



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Simultaneous Operation of Electricity and Natural Gas Systems Through the P2P Energy Trading Mechanism

Meysam Feili<sup>a,\*</sup>, Mohammad Taghi Ameli<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Shahid Beheshti University, Department of Electrical Engineering, Tehran, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 27 March 2023

Revised: 05 July 2023

Accepted: 15 July 2023

### Keywords:

natural gas:

minlp:

P2P energy trading:

AC power flow:

demand response:

DERs.

## ABSTRACT

P2P energy trading is a new technology for increasing the integration of DERs with the power system. This technology enables customers to locally trade energy with each other. The DERs can actively participate in the day ahead and real-time balancing markets. This paper proposes a new two-level framework for the integrated operation of the power and natural gas systems through P2P energy trading considering the demand response capability. In the first level, the optimal operation schedules of the customer are determined through the MINLP optimization problem considering the AC power flow and natural gas steady-state model. In the following (level two), the customers trade energy with each other through the P2P framework. In order to increase the customers' profits and simulate the human trader behaviors, we employed the ZIP trader assumption in the proposed framework. In order to evaluate the introduced framework, it is implemented on the standard IEEE 33 bus test system and 33-node modified gas network. The results of the numerical study revealed that the proposed method can dramatically reduce the total operation cost of the entire system and improved the performance of both networks.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30276.2426>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author:

E-mail address: [m\\_feili@sbu.ac.ir](mailto:m_feili@sbu.ac.ir)

How to cite this article:

Feili, M., & mameli, M. (2023). Simultaneous operation of electricity and natural gas systems through the P2P energy trading mechanism. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(75), 205-224. doi: 10.22075/jme.2023.30276.2426

# بهره‌برداری همزمان از شبکه برق و گاز طبیعی با استفاده از مکانیزم معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی

میثم فیلی<sup>۱\*</sup>، محمد تقی عاملی<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷	<p>معامله نظیر به نظیر<sup>۱</sup> انرژی الکتریکی فناوری نوظهوری برای ادغام بهینه منابع تولید پراکنده<sup>۲</sup> انرژی، با سیستم قدرت است. این مکانیزم امکان معامله هم‌تا به هم‌تا انرژی الکتریکی را به صورت محلی به مشترکان می‌دهد. منابع تولید پراکنده انرژی الکتریکی می‌توانند به صورت فعال در بازار روز بعد<sup>۳</sup> و بازار لحظه‌ای<sup>۴</sup> با اهداف گوناگون مشارکت نمایند. در این مقاله روش دو مرحله‌ای جهت بهره‌برداری همزمان از دو حامل انرژی برق و گاز طبیعی با در نظر گرفتن قابلیت پاسخ گویی بار<sup>۵</sup> و مکانیزم معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی توسعه یافته است. در مرحله نخست، روشی مبتنی بر بهینه‌سازی غیر خطی<sup>۶</sup> جهت برنامه‌ریزی همزمان دو حامل انرژی برق و گاز طبیعی با در نظر گرفتن پخش بار متناوب و قیود هیدرولیک شبکه گاز استفاده شده است. در ادامه، در مرحله دوم با استفاده از مکانیزم معامله هم‌تا به هم‌تا، مشترکان انرژی الکتریکی را مابین خود به صورت محلی معامله می‌کنند. همچنین، جهت افزایش سود ساکنان شبکه مورد مطالعه و شبیه‌سازی رفتار معامله‌گر انسان، در این مقاله از فرضیه معامله‌گر ZIP<sup>۷</sup> استفاده شده است. جهت اعتبار سنجی روش پیشنهادی در این مقاله، مدل مفروض بر روی شبکه توزیع ۳۳ باسه استاندارد<sup>۸</sup> و شبکه گاز تنظیم شده با ۳۳ گره پیاده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله موجب کاهش هزینه بهره‌برداری از شبکه مورد مطالعه و بهبود شاخص‌های فنی شبکه برق و گاز می‌گردد.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۴	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴	
<p><b>واژگان کلیدی:</b> گاز طبیعی، برنامه‌ریزی غیر خطی، معامله نظیر به نظیر انرژی، پخش بار متناوب، پاسخ گویی بار، منابع تولید پراکنده، بهره‌برداری همزمان از شبکه برق و گاز طبیعی.</p>	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30276.2426>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

توسط نیروگاه‌های بزرگ به صورت متمرکز تولید شده و توسط خط انتقال و در ادامه توسط شبکه توزیع به مشترکین نهایی منتقل می‌شود. در هر حال، افزایش ضریب نفوذ منابع توزیع شده انرژی در سمت مصرف

## ۱- مقدمه

سیستم قدرت مرسوم و سنتی به صورت متمرکز بهره‌برداری و کنترل شده که جهت شارش قدرت در آن به صورت یک طرفه است. در سیستم‌های قدرت مرسوم توان

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m\_feili@sbu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>1</sup> Peer to peer (P2P)

<sup>2</sup> Distributed energy resources (DERs)

<sup>3</sup> Day ahead (DA)

<sup>4</sup> Real time balancing (RTB)

<sup>5</sup> Demand response (DR)

<sup>6</sup> Mixed integer non liner programming (MINLP)

<sup>7</sup> Zero intelligent plus (ZIP)

<sup>8</sup> IEEE 33 bus test system

استناد به این مقاله:

فیلی، میثم، و عاملی، محمدتقی. (۱۴۰۲). بهره‌برداری همزمان از شبکه برق و گاز طبیعی با استفاده از مکانیزم معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی. مدل سازی در مهندسی، ۲۱(۷۵)، ۲۰۵-۲۲۴. doi: 10.22075/jme.2023.30276.2426

محلی فراهم کرده است. مکانیزم معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی، پتانسیل افزایش مزایای اقتصادی برای مشترکین و سهولت در ایجاد تعادل مابین تولید و مصرف را ایجاد می‌کند. مطالعات انجام شده در راستای مکانیزم معاملات همتا به همتا انرژی الکتریکی به شکل چشمگیری طی سالیانه گذشته افزایش پیدا کرده است. تحقیقات صورت گرفته، معاملات نظیر به نظیر انرژی را از جنبه‌های مختلف نظیر طراحی بازار، پلتفرم معاملات، زیرساخت‌های مخابراتی، سیاست گذاری و تاثیرات اجتماعی مورد بررسی قرار داده‌اند [۹]. اخیراً چندین مرجع به بررسی استفاده از مکانیزم بازار، جهت بهره‌برداری از دو شبکه برق و گاز پرداخته‌اند. مرجع [۱۰] به ایجاد زیرساخت مناسب جهت ادغام سه بازار برق، گاز و حرارت با یکدیگر از طریق معامله همتا به همتا انرژی پرداخته است. اما این مرجع تاثیرات روش پیشنهادی بر شبکه توزیع الکتریکی و گاز طبیعی را بررسی نکرده است. مرجع [۱۱] دو بازار انرژی الکتریکی و گاز طبیعی را از طریق دو فناوری توربین‌گازی و فناوری تبدیل برق به گاز<sup>۱۲</sup> مد نظر قرار داده است. این مرجع، روش‌های مختلف تعیین قیمت تسویه بازار را با در نظر گرفتن حداکثر سود بررسی کرده، و همچنین نقاط تعادل قیمت‌های تسویه<sup>۱۳</sup> هر بازار را از طریق روش<sup>۱۴</sup> محاسبه کرده است. مرجع [۱۲] بازار انرژی ادغام شده برای حرارت و الکتریسیته طراحی کرده است. در روش پیشنهادی قیمت تسویه از طریق روشی مبتنی بر پخش بار بهینه محاسبه شده است. همچنین در این مرجع تاثیر الگوی مصرف انرژی الکتریکی و رقابت موجود در بازار بر قیمت تسویه ارزیابی شده است. مرجع [۱۳] تاثیر ادغام حامل‌های مختلف انرژی را در عملکرد سیستم قدرت ارزیابی کرده است. نویسندگان این مقاله بازاری ادغام شده برای حامل‌های انرژی برق، گاز و حرارت طراحی کرده‌اند، سبب قیمت تسویه را از طریق روش<sup>۱۵</sup> و الگوریتم دو فازی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی به

موجب تغییر رویکرد در کنترل و بهره‌برداری از سیستم قدرت شده است [۱]. از دیدگاه فنی، شارش دو طرفه توان که نتیجه توسعه نصب منابع تولید پراکنده در سمت مصرف می‌باشد بهره‌برداری و کنترل سیستم قدرت را با چالش مواجه کرده است [۲]. ادغام انواع مختلف منابع تولید پراکنده مانند توربین‌های گازی و پنل‌های خورشیدی با ریزشبکه‌ها<sup>۹</sup> جهت توسعه شبکه هوشمند<sup>۱۰</sup> با آلاینده‌گی پایین امری اجتناب ناپذیر است [۳، ۴]. افزایش نصب و ادغام منابع تولید پراکنده با ریزشبکه‌ها و همچنین توسعه روزافزون فناوری‌های مرتبط با این منابع، موجب افزایش اهمیت کنترل و مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها شده است [۵].

نیروگاه‌های گازی به دلیل مشخصات منعطف مانند، بارگذاری سریع و زمان راه اندازی کوتاه به عنوان یکی از منابع پر کاربرد تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها، جهت ایجاد تعادل بین تولید و مصرف استفاده می‌شوند [۶، ۷]. با توجه به افزایش استفاده از توربین‌های گازی در نزدیکی محل مصرف به عنوان یکی از روش‌های مدیریت انرژی و کاهش نوسانات توان تولیدی منابع تجدیدپذیر انرژی، برنامه‌ریزی همزمان برق و گاز در سطح ریزشبکه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

بازار انرژی تراکنشی<sup>۱۱</sup> به عنوان یک فناوری قابل اعتماد و پایدار جهت ایجاد تعادل پویا بین تولید و مصرف از طریق مکانیزم‌های اقتصادی و کنترلی موثر برای شبکه هوشمند ادغام شده با منابع تولید پراکنده با ضریب نفوذ بالا معرفی شده است [۸]. معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی به عنوان زیر مجموعه‌ای از بازار انرژی تراکنشی در سالیان اخیر توسعه پیدا کرده و در سراسر جهان توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است [۹]. معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی امکان معامله و تبادل انرژی مابین مصرف کنندگان و تولید کنندگان در محل مصرف را به صورت

<sup>14</sup> Diagonalization algor

<sup>15</sup> Hybrid power flow

<sup>9</sup> Microgrid (MG)

<sup>10</sup> Smart grid

<sup>11</sup> Transactive energy market (TEM)

<sup>12</sup> Power to gas (P2G)

<sup>13</sup> Clearing price (CP)

