JIPET

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology
Vol. 14/ No. 56/ Winter 2023
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/

20.1001.1.23223871.1402.14.56.10.0

Research Article

Design and Implementation of a Local Blockchain-based Peer-to-Peer Energy Exchange Platform

Mohammad Reza Jabbarpour, ***Assistant Professor***, **Alimohammad Saghiri**, ***Assistant Professor***

Information and Communications Technology Research Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran
mrjabbarpour@nri.ac.ir, amsaghiri@nri.ac.ir

Abstract

In recent years, attention to renewable energy and distributed generation has increased due to increased energy demand and environmental pollution. To this end, in the new power grid structure, consumers can also play a producer role. Considering that the number of prosumers in this structure is much more than traditional power networks, the need for a secure, transparent, fast, scalable platform for energy exchanges has greatly increased. Blockchain technology can provide such a platform due to its unique properties. Although there are many blockchain-based platforms in different countries in enregy field, but in Iran there is no such platform. Therefore, the main purpose of this paper is to design and implement a local pilot platform for peer-to-peer blockchain-based energy exchange, taking into account the specific conditions of Iran's electricity grid. The macro platform architecture is designed based on the concept of Minimum Viable Product (MVP) considering functional and non-functional requirements in the form of unified modeling language (UML) diagrams. The proposed platform pilot has been implemented in the form of 4 main elements including smart contract, user interface, blockchain platform, and blockchain and non-blockchain databases and has been evaluated and tested using different scenarios. These tests mainly include the unit test and the integrity test, which were successfully performed on the platform. This platform has been designed and implemented for the first time in Iran in accordance with the Ethereum protocol and based on microservice architecture. In addition to the ability to integrate with Ethereum-based systems, this platform is scalable due to its modular design.

Keywords: blockchain, energy token, energy management, peer-to-peer energy exchange, power industry, renewable energy, smart contract

Received: 28 February 2022
Revised: 14 April 2022
Accepted: 7 May 2022

Corresponding Author: Dr. Mohammad Reza Jabbarpour

Citation: M.R. Jabbarpour, A. Saghiri, "Design and implementation of a local blockchain-based peer-to-peer energy exchange platform", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 56, pp. 169-194, January 2023 (in Persian).

20.1001.1.23223871.1402.14.56.10.0

مقاله پژوهشی

طراحی و پیاده‌سازی پلتفرم بومی مبادله انرژی همتا به همتای مبتنی بر بلاکچین

محمدرضا جبارپور، استادیار، علی‌محمد صغیری، استادیار

گروه پژوهشی فناوری اطلاعات و ارتباطات- پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
mrjabbarpour@nri.ac.ir, amsaghiri@nri.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده به دلیل افزایش تقاضای انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی، افزایش یافته است. به همین علت در ساختار جدید شبکه قدرت، مصرف‌کنندگان می‌توانند نقش تولیدکننده هم داشته باشند. با توجه به این‌که تعداد تولید/مصرف‌کنندگان در این ساختار بسیار بیشتر از شبکه‌های قدرت سنتی است، نیاز به بستری امن، شفاف، سریع و مقیاس‌پذیر برای تبادلات انرژی به شدت احساس می‌شود. فناوری بلاکچین با توجه به خصوصیات منحصربفردش می‌تواند چنین بستری را فراهم کند. با این‌که پلتفرم‌های مبتنی بر بلاکچین زیادی در کشورهای مختلف در حوزه انرژی ارائه شده است، اما در ایران چنین پلتفرمی وجود ندارد. بنابراین هدف اصلی این مقاله طراحی و پیاده‌سازی پایلوت پلتفرم بومی مبادله انرژی همتا به همتای مبتنی بر بلاکچین با در نظر گرفتن شرایط خاص شبکه برق ایران است. معماری کلان پلتفرم براساس مفهوم حداقل محصول قابل عرضه (MVP) با درنظر گرفتن نیازهای عملکردی و غیرعملکردی در قالب نمودارهای زبان مدل‌سازی یکپارچه (UML) طراحی شده است. پایلوت پلتفرم پیشنهادی در قالب ۴ عنصر اصلی شامل قرارداد هوشمند، رابط کاربری، پلتفرم بلاکچین، پایگاه داده بلاکچینی و غیربلاکچینی پیاده‌سازی شده و با استفاده از سناریوهای مختلف مورد ارزیابی و آزمون قرار گرفته است. این آزمون‌ها عمدتاً شامل آزمون واحد و آزمون یک‌پارچگی هستند که با موفقیت بر روی پلتفرم انجام شده‌اند. این پلتفرم برای اولین بار در کشور مطابق با پروتکل اتریوم و بر مبنای معماری میکروسرویس طراحی و پیاده‌سازی شده است. این پلتفرم علاوه بر امکان ادغام با سامانه‌های مبتنی بر اتریوم، به واسطه طراحی ماژولار دارای قابلیت توسعه‌پذیری است.

