et al. 2017. Distributed generation for economic benefit maximization through coalition formation based game theory concept. International Transactions on Electrical Energy Systems, (2017), 1–16.
- [8] A.-H. Mohsenian-Rad, V.W.S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, A. Leon-Garcia, "Autonomous demand-side management based on gametheoretic energy consumption scheduling for the future smart grid", IEEE

- theory", IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, page 4239 – 4243, June 2013.
- [16] Makhlof Hadji, Marc Girod-Genet, Hossam Affifi, "A game theory approach with dynamic pricing to optimize smart grid operation", *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 4, no. 3, July 2015: pp. 186-198.
- [17] Rui Tang, Shengwei Wang, Hangxin Li, "Game theory based interactive demand side management responding to dynamic pricing in price-based demand response of smart grids", *Applied Energy*, Volume 250, 15 September 2019, Pages 118-130.
- [18] Khoulood Salameh, Richard Chbeir, Haritza Camblong, "Multi-objective cooperative scheduling: An application on smart grids", *Applied Computing and Informatics*, Volume 15, Issue 1, January 2019, Pages 67-79.
- [19] T. Tatarenko, L. Garcia-Moreno, "A game theoretic and control theoretic approach to incentive-based demand management in smart grids", 22<sup>nd</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Palermo, page 634 – 639, June 2014.
- [20] Q. Zhu, T. Basar, "Multi-Resolution large population stochastic differential games and their application to demand response management in the smart grid", *Dynamic Games and Applications*, Volume 3, Issue 1, pp 68-88, March 2013.
- [21] F.B. Saghezchi, F.B. Saghezchi, A. Nascimento, J.Rodriguez, "Game theory and pricing strategies for demand-side management in the smart grid", IEEE/IET International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), page 883 - 887, July 2014
- [22] Yunpeng Wang, W. Saad, Han Zhu, H.V. Poor, T. Basar, "A gametheoretic approach to energy trading in the smart grid", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Volume 5, Issue 3, page 1439-1450, April 2014.
- [23] H. K. Nguyen, J. Song, Z. Han, "Distributed demand side management with energy storage in smart grid", *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, Volume PP, Issue 99, November 2014.
- [24] I. Atzeni, L.G. Ordonez, G. Scutari, D.P. Palomar, J.R. Fonollosa, "Noncooperative and cooperative optimization of distributed energy generation and storage in the demand-side of the smart grid", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Volume 61, Issue 10, page 2454 – 2472, February 2013.
- [25] Weidong Chen, Yu Zeng, Chongqing Xu, "Energy storage subsidy estimation for microgrid: A real option game-theoretic approach", *Applied Energy*, Volume 239, 1 April 2019, Pages 373-382.
- [26] Rui Tang, Hangxin Li, Shengwei Wang, "A game theory-based decentralized control strategy for power demand management of building cluster using thermal mass and energy storage", *Applied Energy*, Volume 242, 15 May 2019, Pages 809-820.
- [27] M.O. Spata, S. Rinaudo, F. Gennaro, "A novel matchmaking algorithm for smart grid applications", *International ICE Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE)*, page 1-6, June 2014.
- [28] L. Chen, N. Li, S. H. Low, and J. C. Doyle, "Two market models for demand response in power networks," in *Proc. International Conference*.
- [29] Tavakoli, M. et al. 2018. CVaR-based energy management scheme for optimal resilience and operational cost in commercial building microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 100, (2018), 1–9.
- [30] Marzband, M. et al. 2018. Framework for smart transactive energy in home-microgrids considering coalition formation and demand side management. *Sustainable Cities and Society*. 40, (2018), 136–154.
- [31] N. Li, L. Chen, and S. H. Low, "Optimal demand response based on utility maximization in power networks," in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, Jul. 2011.
- [32] W. Saad, Han Zhu, H.V. Poor, "Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks", *Communications Workshops (ICC)*, page 1 – 5, June 2011.
- [33] Sh Chakraborty, Sh Nakamura, T Okabe, "Real-time energy exchange strategy of optimally cooperative microgrids for scale-flexible distribution system". Smart Energy Research Laboratories, Central Research Laboratories, NEC Corporation, Japan 2015.
- [34] D. Friedman, D. P. Friedman, and J. Rust, *The Double Auction Market: Institutions, Theories, and Evidence*. Boulder, CO, USA: Westview Press, 1993
- [35] Marzband, M. et al. 2017. Distributed generation for economic benefit maximization through coalition formation based game theory concept. *International Transactions on Electrical Energy Systems*,. (2017), 1–16.
- [36] P. Huang, A. Scheller-Wolf, and K. Sycara, "Design of a multi-unit double auction e-market," *Computational Intelligence*, vol. 18, no. 4, pp. 596–617, Feb. 2002.
- [37] G. Cavararo, L. Badia, "A game theory framework for active power injection management with voltage boundary in smart grids", *European Control Conference (ECC)*, page 2032 – 2037, July 2013.
- [38] A. Belgana, B.P. Rimal, M. Maier, "Multi-objective pricing game among interconnected smart microgrids", *PES General Meeting Conference & Exposition*, page 1-5, July 2014.
- [39] I. Maity and S. Rao, "Simulation and pricing mechanism analysis of a solar-powered

- electrical microgrid," *IEEE Systems Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 275–284, Aug. 2010.
- [40] W. W. Weaver and P. T. Krein, "Game-theoretic control of small-scale power systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1560–1567, Jul. 2009.
- [41] Z. Alibhai, W. A. Gruver, D. B. Kotak, and D. Sabaz, "Distributed coordination of micro-grids using bilateral contracts," in *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, The Hague, Netherlands, Oct. 2004.
- [42] Chunyan Li, Wenyue Cai, Hongfei Luo, Qian Zhang, "Power utilization strategy in smart residential community using non-cooperative game considering customer satisfaction and interaction", *Electric Power Systems Research*, Volume 166, January 2019, Pages 178-189.
- [43] Chong Huang, S. Sarkar, "Dynamic pricing for distributed generation in smart grid", *IEEE Green Technologies Conference*, page 422-429, April 2013.
- [44] A. Sheikhi, M. Rayati, S. Bahrami, A. M. Ranjbar, S. Sattarit, "A cloud computing framework on demand side management game in smart energy hubs", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 64, Pages 1007–1016, January 2015.
- [45] Ds Marzband, M. et al. 2018. An advanced retail electricity market for active distribution systems and home microgrid interoperability based on game theory. *Electric Power Systems Research*. 157, (2018), 187–99.
- [46] Wayes Tushar, Tapan Kumar Saha, Chau Yuen, Thomas Morstyn, Malcolm D. McCulloch, H. Vincent Poor, Kristin L. Wood, "A Motivational Game-Theoretic Approach for Peer-to-Peer Energy Trading in the Smart Grid", *Applied Energy*, Volume 243, 1 June 2019, Pages 10-20.
- [47] S. Ming, L. Jingqiang, Z. Xiaokun, X. Changwei, "A game-theory analysis of the rat-group attack in smart grids", *IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, Singapore, page 1-4, April 2014.
- [48] E. B. Tchawou Tchuisseu, D. Gomila, P. Colet, "Reduction of power grid fluctuations by communication between smart devices", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 108, June 2019, Pages 145-152.
- [49] Seyed Omid Sobhani, Siamak Sheykha, Mohammad Reza Azimi, Reinhard Madlener, "Two-Level Distributed Demand-Side Management Using the Smart Energy Hub Concept", *Energy Procedia*, Volume 158, February 2019, Pages 3052-3063.