تسویه هر دو بازار را به صورت توزیع شده تعیین می‌کند. مرجع [۲۳] جهت افزایش مشارکت در معاملات نظیر به نظیر انرژی الکتریکی اهداف مبتنی بر انرژی مصرفی مشترکین را بیش از پیش توسعه داده است. نویسندگان [۲۴] بازاری دوگانه متشکل از بازار همتا به همتا انرژی الکتریکی و بازار تولیدکننده به شبکه<sup>۱۶</sup> جهت کاهش هزینه پرداختی مصرف کنندگان، افزایش سود تولیدکنندگان و کاهش نسبت پیک به متوسط مصرف انرژی الکتریکی<sup>۱۷</sup> توسعه داده است. مرجع [۲۵] با توسعه ایده معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی و مد نظر قرار دادن قیود شبکه توزیع برق، مدلی جهت معامله انرژی در بازار همتا به همتا ارائه کرده است. روش ارائه شده در این مرجع به نحوی است که پیشنهادهای قیمت شرکت کنندگان در بازار را قبل از آغاز فرآیند معامله از لحاظ تاثیر بر قیود شبکه الکتریکی مد نظر قرار می‌دهد. در [۲۶] مدلی جهت بهره‌برداری از یک جامعه با مصرف صفر انرژی<sup>۱۸</sup> مجهز به خودروهای الکتریکی و هیدروژنی از طریق بازار معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی معرفی شده است، به طوریکه جهت بهبود عملکرد بازار همتا به همتا میزان مازاد و کمبود انرژی توسط برنامه مدیریت انرژی مبتنی بر تعرفه زمان استفاده<sup>۱۹</sup> مشخص می‌شود. در [۲۷] با ادغام روش جستجو Lévy با الگوریتم NSGA-III روشی جهت مدیریت انرژی ریزشکه چند حامله انرژی برای بهره‌برداری همزمان از دو شبکه برق و گاز معرفی شده است. با این حال این مرجع از پرداختن به قیود شبکه گاز طبیعی و واحدهای تولید توان مبتنی بر سوخت گاز در برنامه مدیریت انرژی ریزشکه صرفه نظر کرده است. نویسندگان مرجع [۲۸] روشی جهت مدیریت دو حامل انرژی برق و گاز طبیعی در ساختمان‌های مسکونی مجهز به پیل سوختی و ریز توربین تولید همزمان از طریق معامله نظیر به نظیر انرژی معرفی کرده‌اند. ایده اصلی این مقاله را می‌توان در امکان بهره‌برداری از چند حامل انرژی در یک همسایگی خانگی معرفی کرد. در [۲۹] روشی برای

دست آورده‌اند. همچنین در این مرجع، تاثیر عدم قطعیت بار و شرکت کنندگان بازار در معاملات انرژی بررسی شده است. مرجع [۱۴] به ادغام دو فناوری نوظهور مبدل برق به گاز هیدروژن و سیستم ذخیره‌ساز گاز هیدروژن در یک شبکه محلی از طریق معامله نظیر به نظیر انرژی پرداخته است. مرجع [۱۵] مدلی جهت ادغام نیروگاه‌های سنتی با بازار محلی همتا به همتا انرژی با در نظر گرفتن مشخصات و مزایای هر یک از دو سیستم ارائه کرده است. مدل ارائه شده توسط این مرجع به نحوی است که تاثیر ژنراتور ۱۰۰ مگاواتی را در کنار یک نیروگاه خورشیدی ۱۰۰ کیلوواتی به صورت همزمان در بهره‌برداری و کنترل شبکه الکتریکی در نظر گرفته است. مرجع [۱۶] روشی برای معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن ازدحام خطوط انتقال برق و قیود امنیت شبکه معرفی کرده است. مرجع [۱۷] روشی برای معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی مابین ریزشکه‌ها در نظر گرفته به نحوی که هزینه استفاده از زیرساخت‌های شبکه توزیع نیز در معاملات مشترکین در نظر گرفته می‌شود. نویسندگان مرجع [۱۸] عدم قطعیت‌های مرتبط با منابع تولید پراکنده و بار الکتریکی رادر فرآیند تسویه بازار تبادل انرژی مد نظر قرار داده‌اند. مرجع [۱۹] روشی برای معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی در سه ریزشکه متصل به هم معرفی کرده است. نویسندگان [۲۰] از طریق استفاده از معامله همتا به همتا انرژی بازاری جهت ایجاد تعادل مابین تولید و مصرف انرژی الکتریکی ایجاد کرده‌اند. نویسندگان [۲۱] امکان ایجاد بازارهای محلی جهت معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی را بررسی کرده و تاثیر حضور خودروهای برقی بر این بازارها را در سطح شبکه توزیع الکتریکی مد نظر قرار داده‌اند. نویسندگان مرجع [۲۲] مدلی خطی جهت ادغام دو بازار الکتریسیته و حرارت را از طریق معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی معرفی کرده‌اند. مدل معرفی شده در این مرجع با در نظر گرفتن نقاط مشترک دو حامل انرژی برق و حرارت، قیمت

<sup>19</sup> Time of use (TOU)

<sup>16</sup> Prosumer to the grid

<sup>17</sup> Peak to average ratio

<sup>18</sup> Net zero energy community

از کل شبکه با در نظر گرفتن قیود عملیاتی شبکه برق، گاز و پاسخ گویی بار برای روز بعد انجام می‌گیرد. با حل مسئله بهینه‌سازی غیر خطی برنامه تقاضا و تولید انرژی الکتریکی بهینه برای کل مشترکین شبکه مورد مطالعه مشخص می‌شود. در مرحله دوم خریداران (ریزشبکه‌ها) و فروشنده‌ها (توربین‌های گازی) به معامله انرژی الکتریکی مابین یکدیگر با استفاده از مکانیزم معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی مبتنی بر روش CDA می‌پردازند. این مقاله به صورت کلی به شش بخش اصلی تقسیم می‌گردد. در بخش دوم، مدل و ایده اصلی مقاله ارائه می‌گردد. در بخش سوم، برنامه‌ریزی غیر خطی دو حامل برق و گاز برای روز بعد معرفی می‌شود. در ادامه، در بخش چهارم مکانیزم معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی بررسی شده و نحوه ارائه پیشنهادات بهینه توسط مشترکان مبتنی بر الگوریتم CDA معرفی می‌شود. در بخش پنجم شبیه‌سازی و مطالعات عددی بررسی شده و در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

## ۲- روش پیشنهادی

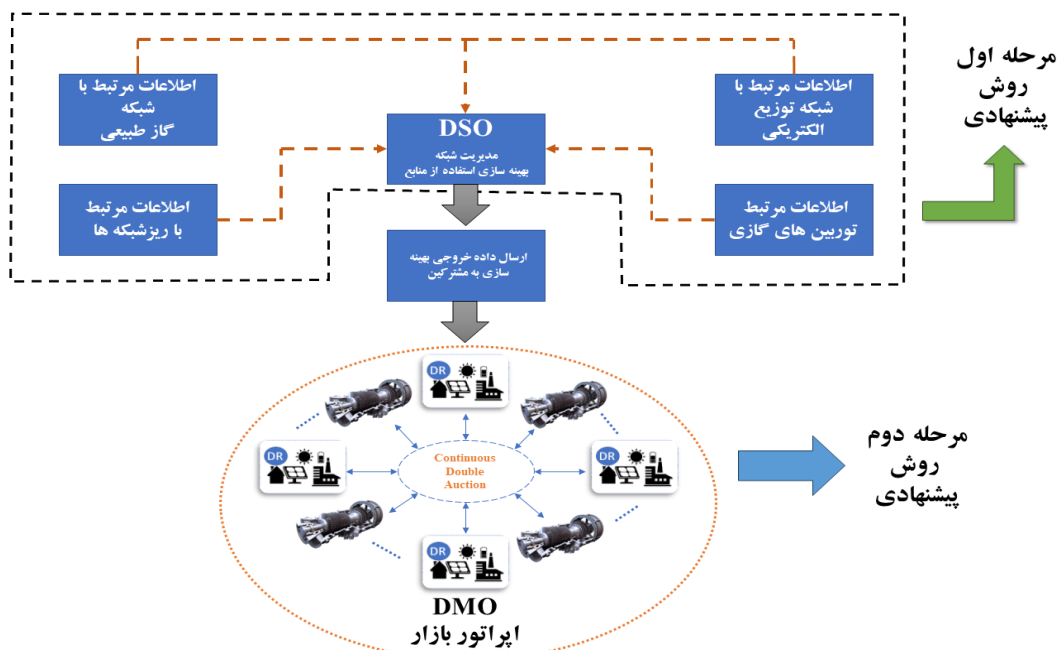
در این مقاله روشی برای بهره‌برداری همزمان از دو حامل انرژی برق و گاز از طریق معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی معرفی شده است. چهارچوب کلی و بازه زمانی مرتبط با روش پیشنهادی به ترتیب در شکل (۱) و شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱) روش پیشنهادی از سه بخش تشکیل شده، که بر اساس شکل (۲) به صورت متوالی اجرا می‌شوند. در مرحله اول داده‌های مرتبط با واحدهای گازی (مانند نرخ حرارتی نیروگاه‌ها و توان نامی آنها و غیره)، اطلاعات خطوط برق و گاز و داده‌های مرتبط با ریزشبکه‌ها از جمله بار الکتریکی و تقاضا برای گاز طبیعی، میزان انعطاف‌پذیری بار (پاسخ گویی بار)، ظرفیت ذخیره-ساز انرژی الکتریکی و غیره به اپراتور سیستم توزیع ۲۱ ارسال می‌شوند.

بهره‌برداری همزمان از دو شبکه برق و گاز که از طریق توربین گازی و بارهای حرارتی در هم ادغام شده‌اند با در نظر گرفتن قیود عملیاتی هر دو شبکه معرفی شده است.

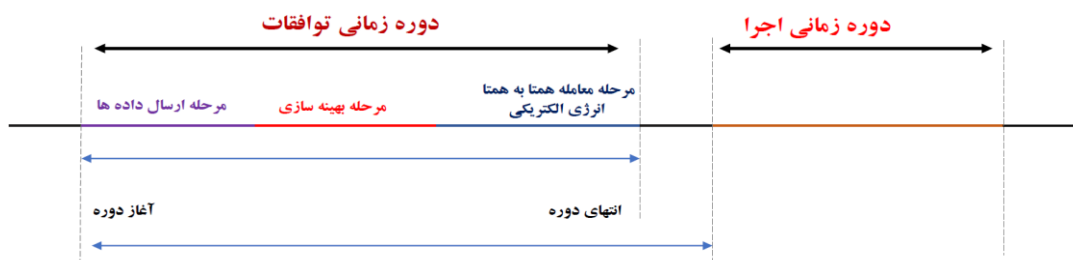
با توجه به مطالعه طیف گسترده‌ای از مراجع، هیچ کدام از مراجع مطالعه شده به بررسی تاثیر استفاده از معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی مبتنی روش ۲۰ جهت بهره‌برداری همزمان از دو شبکه برق و گاز طبیعی برای بازار روز بعد نپرداخته‌اند. از نوآوری‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- معرفی مدل و چهارچوب دو مرحله‌ای جهت برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از دو حامل انرژی برق و گاز طبیعی.
- توسعه مدل بهینه‌سازی مبتنی بر غیر خطی جهت مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی الکتریکی تولیدی و مصرفی با در نظر گرفتن پاسخ گویی بار، قیود شبکه الکتریکی (پروفیل ولتاژ) از طریق پخش بار متناوب و قیود هیدرولیک شبکه گاز طبیعی از طریق مدل حالت پایدار شبکه گاز (طی مرحله اول).
- توسعه مدل معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی مبتنی بر روش CDA در مرحله ثانویه جهت معامله محلی انرژی الکتریکی توسط تولید کنندگان و مصرف کنندگان.
- استفاده از فرضیه مشترکین (ZIP) جهت افزایش سود مشترکین از مشارکت در بازار معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی و شبیه‌سازی رفتار معامله‌گر انسان.

در این مقاله بهره‌برداری از دو شبکه برق و گاز طبیعی در دو مرحله مجزا برای روز بعد صورت می‌گیرد. مرحله اول که به صورت یک برنامه مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی غیر خطی انجام می‌شود، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از دو حامل انرژی برق و گاز طبیعی با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری



شکل (۱)، طرح مفهومی بهره‌برداری از شبکه برق و گاز از طریق معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی.



شکل (۲)، افق برنامه‌ریزی و اجرا مدل پیشنهادی.

الکتریکی واحدهای گازی برای روز بعد است. در مرحله سوم، بازار معامله هم‌تا به هم‌تا انرژی الکتریکی توسط اپراتور بازار شبکه ۲۲ تشکیل شده و مشترکان انرژی الکتریکی مصرفی و تولیدی خود را با یکدیگر به صورت نظیر به نظیر مطابق روش CDA معامله می‌کنند.