کلمات کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، بلاکچین، توکن انرژی، صنعت برق، قرارداد هوشمند، مبادله انرژی همتا به همتا، مدیریت انرژی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹
تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۷

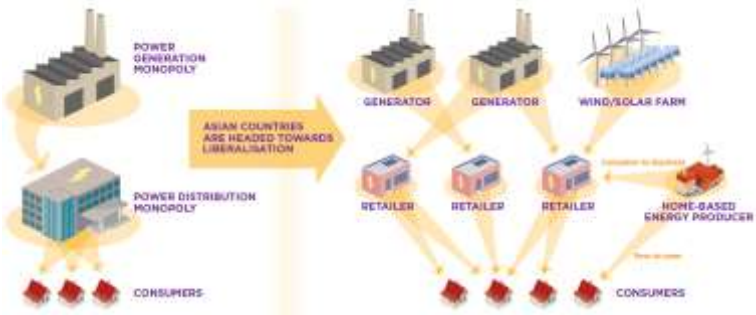
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدرضا جبارپور
نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- شهرک قدس- انتهای بلوار شهید دادمان- پژوهشگاه نیرو

۱- مقدمه

امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده به‌صورت متصل به شبکه رشد چشم‌گیری دارند. به عبارت دیگر، صنعت برق در حال حرکت از یک سیستم تولید متمرکز با مقیاس بزرگ به یک سیستم تولید غیرمتمرکز در مقیاس کوچک است [۱]. با ادامه این روند، در آینده‌ای نزدیک هر خانوار یک تأسیسات تولید برق مانند فتوولتائیک[۱] (PV) یا تولید همزمان برق و حرارت[۲] (CHP) در محل زندگی خود نصب خواهد کرد. این تاسیسات با تولید برق کافی، نیازهای خانوار را تامین می‌کند و مازاد آن می‌تواند از طریق جوامع (بازارهای) محلی در اختیار سایر مشترکین قرار گیرد. بنابراین تجارت همتا به همتا انرژی توسط تعداد زیادی از خانوارها می‌تواند به‌وجود بیاید. هنگامی که برق در بازارهای محلی معامله و مبادله می‌شود، هزینه‌های تولید، انتقال و توزیع برق به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، چنین آینده‌ای اساساً چشم‌انداز انرژی‌های تجدیدپذیر را که منابع و ظرفیت‌های آنها به‌طور نابرابر توزیع شده‌اند، تغییر می‌دهد. برق مازاد ابتدا در بازار محلی برای مصرف عرضه می‌شود، در صورت عدم فروش می‌تواند به شبکه برق سراسری فروخته شود.

بخش انرژی‌های تجدیدپذیر به شدت به یارانه‌های دولتی وابسته است که این یارانه‌ها به مرور زمان رو به کاهش است. به‌عنوان نمونه کشور آلمان یارانه پرداختی خود به این بخش را به‌طور کامل قطع کرده است. این موضوع باعث کاهش سود تولید-مصرف‌کنندگان می‌شود و آنها مجبور می‌شوند برق تولیدی خود را با قیمت پایین‌تر به شرکت‌های توزیع بفروشند و این شرکت‌ها با سود مشخص آن را به مشترکین می‌فروشند. برای حل این مشکل، راه‌حل جدیدی که مستقل از یارانه دولتی باشد و قوانین بازار آزاد را نقض نکند، مورد نیاز است. بازار برقی که تجارت آزاد در آن اتفاق می‌افتد، راه‌حل مناسبی است که منفعت تمامی ذینفعان را تامین می‌کند. چنین بازاری همانند شمشیر دولبه محسوب می‌شود و چالش‌ها و فرصت‌های جدیدی را برای شبکه برق موجود، کسب‌وکارها و بهره‌بردارها ایجاد می‌کند. برای آینده‌ای که تولید انرژی خورشیدی و بادی و استفاده از خودروهای الکتریکی یک امر عادی محسوب خواهد شد، یافتن راه‌حل‌های بهتر برای مدیریت شبکه انرژی غیرمتمرکز گسترده که در اکثر مواقع هم غیر قابل اعتماد است، ضروری به نظر می‌رسد. چنین راه‌حلی امکان استفاده حداکثری از برق تولیدی را برای مشارکت‌کنندگان به‌صورت محلی فراهم می‌کند و مزایای فراوانی را از جمله کاهش هزینه توزیع و اتلاف انرژی، مدیریت بهتر شبکه محلی، ارائه می‌کند. فناوری‌های پیشرفته اطلاعاتی مانند بلاکچین، اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، خودرو الکتریکی، فناوری ذخیره انرژی، ریزشبکه‌ها، امکان تبادل لحظه‌ای و دوطرفه انرژی و اطلاعات را بین تولیدکنندگان و مصرف-کنندگان در قالب یک سیستم غیرمتمرکز همتا به همتای پیچیده فراهم می‌کند [۲].

در حال حاضر مقررات زدایی یکی از مولفه‌های اصلی در بحث انرژی محسوب می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش و یا لغو برخی از مقررات دولتی و حکومتی شود. اصلی‌ترین دلیل ارائه این موضوع افزایش بهره‌وری از طریق ایجاد رقابت و کاهش انحصار در صنعت برق و انرژی است. علی‌رغم توجه و شروع مقررات زدایی در برخی از کشورهای جهان در حوزه برق انرژی مانند انگلستان، آمریکا و ژاپن، چالش‌های زیادی وجود دارند که از ورود تامین‌کنندگان خرد به بازار جلوگیری می‌کنند. موانع ورود تولیدکنندگان خرد و کوچک به بازارهای انرژی شامل نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد برای ایجاد زیرساخت‌ها و اتوماسیون فرایندهای لازم برای رسیدگی به تعداد زیادی سفارشات با حجم مالی و مصرفی کم است. مدل‌های خدماتی کنونی ارتباط مستقیمی بین تولیدکنندگان انرژی تجدیدپذیر با مصرف‌کنندگان برقرار نمی‌کنند و در نتیجه امکان رشد و کسب درآمد از کسب‌وکارهای مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم نمی‌کنند. عدم وجود پشتیبانی‌ها لازم مانند یارانه از سمت دولت یکی دیگر مشکلات موجود در حوزه تولیدکنندگان خرد انرژی تجدیدپذیر است. ساختار فعلی که به‌صورت انحصاری در اختیار بخش خاصی قرار دارد به همراه ساختار مبتنی بر تولیدکنندگان خرد که می‌توانند برق تولیدی خود را به همسایه یا شرکت توزیع براساس مدل‌های همتا به همتا[۳] (P2P) و مصرف‌کننده به تجارت[۴] (C2B) بفروشند، در شکل (۱) نشان داده شده‌اند [۳]. به‌طور کلی متولیان انرژی در جهان به دنبال توسعه یک مدل انرژی توزیع شده جدید هستند تا مستقیماً کاربران نهایی را به تولیدکنندگان متصل کنند و انرژی را با قیمت کمتر در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهند. در عین حال انگیزه تولیدکنندگان برای تولید انرژی تجدیدپذیر را در سراسر جهان افزایش دهند. در همین راستا، امروزه، شرکت‌ها و پروژه‌های متعددی در دنیا با استفاده از فناوری بلاکچین، پلتفرم[۵] مبادله انرژی همتا به همتا ارائه داده‌اند.



شکل (۱): تغییر ساختار شبکه برق با استفاده از بلاکچین [۴]

Figure (1): Restructuring the power grid using blockchain [4]

اولین گام در پیاده‌سازی چنین پلتفرمی، تحلیل نیازمندی‌ها و طراحی آنها با در نظر گرفتن ساختار و شرایط بومی هر کشور است. به این‌منظور در این مقاله علاوه بر مروری بر مفاهیم مربوط به بلاکچین و بررسی پلتفرم‌های مبادله انرژی مبتنی بر بلاکچین، با در نظر گرفتن وضعیت خاص شبکه برق ایران، پلتفرمی مطابق با آن طراحی و مدل مفهومی اکوسیستم پلتفرم پیشنهادی براساس مدل مرجع شبکه هوشمند انرژی اروپا ارائه شده است. بازیگران اصلی به همراه سناریوی مورد نظر استخراج شده‌اند. معماری کلان پایلوت پلتفرم براساس مفهوم حداقل محصول قابل عرضه[۶] (MVP) با درنظر گرفتن نیازهای عملکردی و غیرعملکردی در قالب نمودارهای رفتاری (فعالیت، توالی و موارد کاربرد) و ساختاری (کلاس) پرکاربرد زبان مدل‌سازی یکپارچه[۷] (UML) به‌صورت شی‌گرا طراحی شده است. این معماری به دلیل شی‌گرا بودن قابلیت گسترش و مقیاس‌پذیری را دارا است. لازم به ذکر است معماری و پلتفرم مبادله انرژی همتا به همتای پیشنهادی برای اولین بار در کشور ارائه شده است. ارکان اصلی اکوسیستم پیشنهادی شامل قرارداد هوشمند، رابط (داشبورد) کاربری، پلتفرم بلاکچین، پایگاه داده بلاکچینی و غیربلاکچینی پیاده‌سازی و مورد آزمون قرار گرفته است.

سایر بخش‌های مقاله به این صورت ارائه می‌گردد: مروری بر مفاهیم مرتبط شامل بلاکچین و قرارداد هوشمند در بخش دوم ارائه شده است. بخش سوم مروری بر پلتفرم‌های مبادله انرژی مبتنی بر بلاکچین را شامل می‌شود. تحلیل و طراحی پایلوت پلتفرم پیشنهادی شامل مدل مفهومی، نیازمندی‌های عملکردی و غیرعملکردی، معماری، نمودارهای رفتاری و ساختاری و پایگاه داده در بخش چهارم ارائه شده است. در بخش پنجم به نحوه پیاده‌سازی پلتفرم پیشنهادی پرداخته شده و آزمون‌های انجام شده جهت بررسی عملکرد پلتفرم ارائه شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری این پژوهش در بخش ششم بیان شده است.

۲- مروری بر مفاهیم مرتبط

در این بخش مفاهیم اصلی مرتبط با موضوع مقاله شامل بلاکچین و قراردادهای هوشمند مرور و بررسی شده‌اند. بلاکچین زیرساخت پلتفرم پیشنهادی را فراهم می‌کند و قرارداد هوشمند هم امکان خرید و فروش و ثبت تراکنش‌های مربوطه را فراهم می‌کند.