فرض شده است که اپراتور سیستم توزیع به صورت همزمان مسئولیت مدیریت و بهره‌برداری از شبکه برق و گاز را برعهده داشته، همچنین تامین کننده/خرده فروش برق و گاز طبیعی نیز می‌باشد [۹]. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شد زمان اجرا روش پیشنهادی در روز بعد طی دوره زمانی اجرا است. بازار زمان واقعی ۲۳، فرآیند تسویه بازار ۲۴،

در مرحله دوم (مرحله بهینه‌سازی)، اپراتور سیستم توزیع با در نظر گرفتن همه داده‌های ارسالی و با توجه به تعرفه برق و گاز طبیعی، برنامه مدیریت انرژی را که یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی می‌باشد را برای کل شبکه، اعم از ریزشکته‌ها و توربین‌های گازی حل می‌کند. شایان‌ذکر است که برنامه‌ریزی انجام گرفته توسط اپراتور سیستم توزیع به صورت متمرکز انجام شد و توسعه روش بهینه‌سازی مدیریت انرژی به صورت توزیع شده از اهداف این مقاله نمی‌باشد. خروجی مرحله دوم روش پیشنهادی، برنامه بهینه مصرف انرژی هر یک از ریزشکته‌ها، سیکل شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی و برنامه بهینه تولید انرژی

24 market settlement

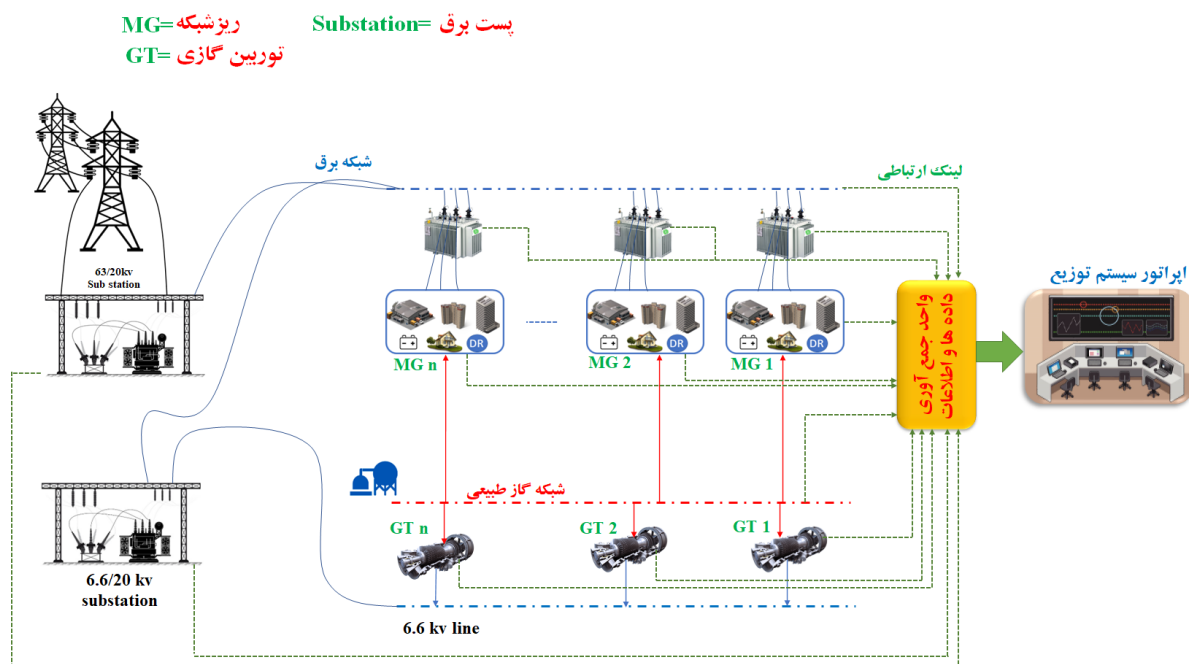
22 Distribution market operator (DMO)  
23 Real time market

پیشنهادی یک برنامه‌ریزی انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی غیر خطی جهت تعیین نقطه کار بهینه برای ریزشبه‌ها و توربین‌های گازی با هدف کاهش هزینه کل بهره‌برداری از شبکه، بهبود پروفیل ولتاژ شبکه برق با در نظر گرفتن قیود هیدرولیک شبکه گاز طبیعی است. شبکه توزیع برق موجود از طریق پست ۶۳/۲۰ کیلوولت به شبکه فوق توزیع متصل است. هر یک از ریزشبه‌ها از طریق ترانسفورماتورهای ۲۰/۰.۴ کیلوولت به شبکه توزیع الکتریکی متصل هستند. ریزشبه‌ها علاوه بر تقاضا الکتریکی تقاضا مصرف برای گاز طبیعی دارند. در این راستا ریزشبه‌ها به شبکه گاز طبیعی نیز متصل می‌باشند. خروجی توربین‌های گازی که نقطه اشتراک حامل انرژی گاز طبیعی و برق می‌باشد ۶.۶ کیلوولت است که از طریق پست ۶.۶/۲۰ کیلوولت به شبکه توزیع الکتریکی متصل هستند. خطوط نقطه چین سبز رنگ جریان شارش اطلاعات مابین عناصر مختلف شبکه و اپراتور سیستم توزیع را نشان می‌دهد. اپراتور سیستم توزیع از طریق واحد جمع‌آوری داده اطلاعات مختلف را از مؤلفه‌های مختلف شبکه جمع‌آوری کرده و بعد از مراحل پردازش و تصمیم‌گیری، نتایج حاصله را تحت عنوان برنامه مصرف و تولید بهینه به مشترکان ارسال می‌کند.

عدم قطعیت‌های مرتبط با رفتار مشترکین و بار الکتریکی و گاز طبیعی جزو اهداف این مقاله نیست. مطابق شکل (۲) روش پیشنهادی به دو دوره مختلف تقسیم می‌شود. دوره زمانی اول که با (آغاز دوره) مشخص شده و طی آن سه مرحله مختلف پیشنهادی در مقاله به ترتیب اجرا می‌شوند. این دوره با (آغاز دوره) شروع شده و داده‌ها به اپراتور سیستم توزیع ارسال می‌گردند. همچنین با اتمام فرآیند معاملات هم‌تا به هم‌تا انرژی الکتریکی در زمان (انتهای دوره) کار این دوره به اتمام می‌رسد. با اندکی تاخیر، اجرا توافقات حاصل از معاملات نظیر به نظیر انرژی الکتریکی در دوره زمانی اجرا آغاز می‌گردد. در این مقاله، دوره زمانی توافقات یک روز قبل از دوره اجرا انجام گرفته و از ابتدای روز بعد دوره زمانی اجرا آغاز می‌گردد.

### ۳- برنامه‌ریزی همزمان شبکه برق و گاز مبتنی بر بهینه‌سازی غیر خطی (مرحله دوم)

شمای کلی طرح پیشنهادی جهت برنامه‌ریزی همزمان دو حامل انرژی برق و گاز که حاوی جهت شارش داده، جهت شارش توان، و تعامل مشترکان مختلف با یکدیگر می‌باشد در شکل (۳) نشان داده شده است. مرحله دوم روش



شکل (۳)، معماری طرح پیشنهادی.

$$P_{i,t}^{Tot,dec} = P_{i,t}^{dec,n} + P_{i,t}^{dec,m} \quad (۶)$$

$$\forall i \in N_{mg}, t \in T$$

$$SOC_{i,t}^{batt} = SOC_i(0) + \quad (۷)$$

$$\sum_{t=1}^T (P_{i,t}^{ch} - P_{i,t}^{Tot,dch})$$

$$\forall i \in N_{mg}$$

$$SOC_i^{min} \leq SOC_{i,t}^{batt} \leq SOC_i^{max} \quad (۸)$$

$$\forall i \in N_{mg}, t \in T$$

$$P_{i,t}^{Tot,dec} \times P_{i,t}^{ch} = 0 \quad (۹)$$

$$\forall i \in N_{mg}, t \in T$$

رابطه (۷) جهت محاسبه سطح انرژی ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی ارائه شده است. همچنین روابط (۸-۹) به ترتیب نمایانگر محدوده مجاز تغییرات سطح انرژی ذخیره‌سازها و محدودیت جلوگیری از شارژ و دشارژ همزمان ذخیره-سازهای انرژی الکتریکی است. روابط (۱۰) و (۱۱) به ترتیب گاز طبیعی تزریقی در هر یک از گره‌های شبکه گاز و ارتباط مابین گاز طبیعی مصرفی و توان الکتریکی تولیدی واحدهای گازی را نشان می‌دهد [۳۰]. قیود مرتبط با هیدرولیک شبکه گاز طبیعی در روابط (۱۲) تا (۱۴) نشان داده شده است [۳۱]. رابطه (۱۲) محدودیت‌های مرتبط با جریان تزریقی در لوله‌های خط انتقال گاز را نشان می‌دهد. به این مفهوم که جریان عبوری از خط لوله گاز طبیعی برابر است با جریان تزریقی در گره‌های مرتبط به آن خط و همچنین خط لوله گاز طبیعی فاقد تلفات است. رابطه (۱۳) معادله Weymouth بوده، که جهت ایجاد ارتباط مابین جریان گاز طبیعی جاری در خطوط لوله گاز طبیعی و فشار گره‌های مختلف شبکه گاز استفاده می‌شود [۳۲]. رابطه (۱۴) محدودیت مرتبط با تغییرات فشار گاز در گره‌های شبکه گاز طبیعی را نشان می‌دهد

$$G_{j,t}^{grid} = g_{j,t}^{gt} + g_{j,t}^{load} \quad (۱۰)$$

$$\forall i \in N_g, t \in T$$

$$g_{j,t}^{gt} = a_j P_{j,t}^{gt^2} + b_j P_{j,t}^{gt} + c_j \quad (۱۱)$$

$$\forall j \in N_{gt}, t \in T$$

تابع هدف بهینه‌سازی غیرخطی پیش‌بینی شده برای مرحله دوم طرح پیشنهادی، کاهش هزینه کل بهره‌برداری از شبکه مورد مطالعه می‌باشد. تابع هدف نشان داده شده در معادله (۱) که تابعی از مصرف برق، گاز طبیعی و تعرفه‌های انرژی شبکه بالادست است. روابط (۲) تا (۴) مرتبط با قابلیت پاسخ گویی بار ریزشکها هستند.

$$\min \sum_i^{N_{mg}} \sum_t^T P_{i,t}^{grid} \times S_{i,t}^{rit} + \quad (۱)$$

$$\sum_i^{N_{mg}} \sum_t^T P_{i,t}^{cur} \times S_{i,t}^{cur} - \sum_i^{N_{mg}} \sum_t^T P_{i,t}^{dch,m} \times S_{i,t}^{fit} +$$

$$\sum_i^{N_g} \sum_t^T G_{i,t}^{grid} \times S_{i,t}^{gas} - \sum_i^{N_g} \sum_t^T P_{i,t}^{gt} \times S_{i,t}^{fit}$$

$$\sum_{t=1}^T P_{i,t}^{dem,DR} = \sum_{t=1}^T (P_{i,t}^{dem}) \quad (۲)$$

$$\forall i \in N_{mg}$$

$$P_{i,t}^{dem,DR} \leq (P_{i,t}^{dem}) \times f_{i,t}^{flex,MAX} \quad (۳)$$

$$\forall i \in N_{mg}, t \in T$$

$$P_{i,t}^{dem,DR} \geq (P_{i,t}^{dem}) \times f_{i,t}^{flex,MIN} \quad (۴)$$

$$\forall i \in N_{mg}, t \in T$$

رابطه (۵)، توازن توان در هر یک از ریزشکها موجود در شبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین در روابط (۶) تا (۸) قیود مرتبط با ذخیره ساز انرژی الکتریکی نشان داده شده است. مطابق رابطه (۶) توان دشارژ ذخیره ساز انرژی الکتریکی در ریزشکها به دو قسمت تقسیم می‌شود. یک بخش از این توان در داخل ریزشک مصرف شده و بخش دیگر به شبکه بالادست فروخته می‌شود. تصمیم اینکه سهم هر قسمت چقدر باشد توسط اپراتور سیستم توزیع با حل مسئله بهینه‌سازی گرفته می‌شود.

$$P_{i,t}^{grid} + (\eta_{dch} P_{i,t}^{dch,n}) + P_{i,t}^{cur} \quad (۵)$$

$$- \left( \frac{1}{\eta_{ch}} P_{i,t}^{ch} \right) - P_{i,t}^{dem,DR} = 0$$

$$\forall i \in N_{mg}, t \in T$$



$$q_{i,t}^{grid} + q_{i,t}^{gt} + q_{i,t}^{dec,n} + q_{i,t}^{cur} - q_{i,t}^{dem,DR} \quad (16)$$

$$= f_{i,t} \sum_{\substack{j \\ j \neq i}}^{N_g} (G_{i,j} e_{j,t} - B_{i,j} f_{j,t})$$

$$- e_{i,t} \sum_{\substack{j \\ j \neq i}}^{N_g} (G_{i,j} e_{j,t} + B_{i,j} f_{j,t})$$

$$\forall i \in N_g, t \in T$$

$$|p_{i,t}^{grid} - p_{i,t-1}^{grid}| \leq p_i^{grid,ramp} \quad (17)$$

$$\forall i \in N_e, t \in T$$

$$(p_{i,t}^{grid})^2 + (q_{i,t}^{grid})^2 \leq (S_{i,t}^{grid})^2 \quad (18)$$

$$\forall i \in N_e, t \in T$$

$$|p_{i,t}^{gt} - p_{i,t-1}^{gt}| \leq p_i^{gt,ramp} \quad (19)$$

$$\forall i \in N_{gt}, t \in T$$

$$p_i^{\min,gt} \leq p_{i,t}^{gt} \leq p_i^{\max,gt} \quad (20)$$

$$\forall i \in N_{gt}, t \in T$$

$$(V_i^{\min})^2 \leq e_{i,t}^2 + f_{i,t}^2 \leq (V_i^{\max})^2 \quad (21)$$

$$\forall i \in N_e, t \in T$$

#### ۴- معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی

مکانیزم مورد استفاده در این مقاله جهت معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی مبتنی بر روش CDA می‌باشد. شایان ذکر است که روش استفاده شده برای معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی در این مقاله ترکیبی از چندین روش مرتبط ارائه شده در [۲۵] و [۳۴] بدون نوآوری در اصل آنها است. این در حالی است که ترکیب معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی با بهره‌برداری همزمان از شبکه برق و گاز که بخش بهینه‌سازی آن در قسمت قبل ارائه شده، نوآوری اصلی این مقاله محسوب می‌شود.

مکانیزم CDA جهت ایجاد پیوند ۲۵ مابین خریداران و فروشندگان که علاقه به معامله انرژی الکتریکی با یکدیگر دارند به عنوان روش موثر شناخته شده است [۹]. این روش در معامله کالاهای مختلف نظیر سهام و بورس کالا به

$$G_{i,j,t}^{line} - \sum_j^{N_g} G_{j,t}^{grid} = 0 \quad (12)$$

$$\forall i, j \in N_g, t \in T \text{ and } i < j$$

$$G_{i,j,t}^{line} + G_{j,i,t}^{line} = 0$$

$$G_{i,j,t}^{line} = \frac{1}{4} \times \quad (13)$$

$$\frac{|\Pr_{i,t}^2(1-c\Delta h) - \Pr_{j,t}^2| D_{i,j,t} S_{i,t}}{\left(1 - \frac{c\Delta h}{2}\right) \lambda ZRL_{i,j} Temp}$$

$$i, j \in N_g, t \in T$$

$$\forall \text{ and } c = \frac{2g}{ZRTemp}$$

$$\Pr_{i,t}^{\min} \leq \Pr_{i,t} \leq \Pr_{i,t}^{\max} \quad (14)$$

$$\forall i \in N_g, t \in T$$

در این مقاله، جهت بررسی تاثیر معاملات انرژی الکتریکی بر عملکرد شبکه توزیع از پخش بار متناوب استفاده شده است [۳۳].

روابط (۱۵) تا (۲۱) محاسبات مختلف مرتبط با پخش بار متناوب را نشان می‌دهند. روابط (۱۵) و (۱۶) نشان دهنده معادلات توازن توان در هر یک از گره‌های شبکه توزیع الکتریکی است. به دلیل نصب و استفاده از توربین‌های گازی در شبکه مورد مطالعه، تغییرات و دامنه توان تزریقی در گره‌های مختلف شبکه توزیع برق توسط روابط (۱۷) و (۱۸) محدود شده است. همچنین محدودیت توان تولیدی توربین‌های گازی و تغییرات آن توسط روابط (۱۹) و (۲۰) در نظر گرفته می‌شود. محدودیت تغییرات مجاز برای ولتاژ شینه‌های مختلف شبکه توزیع الکتریکی در رابطه (۲۱) نشان داده شده است.

$$P_{i,t}^{grid} + P_{i,t}^{gt} + P_{i,t}^{dec,n} + P_{i,t}^{cur} - P_{i,t}^{dem,DR} \quad (15)$$

$$= e_{i,t} \sum_{\substack{j \\ j \neq i}}^{N_g} (G_{i,j} e_{j,t} - B_{i,j} f_{j,t})$$

$$+ f_{i,t} \sum_{\substack{j \\ j \neq i}}^{N_g} (G_{i,j} e_{j,t} + B_{i,j} f_{j,t})$$

$$\forall i \in N_g, t \in T$$

که چندین پیشنهاد با قیمت یکسان به صورت همزمان دریافت شود، این پیشنهادات بر اساس زمان دریافت مرتب می‌شوند. در این راستا هرچه درخواست دیر ارسال شود امتیاز آنها پایینتر خواهد بود.

هر زمانی که پیشنهادهای خرید و فروش برای تبادل ارسال می‌شوند بر اساس اصول ذکر شده در پاراگراف بالا در دفتر سفارش تخصیص داده می‌شوند. بعد از تخصیص در دفتر سفارش، اپراتور بازار سعی در ایجاد معامله مابین خریداران و فروشندگان می‌کند. شروط معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی مبتنی بر روش CDA در مرجع [۳۷] ارائه شده است. همچنین در این مقاله جهت افزایش سود مشترکان از شرکت در بازار همتا به همتا انرژی الکتریکی و شبیه-سازی رفتار معامله‌گر واقعی "انسان" از فرضیه معامله‌گر ZIP استفاده شده که به صورت کامل در مرجع [۳۸] بررسی شده است.

## ۵- شبیه‌سازی و نتایج

### ۵-۱- مفروضات

روش پیشنهادی در این مقاله در شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE و در شبکه گاز طبیعی تنظیم شده ۳۳ شینه بررسی شده است. تعداد شینه‌های شبکه گاز همانند شبکه الکتریکی ۳۳ باسه در نظر گرفته شده است. مشخصات شبکه گاز مد نظر در این مقاله توسط نویسنده و بر اساس شبکه واقعی گاز طبیعی انتخاب شده است [۳۹]. در شبکه الکتریکی گره صفر باس اسلک با  $e_{0,t} = 20$  و  $f_{0,t} = 0$  کیلو ولت می‌باشد. معماری شبکه مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است. در شبکه مورد مطالعه برای نشان دادن پتانسیل کامل روش پیشنهادی مشترکین به دو دسته ریزشکه‌ها و توربین‌های گازی تقسیم می‌شوند، که شامل ۱۴ توربین گازی و ۱۹ ریزشکه هستند. شبکه گاز طبیعی ۳۳ باسه علاوه بر تغذیه گاز طبیعی مصرفی توربین‌های گازی، تقاضا ریزشکه‌ها به گاز طبیعی را نیز تامین می‌کند. حداقل و حداکثر فشار گاز در شینه‌های مختلف شبکه گاز به ترتیب ۳۰ و ۹۰ (Bar) می‌باشد. تعرفه برق مورد استفاده

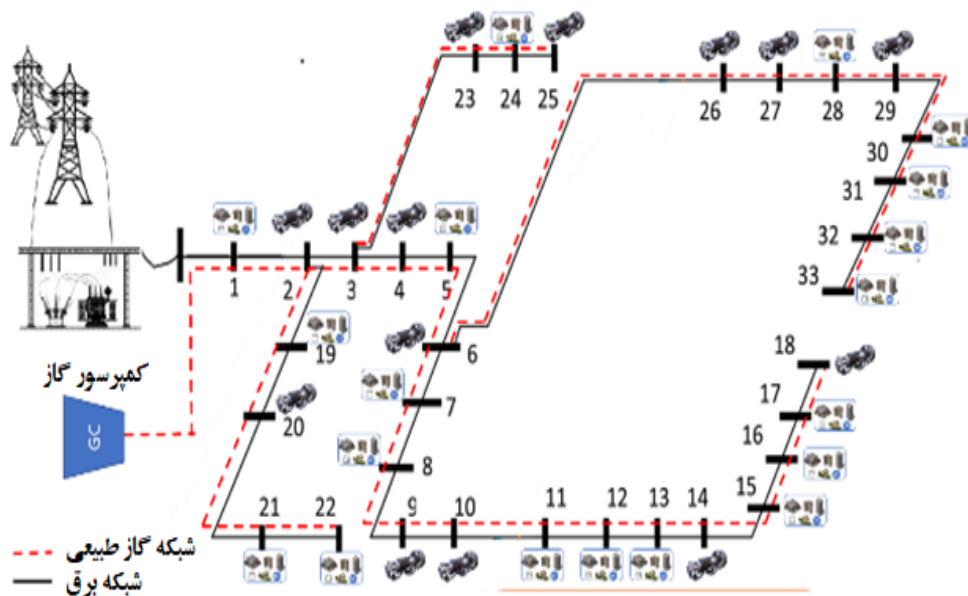
صورت گسترده در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. اخیراً مقالاتی نظیر [۳۵، ۳۶] از این روش برای معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی استفاده کرده‌اند. در این مقاله از روش CDA ارائه شده در مرجع [۲۵] جهت معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی استفاده شده است. همانطور که در بخش ۲ ارائه شد، مشترکان (ریزشکه‌ها و توربین‌های گازی) از طریق مکانیزم CDA به معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی می‌پردازند. برای هر دوره زمانی  $t$  در بازه زمانی هدف  $T$ ، در دوره برنامه‌ریزی و توافق مشترکان (ریزشکه‌ها و توربین‌های گازی) پیشنهادهای خود را ارسال می‌کنند. در این مقاله فرض شده که ریزشکه‌ها فاقد هرگونه مولد الکتریکی اعم از مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. اما وجود ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی موجب شده که در ساعات مختلف، ریزشکه‌ها بتوانند فروشنده و یا خریدار انرژی الکتریکی باشند. پیشنهادات ارسال شده توسط خریداران توسط  $(b_t, \pi_{b,t}, \sigma_{b,t}, \tau_{b,t})$  نشان داده شده، که به مفهوم این است که خریدار  $b_t$  علاقه‌مند به خرید  $\sigma_{b,t}$  کیلووات ساعت انرژی با قیمت  $\pi_{b,t}$  با واحد دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد که زمان ارسال پیشنهاد به اپراتور بازار شبکه توزیع  $\tau_{b,t}$  نشان داده می‌شود. به صورت مشابه درخواست فروش توسط توربین‌های گازی توسط  $(s_t, \pi_{s,t}, \sigma_{s,t}, \tau_{s,t})$  معرفی می‌شود.