۲-۱- بلاکچین و مفاهیم مرتبط

بلاکچین برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ و در کنار مفهوم بیت‌کوین مطرح گردید. در این سال شخص یا گروهی با نام مستعار ساتوشی ناکاموتو، بیت‌کوین را به دنیا معرفی نمودند که در آن به بیت‌کوین و بلوک‌های تراکنش، که به‌صورت زنجیروار به هم متصل می‌شوند اشاره شده ولی از کلمه "بلاکچین" استفاده نشده بود [۵]. در سال ۲۰۰۹، بیت‌کوین از یک ایده در یک مقاله دانشگاهی تبدیل به اولین شبکه بلاکچین شده و کلمه بلاکچین (زنجیره بلوکی) به‌عنوان دو کلمه پشت سر هم ولی مجزا در کدهای منبع بیت‌کوین آورده شد. در نهایت نیز در سال ۲۰۱۶، بلاکچین به‌عنوان یک گام موفقیت‌آمیز در صنعت مالی شناخته شده و در سال ۲۰۱۷ مجله کسب‌وکار هاروارد، از بلاکچین به‌عنوان یک فناوری بنیادین تعبیر نمود. امروزه

زیست‌بوم‌های بلاکچینی قوی و در حال رشدی وجود دارد که روند حرکت آنها به سمت سیستم‌ها و پایگاه داده‌های غیرمتمرکز است.

در بیان ساده، بلاکچین (زنجیره بلوکی) همانند یک پایگاه داده بوده و در واقع روشی برای ذخیره اطلاعات و تراکنش‌ها است. نکته اصلی موجود در مفهوم بلاکچین، عدم امکان تغییر اطلاعات است، که این امر پتانسیل قابل توجه برای حذف واسطه‌ها، ایجاد شفافیت، اعتماد و امنیت به‌وجود می‌آورد. به عبارت دیگر، بلاکچین یک پایگاه داده غیر متمرکز را ایجاد می‌نماید که نیاز به پایگاه‌های داده متمرکز را از بین می‌برد. هر شخصی در بلاکچین می‌تواند تراکنش‌ها را رصد و تایید نماید که خود منجر به شفافیت و اعتماد می‌شود. بلاکچین شامل تکنولوژی‌هایی برای ایجاد نسل جدیدی از برنامه‌های کاربردی غیرمتمرکز است که از طریق رمزنگاری امن شده‌اند. بلاکچین‌ها می‌توانند طیف متنوعی از رابطه‌های برنامه‌نویسی کاربردی[۸] (API) را داشته باشند که شامل زبان برنامه‌نویسی تراکنش، رابط برنامه‌نویسی گره‌های ارتباطی همتا به همتا و یک رابط برنامه‌نویسی مشتری برای بررسی معاملات و تراکنش‌ها در شبکه است. بلاکچین‌ها به‌طور کلی بسترهایی را ایجاد می‌کنند که می‌توان بر روی آن‌ها کاربردهای مختلف را پیاده‌سازی نمود. همه آنها دارای ویژگی‌های یکسانی نیستند و بسته به نیاز و کاربرد باید از بلاکچین مناسب استفاده نمود. از جمله مهم‌ترین نمونه‌های پلتفرم‌های بلاکچین می‌توان به مواردی نظیر اتریوم، هایپر لجر فابریک[۹]، کُردا[۱۰] و اُپن‌چِین[۱۱] اشاره نمود. از نظر ساختاری و معماری، لایه اصلی بلاکچین یک شبکه فرد به فرد یا همتا به همتا است. یک بلاکچین از طریق توزیع پردازش‌های موردنیاز بین گره‌هایش تمرکززدایی نموده و هر تراکنشی در سطح فرد تایید و اعتبارسنجی می‌شود. در واقع، یک بلاکچین را می‌توان یک ابر محاسباتی توزیع شده[۱۲] در نظر گرفت که در آن کاربران بدون در نظر گرفتن زمان و مکان قادر به معامله با یکدیگر هستند [۶]. یکی دیگر از مفاهیم مهم بلاکچین، الگوریتم‌های اجماع هستند. الگوریتم اجماع، هسته‌ای از یک بلاکچین است که نشان‌دهنده روش یا پروتکل انجام‌دهنده معامله یا تراکنش است. این الگوریتم به این دلیل مهم است که این معاملات و تراکنش‌ها باید مورد اعتماد باشند. به عبارت دیگر، یک کاربر نیازی به درک دقیق نحوه کار این الگوریتم نداشته و فقط کافی است به امینت و قابلیت اطمینان آن باور داشته باشد. به‌عنوان مثال، بیت‌کوین آغازگر الگوریتم توافقی اثبات کار[۱۳] (PoW) است. اثبات کار بر الگوریتم تحمل خطای بیزانس[۱۴] متکی است که به تراکنش‌ها و معاملات اجازه می‌دهد تا به‌طور امن و مطابق وضعیت مشخصی عمل کنند. یکی از جایگزین‌های اثبات کار برای دستیابی به اجماع و توافق، اثبات سهام[۱۵] (PoS) است. از دیگر الگوریتم‌های اجماع نیز می‌توان به مواردی نظیر اثبات سهام محول شده[۱۶] (DPoS) و اثبات زمان سپری شده[۱۷] (PoET) اشاره نمود [۷]. بخش مهمی از محتوی هر بلوک در بلاکچین، هش مربوط به رمزنگاری بلوک قبلی است. به این ترتیب بلوک‌ها در تمام طول مسیر، به‌صورت غیرمستقیم به اولین بلوک ایجاد شده پیوند داشته و توسط هش‌ها تایید می‌شوند. با توجه به این‌که هر بلوک حاوی هش پیشین است و در بلوک بعدی از آن هش گرفته می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که تمامی هش‌های قبلی در تمام بلوک‌های بعدی به‌طور ضمنی لحاظ می‌شوند. این امر باعث تغییرناپذیری واقعی بلوک‌ها می‌گردد. در نتیجه کل بلوک‌ها از طریق رابطه هش‌های بهم متصل بوده و تشکیل زنجیره بلوکی را می‌دهند [۸]. فرآیند استخراج، فرآیند اضافه شدن بلوک جدید به بلاکچین، استخراج نامیده می‌شود، این فرآیند توسط افراد استخراج‌گر[۱۸] انجام می‌شود. عملیات استخراج به آسانی صورت نپذیرفته و نیازمند منابع پردازشی و صرف هزینه است. بلاکچین بیت کوین به‌عنوان اولین نسل این فناوری شناخته می‌شود و این در حالی است که در حال حاضر پلتفرم‌هایی به‌وجود آمده‌اند که به‌عنوان نسل‌های دوم و سوم بلاکچین شناخته می‌شوند. در واقع، نسل اول بلاکچین برای حل مشکل تولید ارزهای غیرمتمرکز ایجاد شد و اولین کاربرد آن در صنعت مالی نمود پیدا کرد که هدف اصلی آن ایجاد ارزی بود که می‌توانست بدون هیچ واسطه مرکزی برای انتقال وجوه استفاده شود. بیت‌کوین، لایت کوین[۱۹]، مونرو[۲۰] و دش[۲۱] نمونه‌هایی از به‌کارگیری این نسل هستند [۹]. نسل دوم بلاکچین بر نگهداری دارایی‌ها بر روی بلاکچین متمرکز است. این نسل قراردادهای هوشمند را معرفی نموده و امکان انجام تراکنش‌های قابل تنظیم بر اساس نیازهای طرفین را فراهم می‌کند. اتریوم، اتریوم کلاسیک، نئو[۲۲] و کیوتم[۲۳] نمونه‌هایی از این نسل هستند. نسل سوم به بلاکچین‌های مختلف امکان می‌دهد تا با یکدیگر ارتباط داشته و اطلاعات را مبادله کنند. این نسل امکان تعریف لایه‌های مختلف برای مدیریت توافقات، انجام تراکنش‌ها و ارتباط با دیگر بلاکچین‌ها را فراهم می‌نماید. عملکرد لایه‌ای موجب افزایش امنیت، جلوگیری از کاهش سرعت و البته به خطر

افتادن عملکرد بلاکچین می‌شود که از مهم‌ترین مشکلات بلاکچین اتریوم در زمان راه‌اندازی توکن جدید به شمار می‌رود. در واقع، نسل سوم بلاکچین نسلی است که می‌تواند به تعداد بالایی از افراد خدمات ارائه داده و خود حاکمیتی[۲۴] را گسترش دهد. این موضوع در بلاکچین‌های لیسک[۲۵] و بیت‌شِیرز[۲۶] و اِستیم[۲۷] قابل مشاهده است [۹]. در سال‌های اخیر تکنولوژی بلاکچین در بسیاری از صنایع کاربرد پیدا کرده است و انواع مختلفی از بلاکچین ایجاد شده است. بلاکچین عمومی، بلاکچین خصوصی، بلاکچین شرکتی (کنسرسیومی) و بلاکچین به‌عنوان یک سرویس[۲۸] (BaaS) از جمله انواع مختلف بلاکچین هستند.

۲-۲- قرارداد هوشمند

مفهوم قرارداد هوشمند برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ توسط برنامه‌نویس، رمزنگار و حقوقدان آمریکایی به نام نیک سابو[۲۹] به این صورت تعریف شد: "قرارداد هوشمند یک پروتکل تراکنشی کامپیوتری است که شرایط قرارداد را تنظیم و اجرا می‌کند". این تعریف پیشنهاد می‌کند که بندها و شروط قراردادها (مانند وثیقه و تضمین) به کدی در زبان برنامه‌نویسی، ترجمه شوند و به‌صورت خود اعمال[۳۰] اجرا شوند، به‌طوری که نیاز به واسطه بین طرفین معاملات و امکان بروز خطاهای عمدی و تصادفی کاهش یابد [۱۰]. این تعریف به سختی می‌تواند تفاوت قراردادهای هوشمند را با برخی از دستگاه‌های قراردادی شناخته شده مانند دستگاه‌های فروش خودکار[۳۱] که به‌صورت خودکار اجرا می‌شوند، را بیان کند. با ظهور فناوری بلاکچین و نسل دوم آن، ایده قراردادهای هوشمند نیز عملیاتی شد. به دلیل ماهیت جدید قراردادهای هوشمند بر روی فناوری بلاکچین و همچنین پیچیدگی تکنولوژیکی آنها، هنوز تعریف توافق شده‌ای برای آن وجود ندارد. قراردادهای هوشمند معاملات و فرآیندها را به‌صورت کاملا تضمینی و بدون اشخاص ثالث (واسط) انجام می‌دهند. فعالیت و روندهای قرارداد هوشمند از لحاظ اجرا قابل پیگیری، غیرقابل برگشت و خودکار در اجرا هستند. تعریف کاملی با در نظر گرفتن دو خصوصیت خودکار بودن[۳۲] و قابل اجرا بودن[۳۳] برای قرارداد هوشمند در مرجع [۱۱] ارائه شده است: "قرارداد هوشمند یک توافق خودکار و قابل اجرا است". خودکار بودن به معنی اجرا شدن توسط رایانه است. البته در مواردی نیاز به ورود اطلاعات و کنترل آن توسط انسان نیز وجود دارد. قابل اجرا بودن به معنی اجرای حقوق و تعهدات طرفین از طریق اجرای کد امنیتی غیرقابل تغییر رایانه‌ای است. مزایای اصلی قراردادهای هوشمند عبارتنداز: دیجیتالی کردن اعتماد بواسطه اطمینان از اجرا شدن، افزایش بهره‌وری از طریق حذف واسطه-ها، کاهش هزینه‌هایی که به دلیل حضور واسطه‌ها برای انجام معاملات صرف می‌شوند. ماهیت نرم‌افزاری و الکترونیکی قراردادهای هوشمند منجر به کاهش ابهامات و در نتیجه بهبود تفسیر قراردادها می‌شود. عدم نقض قرارداد به‌صورت یک‌طرفه، برقراری تساوی حقوق ذینفعان از دیگر مزایای قراردادهای هوشمند هستند [۱۲]. تاکنون پلتفرم‌ها و زبان‌های برنامه‌نویسی متعددی با ویژگی‌های متفاوتی برای قرارداد هوشمند معرفی شده‌اند که مقایسه‌ای از پرکاربردترین آنها در جدول (۱) ارائه شده است. وجود چالش‌های منحصربه‌فرد در برنامه‌نویسی قراردادهای هوشمند منجر به ایجاد انگیزه