در دوره توافق CDA، درخواست‌های خرید و فروش انرژی توسط مشترکان به صورت آنسکرون به اپراتور بازار ارسال می‌شوند. بعد از دریافت پیشنهادات برای زمان  $t$ ، اپراتور بازار برای این درخواست‌ها دفتر سفارش ۲۶ متناسب را تخصیص می‌دهد. شایان ذکر است که به هریک از بازه‌های زمانی  $t$  یک دفتر سفارش توسط اپراتور بازار تخصیص داده می‌شود. در هر دفتر سفارش، پیشنهادهای خرید بر اساس  $\pi_{b,t}$  به صورت نزولی مرتب شده و پیشنهادهای فروش نیز بر اساس  $s_t$  به صورت صعودی مرتب می‌شود. در صورتی

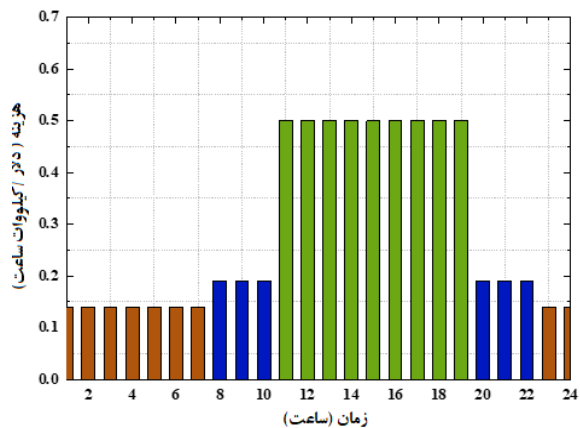
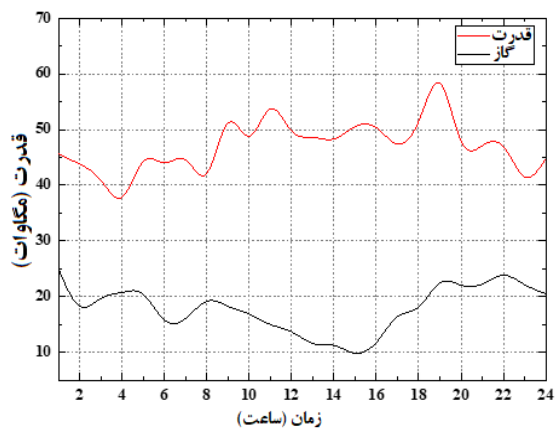
مشخصات مرتبط با توربین‌های گازی نصب شده در شبکه مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است. حد بالا و پایین تغییرات توربین گازی ۱۰۰ درصد و ۱۰ درصد توان نامی آن در نظر گرفته شده است. همچنین دیگر پارامترهای مورد نیاز را می‌توان از [۳۳] به دست آورد.

در بخش شبیه‌سازی، استفاده از مکانیزم CDA برای معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی مابین مشترکین ارائه شده و نتایج با حالت بدون استفاده از مکانیزم بازار مقایسه شده است. مسئله بهینه‌سازی ارائه شده در این مقاله از نوع غیرخطی بوده که در نرم افزار GAMS توسط سالور BARON حل شده است. با توجه به نوع مسئله بهینه‌سازی انتظار نمی‌رود که به جواب بهینه مطلق دست پیدا کنیم. همچنین الگوریتم مرتبط با مکانیزم CDA در محیط MATLAB R2016 پیاده‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌ها در لپ‌تاپ با سخت افزار Core i5, 2.5 GHz با رم ۶ گیگابایت انجام شده است.

در این مقاله در شکل (۵) و تعرفه خرید برق از مشترکین و قیمت فروش گاز طبیعی به آنها به ترتیب ۰.۱ دلار به ازای هر کیلووات ساعت و ۰.۰۴۲۵ دلار به ازای هر متر مکعب است. بار الکتریکی و گاز طبیعی کل شبکه مورد مطالعه در شکل (۶) نشان داده شده است. شایان‌ذکر است که هر یک از ریزشبکه‌ها سهم متفاوتی از بارهای الکتریکی و گاز طبیعی نشان داده شده در شکل (۶) دارند. بازده شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین حداقل و حداکثر سطح انرژی ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی ۲۰ درصد و ۹۰ درصد ظرفیت کلی در نظر گرفته شده است. مشخصات ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی موجود در شبکه مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین قیمت پرداختی بابت قطعی بار الکتریکی مشترکین ۳.۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت انرژی است. حد بالا و پایین انعطاف‌پذیری بار الکتریکی به ترتیب ۱۳۰ درصد و ۷۰ درصد است. همچنین



شکل (۴)، معماری شبکه مورد مطالعه.



شکل (۶) بار الکتریکی و تقاضا گاز طبیعی تجمیعی شبکه مورد مطالعه.

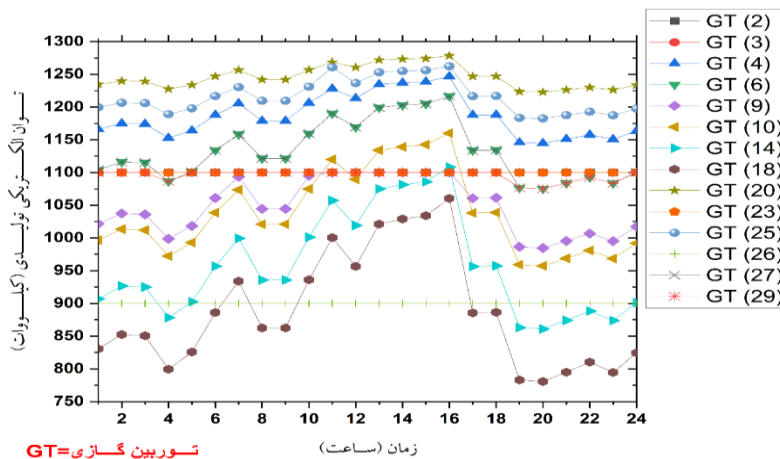
شکل (۵) تعرفه زمان استفاده.

جدول (۱)، مشخصات ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی موجود در شبکه الکتریکی مورد مطالعه.

گره	ظرفیت (کیلووات ساعت)	SOC(0) (کیلووات ساعت)	گره	ظرفیت (کیلووات ساعت)	SOC(0) (کیلووات ساعت)
۱	۱۸۰۰	۵۴۰	۱۷	۱۲۰۰	۴۸۰
۵	۱۸۰۰	۵۴۰	۱۹	۱۸۰۰	۵۴۰
۷	۱۴۰۰	۴۲۰	۲۱	۱۲۰۰	۳۶۰
۸	۱۴۰۰	۴۲۰	۲۲	۱۰۰۰	۳۰۰
۱۱	۱۰۰۰	۳۰۰	۲۴	۱۶۰۰	۴۸۰
۱۲	۱۴۰۰	۴۲۰	۲۸	۱۰۰۰	۳۰۰
۱۳	۱۲۰۰	۳۶۰	۳۰	۱۶۰۰	۴۸۰
۱۵	۱۶۰۰	۴۸۰	۳۱	۱۸۰۰	۵۴۰
۱۶	۱۸۰۰	۵۴۰	۳۲	۱۲۰۰	۳۶۰
			۳۳	۱۰۰۰	۳۰۰

جدول (۲)، مشخصات ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی موجود در شبکه الکتریکی مورد مطالعه.

شماره شینه	۲	۳	۴	۶	۹	۱۰	۱۴	۱۸	۲۰	۲۳	۲۵	۲۶	۲۷	۲۹
قدرت نامی (مگاوات)	۱.۲	۱.۲	۱.۶	۱.۶	۱.۲	۱.۴	۱.۶	۱.۶	۱.۶	۱.۲	۱.۶	۱.۲	۱.۸	۱.۲



شکل (۷)، منحنی تولید توان توربین‌های گازی موجود در شبکه مورد مطالعه در انتهای مرحله دوم روش پیشنهادی.

## ۵-۲- شبیه سازی

در این بخش شبیه سازی و مطالعه عددی ارائه خواهد شد. مطابق آنچه در قسمت های قبلی این مقاله ارائه شد، با استفاده از مکانیزم CDA امکان معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی مابین ریزشبه ها و توربین های گازی امکان پذیر می شود. در مرحله بهینه سازی (گام دوم روش پیشنهادی) تولید انرژی الکتریکی توربین های گازی، برنامه مصرف انرژی الکتریکی، سطح انرژی ذخیره سازهای توان ۲۷ و سیکل شارژ و دشارژ ذخیره سازهای هر یک از ریزشبه ها به ترتیب مطابق شکل های (۷-۱۰) مشخص می گردند. همانطور که اشاره شد، شکل (۷) نشان دهنده توان تولید توربین های گازی برنامه ریزی شده توسط اپراتور شبکه است. توان تولیدی اکثر واحدهای گازی به هنگام پیک بار افزایش می یابد. دلیل این رخداد را می توان در افزایش تعرفه انرژی الکتریکی مابین ساعت ۱۱ تا ۱۸ پیدا کرد. به این مفهوم که تعرفه بالا انرژی موجب شده تا واردات انرژی الکتریکی از شبکه بالادست در این دوره کاهش یابد و اپراتور شبکه جهت حفظ ولتاژ شینه های مختلف در محدوده مجاز تولید واحدهای گازی را افزایش می دهد. در این بین توان الکتریکی تولیدی برخی از واحدهای توربین گازی در کل دوره ۲۴ ساعته ثابت مانده است. با توجه به تابع هزینه توربین های گازی رابطه (۱۱) تولید توان برای این واحدها تا مقدار مشخصی مقرون به صرفه است. در این راستا، عدم افزایش تولید توان واحدهای گازی شماره ۲۶ و ۳ را می توان در وضعیت مناسب ولتاژ شینه های اطراف این واحدها معرفی کرد. شکل (۸)، نشان دهنده منحنی های مصرف انرژی الکتریکی تجمعی ریزشبه ها، توان تزریقی توسط شبکه بالا دست در طول ساعات مختلف، بار الکتریکی مرتبط با شارژ ذخیره سازهای انرژی الکتریکی و توان تامین شده توسط این ذخیره سازها است. همانطور که مشخص است با استفاده از قابلیت پاسخ گویی بار، بخش عمده ای از تقاضا برق ریزشبه ها به دوره کم باری منتقل شده است. ذخیره سازهای انرژی الکتریکی در دوره کم

باری، ساعت ۱ تا ۷ صبح، کاملاً شارژ می گردند. در طول این دوره به دلیل افزایش مصرف انرژی الکتریکی، جهت پایداری ولتاژ شینه های مختلف شبکه توزیع انرژی الکتریکی توان تولیدی توربین های گازی افزایش یافته است با توجه به شکل (۷) و شکل (۸) در ساعت ۴ صبح توان تولیدی توربین ها افت ناگهانی را تجربه کرده است. دلیل این امر کاهش بار الکتریکی ریزشبه ها در این ذخیره سازهای انرژی است. در این راستا، در انتهای دوره کم باری با اتمام دوره شارژ گروهی ذخیره سازهای انرژی الکتریکی موجود و کاهش تقاضا برای توان الکتریکی، تولید توان توربین های گازی جهت جلوگیری از افزایش ولتاژ شینه های مختلف شبکه توزیع الکتریکی کاهش می یابد. در دوره اوج بار الکتریکی با افزایش شدید تعرفه انرژی الکتریکی، توان تزریقی توسط شبکه بالادست به حداقل مقدار خود می رسد. در این دوره انرژی ذخیره شده در ذخیره سازهای الکتریکی تا حد مجاز در شبکه مورد مطالعه تخلیه می گردد. در این دوران نیز جهت حفظ ولتاژ شینه های مختلف شبکه در محدوده مجاز توان تولیدی توربین های گازی افزایش یافته است.