در توسعه‌دهندگان شده است تا زبان‌های خاصی برای این حوزه ایجاد کنند. براساس ویژگی‌های استخراج شده و همچنین نتایج به‌دست آمده در مرجع [۱۳]، زبان برنامه‌نویسی سالیدیتی اولین انتخاب برای نوشتن قراردادهای هوشمند است. مهمترین دلیل این موضوع، شباهت این زبان به زبان‌های برنامه‌نویسی C پلاس و جاوا است که در اغلب دانشگاه‌ها و موسسات علمی تدریس می‌شوند و افراد آشنایی بیشتری با آنها دارند. البته آسیب‌پذیری‌های امنیتی یکی از اصلی‌ترین نقاط ضعف این زبان برنامه‌نویسی محسوب می-شود [۱۴].

۳- پلتفرم‌های مبادله انرژی مبتنی بر بلاکچین

در حال حاضر پروژه‌های زیادی در دنیا در حوزه پلتفرم‌های مبادله انرژی مبتنی بر بلاکچین تعریف و در حال انجام شدن یا انجام شده‌اند. در این بخش ۱۰ مورد از این پروژه‌ها با در نظر گرفتن اهمیت، پراکندگی جغرافیایی، پیشرو بودن و مقیاس مورد بررسی قرار گرفتند و ۳۰ مورد از آنها هم از لحاظ زیرساخت بلاکچین و الگوریتم اجماع مورد استفاده بررسی شده‌اند.

Table (1): Widely used platforms and programming languages for smart contracts

جدول (۱): پلتفرم‌ها و زبان‌های برنامه‌نویسی پرکاربرد برای قرارداد هوشمند

زبان برنامه‌نویسی	پلتفرم	ویژگی‌های کلیدی
Solidity	Ethereum	• پشتیبانی از انواع دادهای ایستا (نوع متغییرها از قبل تعریف و حین اجرا غیرقابل تغییر هستند) • پشتیبانی از وراثت، کتابخانه‌ها و انواع دادهای پیچیده تعریف شده توسط کاربر • محبوبترین و پرکاربردترین زبان برنامه‌نویسی برای قراردادهای هوشمند
Liquidity	Tezos	• امکان تعریف نوع داده سطح بالا مانند مجموع و رکوردها • پشتیبانی کامل از زبان برنامه‌نویسی • امکان استفاده از متغیرهای محلی به جای پشته
Pact	Kadena	• تشابه زیاد به زبان محاوره • طراحی مبتنی بر امنیت تورینگ ناقص • اجرای اتمیک تراکنش‌ها • امکان وارد کردن و تعریف ماژول • دارای پایگاه داده ستونی به همراه کلید منحصربفرد برای هر سطر • مجوز کلید عمومی تک امضایی و چند امضایی • استنتاج نوع داده[۳۴] براساس محتوی در زمان کامپایل
Vyper	Ethereum	• امنیت، سادگی زبان و کامپایلر، قابلیت بررسی آسان • امکان بررسی سرریزی‌ها و محدودیت‌ها • عدم نیاز به تنظیم یک حد بالا برای محدودیت Gas (عدم آسیب‌پذیری در برابر حملات محدودیت گاز) • تصمیم‌پذیری (امکان محاسبه دقیق حد بالا برای گاز مصرفی به ازای هر فراخوانی تابع) • وابستگی زیاد به نوع داده که باعث افزایش دقت برنامه می‌شود
Scilla	Zillaqa	• زبان برنامه‌نویسی سطح میانی • امن‌ترین زبان برنامه‌نویسی موجود برای قراردادهای هوشمند • امکان اجرا بر روی بلاکچین‌های دیگر مانند بیت‌کوین و اتریوم • استفاده از تاییدیه‌های رسمی برای اطمینان از صحت قراردادهای هوشمند • جداسازی ارتباطات و محاسبات
Rholang	RChain	• مناسب برای برنامه‌نویسی توزیع شده بعلت همروند بودن • زبان فرایند محور (تمام محاسبات از طریق ارسال پیام انجام می‌شوند) • استفاده از زبان برنامه‌نویسی تابعی برای کاهش خطا
Golang	Ethereum	• زمان کامپایل سریع • وابستگی زیاد به نوع داده که باعث افزایش دقت برنامه می‌شود • برنامه‌های ایجاد شده ساده و امن هستند • امکان اجرا برنامه‌ها به‌صورت غیرهمزمان یا موازی

۱- پلتفرم زیرشبکه بروکلین[۳۵] (BMG)-آمریکا: یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌هایی که در زمینه استفاده از بلاکچین در زیرشبکه‌ها در دنیا در حال انجام است، پروژه BMG است که توسط شرکت انرژی اِل‌اُ۳[۳۶] در حال اجرا است. هدف این پروژه ایجاد بازار انرژی همتا به همتا در ریزشبکه منطقه بروکلین در شهر نیویورک با استفاده از فناوری بلاکچین و مفهوم شبکه انرژی اشتراکی است. این پروژه با حذف واسطه‌ها، به ساکنانی که پانل‌های خورشیدی در پشت بام محل سکونت خود نصب کرده‌اند، این امکان را می‌دهد که انرژی اضافی تولید شده را به همسایگان خود بفروشند [۱۵]. در ابتدای پروژه، بلاکچین اتریوم به‌عنوان بستر بلاکچین مورد استفاده گرفت، اما به سرعت مشخص شد که بستر اتریوم به لحاظ مقیاس‌پذیری انتخاب مناسب و معقولی نیست. به همین دلیل بخشی از پروژه به ساخت و ایجاد بلاکچین خصوصی اختصاص یافت. شرکت انرژی اِل‌اُ۳ پلتفرم بلاکچین خصوصی به نام اگزرژی[۳۷] را توسعه داده است. اگزرژی یک پلتفرم داده‌ای انحصاری[۳۸] است که بازاری انرژی محلی را برای مبادله و معامله انرژی از طریق زیرساخت شبکه برق موجود ایجاد می‌کند.

۲- پلتفرم پاورلجر[۳۹]–استرالیا: پلتفرم پاورلجر فناوری بلاکچین و انرژی خورشیدی را با هم تلفیق کرده تا علاوه بر انرژی پاک، انرژی ارزان‌تر و پایدارتری را در اختیار کاربران قرار دهد [۱۶]. پاورلجر یک بازار انرژی همتا به همتا را در بوسلتون[۴۰] در غرب استرالیا توسعه و ایجاد کرد. پلتفرم پاورلجر قابلیت تعامل بین مکانیزم‌های مختلف مدیریت/قیمت‌گذاری بازار و واحدهای مصرفی (کیلووات ساعت) را از طریق توکن‌های از پیش‌خریداری شده، فراهم می‌آورد و انعطاف‌پذیری بازار را با اکوسیستم توکن دوگانه (به نام‌های توکن پاورلجر[۴۱] (POWR) و اِسپارکز[۴۲]) و بلاکچین دو لایه (بلاکچین عمومی اتریوم و بلاکچین کنسرسیومی خصوصی اِکوچِین[۴۳] به‌صورت سلسله‌مراتبی) کنترل می‌کند. توکن پاورلجر امکان استفاده و دسترسی به پلتفرم را برای مشارکت‌کنندگان و برنامه‌ها فراهم می‌کند. در این پلتفرم، توکن پاورلجر قابل معامله است و از طریق مبادله اوراق قرضه هوشمند اتریوم[۴۴] به‌صورت امانی[۴۵] به اِسپارکز تبدیل می‌شود. اِسپارکز قابل تبدیل به پول رایج هر کشور است و می‌توان از طریق آن هزینه انرژی را پرداخت کرد.

۳- پلتفرم اِنرگو[۴۶]–چین: اِنرگو یک اکوسیستم مبتنی بر برنامه‌های غیرمتمرکز است که برای ایجاد جامعه انرژی خودمختار غیرمتمرکز[۴۷] (DAEC) تلاش می‌کند. در هسته مرکزی آن بلاکچین کیوتم و یک سیستم غیرمتمرکز برای اندازه‌گیری، ثبت، مبادلات و پرداخت (خرید) انرژی پاک در ریزشبکه‌های محلی طراحی شده است. اِنرگو از دو توکن برای ایجاد بازار همتا به همتا استفاده می‌کند: توکن وات[۴۸] که معادل یک کیلووات ساعت انرژی ذخیره شده در ریزشبکه یا تجهیزات ذخیره‌سازی است و تی‌اِس‌اِل[۴۹] که رمز ارزی است که امکان دسترسی به سیستم‌های ذخیره انرژی ریزشبکه را فراهم می‌کند [۱۷]. بلاکچین کیوتم، از هر دو حالت بلاکچین عمومی و کنسرسیومی استفاده می‌کند، بلاکچین عمومی کیوتم با توجه به میزان غیرمتمرکز بودن، آستانه پایین برای تعداد مشارکت‌کنندگان، محیط امن و قابلیت اطمینان، از PoS به‌عنوان الگوریتم اجماع استفاده می‌کند. بلاکچین کنسرسیومی کیوتم که محدود به گره‌های از پیش انتخاب شده و مشخص است، با در نظر گرفتن موارد مختلف برای اجماع، ترکیبی از الگوریتم‌های اثبات زمان[۵۰] و رافت[۵۱] را برای بهینه‌سازی توان محاسباتی در شبکه‌ای قابل اعتماد اتخاذ کرده است.