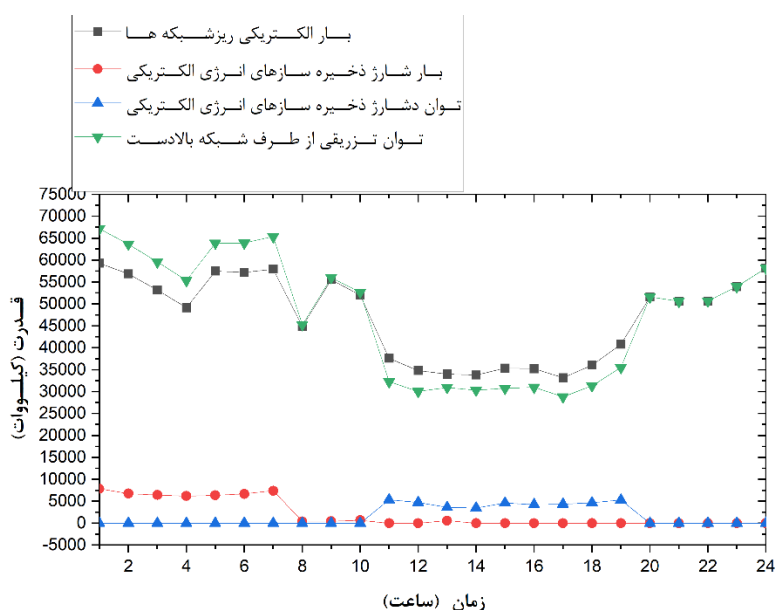
با وجود استفاده از مسئله بهینه سازی غیرخطی معرفی شده، به دلیل نبود بستری جهت معامله محلی انرژی الکتریکی، توان تولیدی توسط توربین های گازی مستقیم به شبکه بالادست فروخته می شود. شکل (۹) و شکل (۱۰) به ترتیب نشانگر سطح انرژی الکتریکی کل ذخیره سازهای موجود در ریزشبه ها و سیکل شارژ و دشارژ کل این ذخیره سازها است. همانطور که مشخص است ذخیره سازها در دوره کم باری شارژ شده و در نهایت طی دوره اوج بار جهت تامین بخشی از تقاضا انرژی الکتریکی مصرفی ریزشبه ها تخلیه می گردند.

هزینه کل بهره برداری از شبکه مورد مطالعه بدون استفاده از برنامه بهینه بهره برداری از دو شبکه برق و گاز (روابط ۱-۲۱) ۳۶۶۵۸۰ دلار به صورت روزانه است. در این حالت بار الکتریکی و گاز طبیعی کل شبکه مطابق شکل (۶) است.

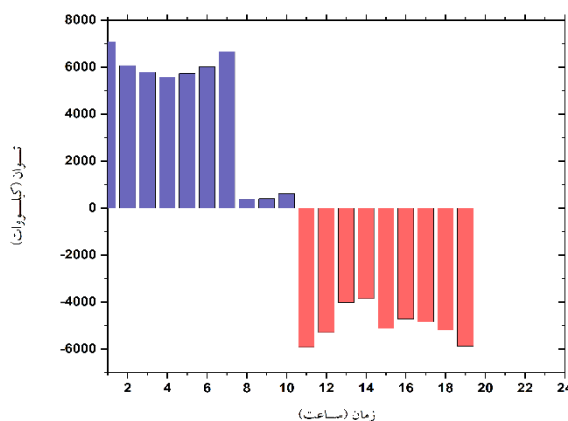
الکتریکی و تغییرات فشار گاز طبیعی در گره‌های مختلف شبکه گاز را مابین دو حالت استفاده از برنامه بهینه‌سازی پیشنهادی و بدون آن مقایسه کرده‌اند. کاهش هزینه بهره‌برداری کل با استفاده از مرحله دوم روش پیشنهادی در حالی رخ می‌دهد که همزمان با حفظ تغییرات فشار گاز طبیعی در گره‌های مختلف شبکه در رنج مجاز، افت ولتاژ در انتهای خط شبکه توزیع حدود ۰.۷٪ نسبت به حالت بهره‌برداری بدون استفاده از روش بهینه‌سازی بهبود می‌یابد.

همچنین فرض شده است توربین‌های گازی با حداکثر توان خود در حالت تولید هستند. با توجه به اینکه ذخیره‌سازهای انرژی نیاز به مدیریت سیکل شارژ و دشارژ دارند در این حالت غیر فعال شده‌اند.

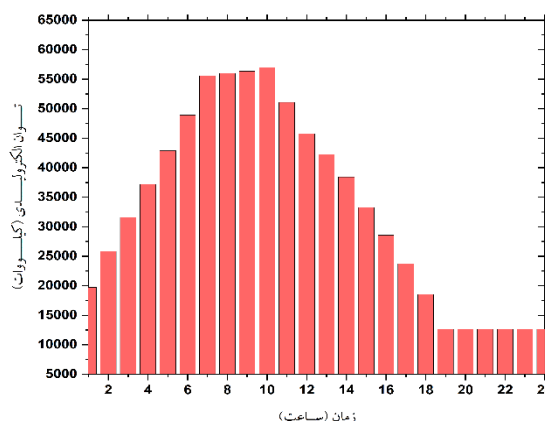
هزینه کل بهره‌برداری از شبکه مورد مطالعه بدون استفاده از مکانیزم معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی و فقط با استفاده از برنامه‌ریزی پیشنهادی روابط (۱) تا (۲۱)، ۳۰۹۴۹۱.۳۵۴ دلار به صورت روزانه است. شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب تغییرات ولتاژ باس‌های مختلف شبکه توزیع



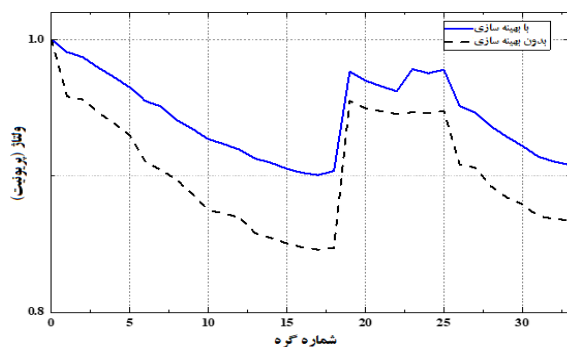
شکل (۸)، مقایسه مابین منحنی بار الکتریکی جمع‌ی ریز شبکه‌ها، توان شارژ و دشارژ ذخیره سازهای انرژی الکتریکی و توان تزریقی شبکه در هر شین شبکه توزیع.



شکل (۱۰)، سیکل شارژ و دشارژ کل ذخیره‌سازها.

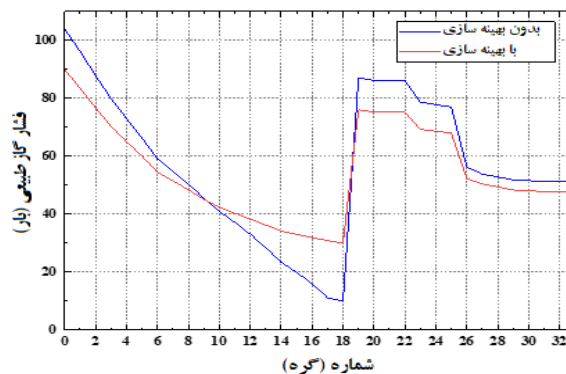


شکل (۹)، منحنی سطح انرژی کل ذخیره‌سازها.



شکل (۱۲)، متوسط پروفیل ولتاژ شبکه توزیع انرژی الکتریکی.

جدول ۳ دفتر سفارش متناظر با ساعت ۱۰ صبح را نشان می‌دهد. ارسال پیشنهادات خرید و فروش و معامله انرژی الکتریکی مطابق الگوریتم پیشنهادی در [۳۷] بوده که به صورت مشترک توسط ریزشبه‌ها، توربین‌های گازی و اپراتور بازار انجام می‌گیرد. با بررسی دفتر سفارش متناظر با ساعت ۱۰ صبح می‌توان دریافت که ریزشبه‌ها انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را ارزانت‌تر از تعرفه شبکه بالا دست خریداری کرده‌اند، همچنین توربین‌های گازی با قیمت بالاتر از نرخ مصوب برای خرید برق توسط شبکه برق، انرژی الکتریکی تولیدی خود را به ریزشبه‌های همسایه فروخته‌اند. شکل (۱۳) مقایسه‌ای مابین هزینه پرداختی ریزشبه‌ها و مبلغ دریافتی توربین‌های گازی جهت خرید و فروش انرژی الکتریکی طی ساعت ۱۰ صبح انجام داده است. منحنی‌های شکل (۱۳) از سمت چپ به ترتیب عبارتند از: WOP2P (خاکستری) مبلغ کل دریافتی توربین‌های گازی طی مرحله دوم و بدون استفاده از روش معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی، WP2P (قرمز) مبلغ کل دریافتی توربین‌های گازی طی مرحله دوم و مرحله سوم (استفاده از روش معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی)، WOP2P (آبی) هزینه کل پرداختی ریزشبه‌ها طی مرحله دوم و بدون معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی و WP2P (سبز) هزینه کل پرداختی ریزشبه‌ها طی مرحله دوم و سوم (با معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی) هستند. با استفاده از مکانیزم معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی طی ساعت ۱۰ صبح، مبلغ دریافتی توربین‌های گازی ۵۳٪



شکل (۱۱)، متوسط تغییرات فشار گاز در گره‌های مختلف شبکه گاز.

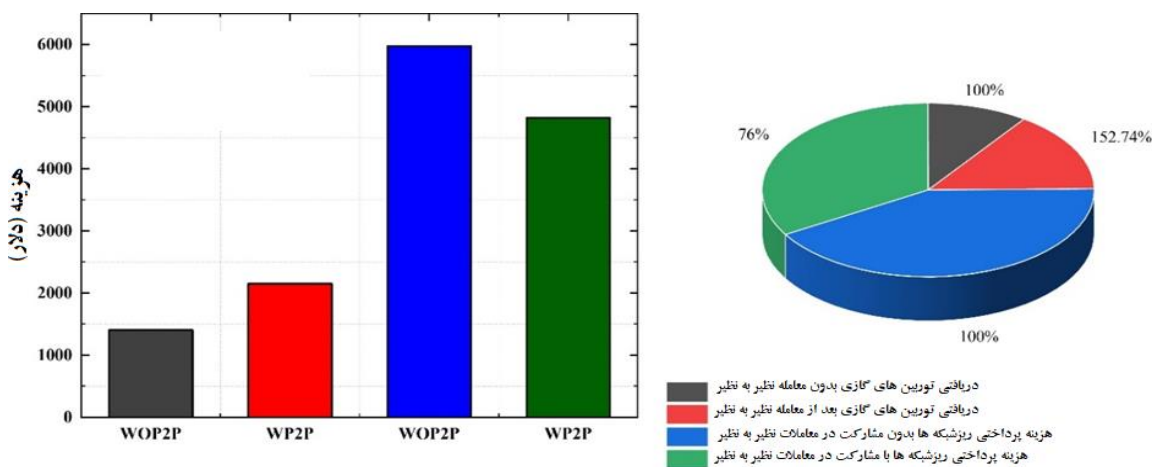
بعد از اتمام مرحله دوم (نتایج شکل‌های (۷-۱۲)، در مرحله سوم برای کل ۲۴ ساعت روز بعد مشترکان از طریق مکانیزم CDA پیشنهادهای مرتبط با خرید و یا فروش انرژی را به اپراتور بازار ارسال می‌کنند. در این راستا، برای هر ساعت از روز بعد به صورت جداگانه دفتر سفارش تشکیل می‌شود. در این قسمت برای نمونه نحوه معاملات و دفتر سفارش متناظر با ساعت ۱۰ صبح روز بعد را بررسی می‌کنیم. نرخ تعرفه خرید برق و فروش آن در ساعت ۱۰ صبح، به ترتیب ۰.۱ و ۰.۱۹ دلار است.

جدول ۳، دفتر سفارش متناظر با ساعت ۱۰ صبح.

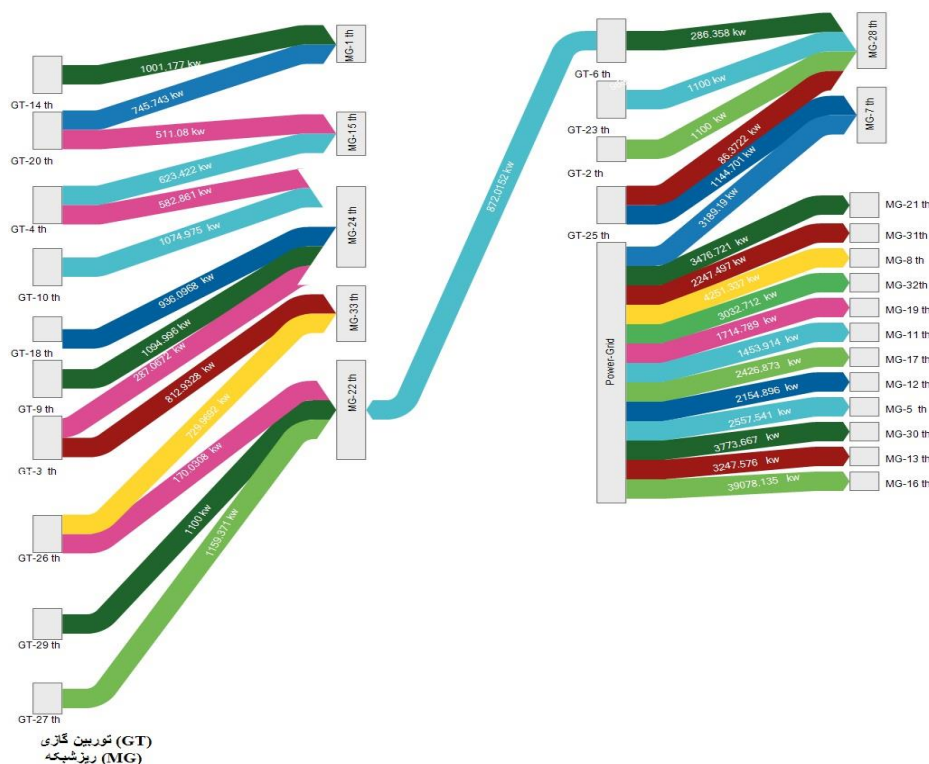
فروشنده	پیشنهاد (دلار)	پیشنهاد (دلار)	خریدار
۱۴	۰.۱۱۹۴	۰.۱۸۶۹	۱
۲۰	۰.۱۲۸۲	۰.۱۸۵۵	۱۵
۴	۰.۱۳۰۳	۰.۱۸۵۱	۲۴
۱۰	۰.۱۳۳۳	۰.۱۷۴۴	۳۳
۱۸	۰.۱۳۶	۰.۱۶۴۵	۲۲
۹	۰.۱۴۲۳	۰.۱۵۹۸	۲۸
۳	۰.۱۴۸	۰.۱۵۳۴	۷
۲۶	۰.۱۴۸۲	۰.۱۵۱۳	۲۱
۲۹	۰.۱۵۶	۰.۱۵۰۰	۳۱
۲۷	۰.۱۵۷۶	۰.۱۴۳۰	۸
۶	۰.۱۶۳۸	۰.۱۳۸۱	۳۲
۲۳	۰.۱۷۰۲	۰.۱۳۳۶	۱۹
۲	۰.۱۷۳۴	۰.۱۳۳۲	۱۱
۲۵	۰.۱۸۴۱	۰.۱۲۹۱	۱۷
		۰.۱۲۶۰	۱۲
		۰.۱۱۷۰	۵
		۰.۱۱۱۸	۳۰
		۰.۱۱۱۰	۱۳
		۰.۱۱۰۱	۱۶

ساعت ۱۰ صبح را نشان می‌دهد. با مشخص شدن برنامه مصرف انرژی الکتریکی هر ریزشکه و برنامه تولید توان توربین‌های گازی طی مرحله دوم روش پیشنهادی، در گام سوم فرآیند بازار نظیر به نظیر برای ۲۴ ساعت آینده از طریق ارسال پیشنهادات خرید و فروش انرژی الکتریکی توسط مشترکین به اپراتور بازار آغاز می‌شود. در این راستا، برای کل ۲۴ ساعت آینده، دفتر سفارش مشابه جدول (۲) تشکیل شده و در نهایت طی روز اجرا مانند شکل (۱۴) اجرا می‌گردد.

افزایش و هزینه پرداختی ریزشکه‌ها ۲۴٪ کاهش یافته است. میزان افزایش مبلغ دریافتی توربین‌های گازی در مقایسه با کاهش هزینه پرداختی ریزشکه‌ها بیشتر است. دلیل این مسئله را می‌توان در این مهم یافت که تفاوت مابین قیمت خرید انرژی الکتریکی و فروش آن به مشترکین بالا است. می‌توان گفت که وجود شبکه بالادست به عنوان واسطه در خرید و فروش انرژی الکتریکی موجب کاهش سود مشترکان می‌گردد. همچنین، شکل (۱۴) روند کلی معاملات و جریان انرژی الکتریکی مابین مشترکان طی



شکل (۱۳)، مقایسه مبلغ دریافتی توربین‌های گازی و پرداختی ریزشکه‌ها در سناریوهای مختلف



شکل (۱۴)، جریان انرژی الکتریکی مبادله شده مابین مشترکین طی ساعت ۱۰ صبح.



از مکانیزم CDA جهت معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی، هزینه بهره‌برداری کل شبکه ۲۹.۳۱٪ کاهش می‌یابد.

اگر چه هدف اصلی این مقاله توسعه مدل و روشی جهت بهره‌برداری برداری همزمان از شبکه برق و گاز طبیعی از طریق معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی است. برنامه‌ریزی انجام شده در مرحله دوم بر اساس تعرفه‌های اعمالی از طرف شبکه بالا دست بوده، در حالی که قیمت نهایی در معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی توسط مشترکان مشخص می‌گردد. در این راستا یکی جنبه‌های ادامه کار این مقاله را می‌توان در ادغام مرحله دوم و سوم روش پیشنهادی عنوان کرد. به این مفهوم که مدل توسعه داده شده به نحوی باشد که در آن توان تولیدی و مصرفی بهینه مشترکین بر اساس قیمت توافقی در بازار همتا به همتا مشخص گردد.

### علائم

#### اندیس‌ها

$i, j$	گره‌های شبکه برق و گاز
$t$	زمان
$N_{mg}$	کل گره‌هایی که در آن ریزشکها قرار گرفته‌اند
$N_{gt}$	کل گره‌هایی که در آن واحدهای گازی قرار گرفته‌اند
$N_e$	گره‌های شبکه برق
$T$	کل دوره زمانی
$N_g$	کل گره‌های شبکه گاز
$S^{rit}$	ثابت‌ها
$S^{cur}$	قیمت برق (\$/MWh)
$S^{fit}$	قیمت قطع بار (\$/MWh)
$S^{gas}$	تعرفه فروش برق به شبکه (\$/MWh)
$p^{dem}$	تعرفه گاز طبیعی (\$/MWh)
$p^{flex,MAX}$	تقاضا برق (MW)
$p^{flex,MIN}$	حداکثر میزان انعطاف پذیری بار الکتریکی (%)
$\eta^{dec}$	حداقل میزان انعطاف پذیری بار الکتریکی (%)
$\eta^{ch}$	راندمان دشارژ ذخیره‌سازها
$SOC(0)$	راندمان شارژ ذخیره‌سازها
$SOC^{min}$	سطح انرژی ابتدایی ذخیره ساز
$SOC^{max}$	حداقل مقدار مجاز برای سطح انرژی ذخیره ساز
$PR^{min}$	حداکثر مقدار مجاز برای سطح انرژی ذخیره ساز
$PR^{max}$	حداقل مقدار مجاز فشار گاز (Bar)
$G$	حداکثر مقدار مجاز فشار گاز (Bar)
	قسمت حقیقی ماتریس ادمیتانس شبکه برق

بدون استفاده از برنامه‌ریزی متمرکز توسط اپراتور سیستم توزیع هزینه عملیاتی کل شبکه ۳۶۶۵۸۰.۴۴۲ دلار به صورت روزانه می‌باشد که با استفاده از برنامه‌ریزی همزمان انرژی برق و گاز توسط اپراتور سیستم توزیع (مرحله دوم روش پیشنهادی) این رقم ۴ درصد کاهش، و با اضافه شدن برنامه پاسخ‌گویی بار به برنامه‌ریزی اپراتور سیستم توزیع ۱۵.۵۸٪ کاهش می‌یابد. در ادامه با استفاده از معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی که توسط اپراتور بازار مدیریت می‌گردد هزینه عملیاتی کل شبکه ۲۹.۳۱٪ کاهش پیدا می‌کند.

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، روشی جهت بهره‌برداری همزمان از شبکه برق و گاز طبیعی از طریق معامله نظیر به نظیر انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن پخش بار متناوب، محاسبات هیدرولیک شبکه گاز و پاسخ‌گویی بار معرفی گردید، که استفاده از آن به صورت همزمان سود مشترکان و عملکرد شبکه برق و گاز را نیز بهبود می‌دهد. همچنین، در این مقاله جهت شبیه‌سازی رفتار معامله‌گر انسان از فرضیه معامله‌گر ZIP استفاده شده است. روش پیشنهادی در این مقاله در دو مرحله مختلف به صورت متوالی انجام می‌گیرد. مرحله نخست که بر اساس بهینه‌سازی غیر خطی می‌باشد در محیط نرم‌افزار گمز پیاده سازی شده است. همچنین، بخش معامله همتا به همتا انرژی الکتریکی در محیط نرم‌افزار متلب توسعه یافته است.

نتایج مطالعه انجام شده بر روی شبکه توزیع ۳۳ باسه تنظیم شده IEEE به همراه شبکه گاز با ۳۳ گره، تایید کننده تاثیر مثبت روش پیشنهادی در این مقاله بر روی عملکرد سیستم قدرت، ادغام بهینه دو حامل برق و گاز و افزایش سود مشترکان شبکه مورد مطالعه است. به این ترتیب که، با استفاده از روش پیشنهادی طی مرحله دوم هزینه عملیاتی کل شبکه ۱۵.۵۸٪ کاهش می‌یابد. این در حالی است که پروفیل ولتاژ در انتهای خط حدود ۷٪ درصد بهبود پیدا کرده و تغییرات فشار گاز در شینه‌های مختلف شبکه نیز در محدوده مجاز خود است. در ادامه با استفاده

توان اکتیو تزریقی (MW)	$p_{i,t}^{grid}$	قسمت موهومی ماتریس ادمیتانس شبکه برق	B
توان دشارژ شد به شبکه (MW)	$p_{i,t}^{dch,n}$	حد تغییرات توان (MW/h)	$p_i^{grid,ran}$
توان دشارژ شد به شبکه (MVAR)	$q_{i,t}^{dch,n}$	حد تغییرات توان تولیدی توربین گازی (MW/h)	$p_i^{gt,ramp}$
گاز طبیعی تزریقی در هر گره (kg/sec)	$G_{j,t}^{grid}$	قطر لوله گاز طبیعی (m)	D
توان اکتیو تولیدی واحدهای گازی (MW)	$p_{i,t}^{gt}$	سطح مقطع لوله گاز طبیعی (m <sup>2</sup> )	S
توان راکتیو تولیدی واحدهای گازی (MVAR)	$q_{i,t}^{gt}$	حد بالای برای تولید توان توربین گازی (MW)	$p_i^{max,gt}$
تقاضا برق ریزشکبه بعد برنامه‌ریزی توسط DSO (MW)	$p_{i,t}^{dem,DR}$	حد پایین برای تولید توان توربین گازی (MW)	$p_i^{min,gt}$
تقاضا برق ریزشکبه بعد برنامه‌ریزی توسط DSO (MVAR)	$q_{i,t}^{dem,DR}$	حداقل مقدار مجاز برای سطح ولتاژ (kV)	$V_i^{min}$
قدرت شارژ (MW)	$p_{i,t}^{ch}$	حداکثر مقدار مجاز برای سطح ولتاژ (kV)	$V_i^{max}$
کل قدرت دشارژ شده (MW)	$p_{i,t}^{Tot,dch}$	اختلاف ارتفاع مابین گره‌های مختلف شبکه گاز (m)	$\Delta h$
قدرت دشارژ شده در داخل ریزشکبه (MW)	$p_{i,t}^{dch,m}$	ضریب Darcy	$\lambda$
سطح انرژی ذخیره ساز الکتریکی (MWh)	$SOC_{i,t}^{batt}$	ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی	Z
نرخ مصرف گاز واحد توربین گازی (kg/sec)	$g^{gt}$	ثابت گاز طبیعی (J/(kg K))	R
توان راکتیو تولیدی واحد گازی (MVAR)	$q^{gt}$	طول لوله شبکه گاز (m)	L
جریان گاز عبوری در خط گاز طبیعی مابین دو گره مختلف (kg/sec)	$G_{i,j,t}^{line}$	ثابت گرانشی	g
فشار گاز در گره‌های مختلف شبکه (Bar)	$Pr_{i,t}$	متوسط دمای جریان گاز طبیعی (k)	Temp
مولفه حقیقی ولتاژ	$e_{j,t}$	علائم اختصاری	
بار قطع شده (MW)	$p_{i,t}^{cur}$	P2P نظیر به نظیر	P2P
بار قطع شده (MVAR)	$q_{i,t}^{cur}$	منابع تولید پراکنده	DERs
مولفه موهومی ولتاژ	$f_{j,t}$	پاسخ گویای بار	DR
توان راکتیو تزریقی در گره شبکه توزیع (MVAR)	$q_{i,t}^{grid}$	حراج دوگانه مستمر	CDA
توان ظاهری (MVA)	$S_{i,t}^{grid}$	اپراتور سیستم توزیع	DSO
		معامله‌گر با هوش نسبتا پایین	ZIP
		اپراتور بازار	DMO

## متغیرها

## مراجع

- [۱] لطیفی، حسین، محمد ابراهیم حاجی آبادی، و مهدی صمدی. "ارائه یک رویکرد چند هدفه فازی برای بازآرایی دینامیکی شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده و سیستم های ذخیره انرژی". ۷۱،۲۰ (۱۴۰۱): ۱۷۵-۱۸۸.
- [2] Wang, Chengshan, Jianzhong Wu, Janaka Ekanayake, and Nick Jenkins. *Smart electricity distribution networks*. CRC Press, 2017.
- [3] Qiu, Jing, Junhua Zhao, Hongming Yang, and Zhao Yang Dong. "Optimal scheduling for prosumers in coupled transactive power and gas systems." *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 2 (2017): 1970-1980.
- [4] Shi, Zhichao, Hao Liang, Shengjun Huang, and Venkata Dinavahi. "Distributionally robust chance-constrained energy management for islanded microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 2 (2018): 2234-2244.
- [۵] قاسمی، و گلنام کریمی. "ارائه مدلی جدید برای مدیریت بهینه انرژی یک ریزشکبه مسکونی با هدف بهبود شاخص های تاب آوری و انعطاف پذیری". ۷۰،۲۰ (۱۴۰۱): ۶۱-۷۷.
- [6] Mei, H., Y. P. Li, C. Suo, Y. Ma, and J. Lv. "Analyzing the impact of climate change on energy-economy-carbon nexus system in China." *Applied Energy* 262 (2020): 114568.
- [۷] فرهادی، علیرضا، ابوالفضل حاجی زاده اقدام، و ابوالفضل محمد ابراهیم. "تحلیل و شبیه سازی مشعل های اتمسفریک هیترهای ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری". ۷۱،۲۰ (۱۴۰۱): ۱۶۵-۱۷۴.

- [8] Forfia, David, Mark Knight, and Ron Melton. "The view from the top of the mountain: Building a community of practice with the gridwise transactive energy framework." *IEEE Power and Energy Magazine* 14, no. 3 (2016): 25-33.
- [9] Feili, Meysam, and Mohammad Taghi Ameli. "Integrated operation of gas and power system through the P2P market mechanism." *IET Smart Grid* 6, no. 4 (2023): 359-379.
- [10] Ge, Shaoyun, Jifeng Li, Xingtang He, and Hong Liu. "Joint energy market design for local integrated energy system service procurement considering demand flexibility." *Applied Energy* 297 (2021): 117060.
- [11] Wang, Cheng, Wei Wei, Jianhui Wang, Feng Liu, and Shengwei Mei. "Strategic offering and equilibrium in coupled gas and electricity markets." *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 1 (2017): 290-306.
- [12] Chen, Yue, Wei Wei, Feng Liu, Enzo E. Sauma, and Shengwei Mei. "Energy trading and market equilibrium in integrated heat-power distribution systems." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 4 (2018): 4080-4094.
- [13] Chen, Yue, Wei Wei, Feng Liu, and Shengwei Mei. "A multi-lateral trading model for coupled gas-heat-power energy networks." *Applied energy* 200 (2017): 180-191.
- [14] Basnet, Ashim, and Jin Zhong. "Integrating gas energy storage system in a peer-to-peer community energy market for enhanced operation." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 118 (2020): 105789.
- [15] Alvarez, Gonzalo Exequiel. "Integrated modeling of the peer-to-peer markets in the energy industry." (2022).
- [16] Zhou, Wei, Yuying Wang, Feixiang Peng, Ying Liu, Hui Sun, and Yu Cong. "Distribution network congestion management considering time sequence of peer-to-peer energy trading." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 136 (2022): 107646.
- [17] Wang, Xiaoyu, Tao Xu, Yunfei Mu, Zibo Wang, Youjun Deng, Tao Zhang, Qian Jiang, Yaqing Zhang, and Hongjie Jia. "Congestion management under peer-to-peer energy trading scheme among microgrids through cooperative game." *Energy Reports* 8 (2022): 59-66.
- [18] Xia, Yuanxing, Qingshan Xu, Haiya Qian, and Li Cai. "Peer-to-Peer energy trading considering the output uncertainty of distributed energy resources." *Energy Reports* 8 (2022): 567-574.
- [19] Ali, Liaqat, S. M. Muyeen, Hamed Bizhani, and Arindam Ghosh. "A multi-objective optimization for planning of networked microgrid using a game theory for peer-to-peer energy trading scheme." *IET Generation, Transmission & Distribution* 15, no. 24 (2021): 3423-3434.
- [20] Wang, Zibo, Xiaodan Yu, Yunfei Mu, Hongjie Jia, Qian Jiang, and Xiaoyu Wang. "Peer-to-Peer energy trading strategy for energy balance service provider (EBSP) considering market elasticity in community microgrid." *Applied Energy* 303 (2021): 117596.
- [21] Hashemipour, Naser, Pedro Crespo del Granado, and Jamshid Aghaei. "Dynamic allocation of peer-to-peer clusters in virtual local electricity markets: A marketplace for EV flexibility." *Energy* 236 (2021): 121428.
- [22] Davoudi, Mehdi, and Moein Moeini-Aghaie. "Local energy markets design for integrated distribution energy systems based on the concept of transactive peer-to-peer market." *IET Generation, Transmission & Distribution* 16, no. 1 (2022): 41-56.
- [23] Amin, Waqas, Qi Huang, Khalid Umer, Zhenyuan Zhang, M. Afzal, Abdullah Aman Khan, and Syed Adrees Ahmed. "A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in islanded and grid-connected microgrid." *International journal of electrical power & energy systems* 123 (2020): 106307.
- [24] Khalid, Rabiya, Nadeem Javaid, Ahmad Almogren, Muhammad Umar Javed, Sakeena Javaid, and Mansour Zuair. "A blockchain-based load balancing in decentralized hybrid P2P energy trading market in smart grid." *Ieee Access* 8 (2020): 47047-47062.
- [25] Guerrero, Jaysson, Archie C. Chapman, and Gregor Verbič. "Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 5 (2018): 5163-5173.

- [26] Liu, J., H. Yang, and Y. Zhou, Peer-to-peer energy trading of net-zero energy communities with renewable energy systems integrating hydrogen vehicle storage. *Applied Energy*, 2021. 298 :p. 117206.
- [27] Zheng, J. H., C. Q. Wu, J. Huang, Yang Liu, and Q. H. Wu. "Multi-objective optimization for coordinated day-ahead scheduling problem of integrated electricity-natural gas system with microgrid." *IEEE Access* 8 (2020): 86788-86796.
- [28] Nguyen, Dinh Hoa, and Tatsumi Ishihara. "Distributed peer-to-peer energy trading for residential fuel cell combined heat and power systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 125 (2021): 106533.
- [29] Lai, Chun Sing, Mengxuan Yan, Xuecong Li, Loi Lei Lai, and Yang Xu. "Coordinated operation of electricity and natural gas networks with consideration of congestion and demand response." *Applied Sciences* 11, no. 11 (2021): 4987.
- [30] Fang, Fang, Qing H. Wang, and Yang Shi. "A novel optimal operational strategy for the CCHP system based on two operating modes." *IEEE Transactions on power systems* 27, no. 2 (2011): 1032-1041.
- [31] Shabazbegian, Vahid, Hossein Ameli, Mohammad Taghi Ameli, Goran Strbac, and Meysam Qadrdan. "Co-optimization of resilient gas and electricity networks; a novel possibilistic chance-constrained programming approach." *Applied Energy* 284 (2021): 116284.
- [32] Osiadacz, Andrzej. "Simulation and analysis of gas networks." (1987).
- [33] Jiang, Yibo, Jian Xu, Yuanzhang Sun, Congying Wei, Jing Wang, Siyang Liao, Deping Ke, Xiong Li, Jun Yang, and Xiaotao Peng. "Coordinated operation of gas-electricity integrated distribution system with multi-CCHP and distributed renewable energy sources." *Applied energy* 211 (2018): 237-248.
- [34] Guerrero, Jaysson, Archie Chapman, and Gregor Verbic. "A study of energy trading in a low-voltage network: Centralised and distributed approaches." In *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-6. IEEE, 2017.
- [35] Yan, Xing, Jin Lin, Zechun Hu, and Yonghua Song. "P2P trading strategies in an industrial park distribution network market under regulated electricity tariff." In *2017 IEEE conference on energy internet and energy system integration (EI2)*, pp. 1-5. IEEE, 2017.
- [36] Zhang, Shaomin, Miao Pu, Baoyi Wang, and Bin Dong. "A privacy protection scheme of microgrid direct electricity transaction based on consortium blockchain and continuous double auction." *IEEE access* 7 (2019): 151746-151753.
- [37] Zhou, Yue, Jianzhong Wu, Guanyu Song, and Chao Long. "Framework design and optimal bidding strategy for ancillary service provision from a peer-to-peer energy trading community." *Applied Energy* 278 (2020): 115671.
- [38] Cliff, Dave, and Janet Bruten. "Less than human: Simple adaptive trading agents for CDA markets." *IFAC Proceedings Volumes* 31, no. 16 (1998): 117-122.
- [39] Shabazbegian, Vahid, Hossein Ameli, Mohammad Taghi Ameli, and Goran Strbac. "Stochastic optimization model for coordinated operation of natural gas and electricity networks." *Computers & Chemical Engineering* 142 (2020): 107060.