۴- پلتفرم پروسیوم[۵۲]–سوئیس: پروسیوم یک پلتفرم مبتنی بر بلاکچین است که به لطف سیستم نظارتی غیرمتمرکز و خود تنظیم، مکانی هوشمند خودمختار، مستقل و دیجیتالی برای کاربران فراهم می‌کند تا از انرژی حاصل از منابع انرژی سبز استفاده کنند و مدل جدیدی از جامعه انرژی را ترویج می‌دهد. از مزایا این پلتفرم که از بلاکچین اختصاصی[۵۳] خود بهر می‌برد می‌توان به انعطاف‌پذیری در انتخاب منابع انرژی، مالکیت مشترک منابع تولید انرژی، کنترل لحظه‌ای هزینه‌ها، قابلیت ردیابی و اطمینان، و تعمیر و نگهداری بهتر از شبکه اشاره کرد. از کاربردهای پیش‌بینی شده برای پروسیوم می‌توان به مبادله انرژی همتا-به-همتا، تعادل شبکه (عرضه و تقاضا)، بهینه‌سازی معاملات تجاری، صدور صورتحساب هوشمند و پرداخت‌های خودکار اشاره کرد [۱۸].

۵- پلتفرم سان‌کانترکت[۵۴]–اسلوونی: سان‌کانترکت پلتفرمی است که براساس قراردادهای هوشمند، تولیدکنندگان و مصرف-کنندگان برق را مستقیماً به استخر برق وصل می‌کند، که رویکردی مناسب برای تجارت برق همتا به همتا محسوب می‌شود [۱۹]. مدل ارائه شده توسط سان‌کانترکت بهترین ویژگی‌های فناوری بلاکچین (۵T) و انرژی‌های تجدیدپذیر (۵D) را که در شکل (۲) نشان داده شده است، با هم ترکیب می‌کند تا یک سرویس کاملا جدید که باعث تحول در بازار برق موجود می‌شود، را ارائه کند. اتر به‌عنوان تنها رمزارز پایه‌ای در فروش توکن‌های سان‌کانترکت مورد پذیرش قرار گرفته است و به ازای هر اتر ۱۰ هزار توکن سان‌کانترکت در اختیار خریدار قرار می‌گیرد.

۶- پلتفرم کی۲انرژی[۵۵]–اتریش: ایده اصلی کی۲انرژی که با همکاری سازمان برنامه‌ریزی انرژی شهرداری اتریش راه‌اندازی شده است این است که به جای مصرف برق از شبکه، آپارتمان‌های چند واحدی انرژی فتوولتاییک تولیدی خود را با قیمت ارزان‌تر برای ساکنان خود فراهم می‌کنند [۲۰]. در این فرآیند دو عامل درگیر هستند. اولین عامل تلاش می‌کند با فروش انرژی خورشیدی تولید شده به بهترین قیمت ممکن در بازار محلی، درآمد آپارتمان را به حداکثر برساند. عامل دوم تلاش می-کند تا هزینه برق اشتراکی ساختمان را با کاهش مصرف آسانسور و روشنایی راهروها، به حداقل برساند. به این ترتیب حساب-

های کاربری، اطلاع‌رسانی و صورتحساب انرژی تولید شده محلی بین اپراتور سیستم فتوولتاییک و مصرف کنندگان انرژی محلی انجام می‌شود و یک راه‌حل پاک (سبز) و سودآور برای همه طرف‌های درگیر ارائه می‌شود.

۷- پلتفرم بیت‌وات[۵۶]-سنگاپور: پلتفرم بیت‌وات امکان یافتن بهترین تامین‌کنندگان را در شرایط مختلف برای مصرف‌کنندگان هوشمند فراهم می‌کند، و بازار غیرمتمرکزی که بر پایه شفافیت و افشای کامل اطلاعات فناوری بلاکچین عمل می‌کند را ایجاد می‌کند. یکی از مهمترین اهداف بیت‌وات پایداری شبکه است، به این معنی که هرچقدر بازدهی شبکه به خاطر فناوری بلاکچین افزایش یابد، اتلاف و سوء مصرف آن کاهش پیدا می‌کند [۲۱]. این پلتفرم بر روی بلاکچین اتریوم پیاده‌سازی شده است.

۸- پلتفرم وی‌پاور[۵۷]-استونی: پلتفرم وی‌پاور سعی دارد یکی از معضلات اساسی جهان امروز یعنی تغییرات آب و هوایی را مدیریت کند. ماموریت وی‌پاور این است که تمامی افراد بتوانند از طریق تصمیماتی که برای خرید انرژی انجام می‌دهند، در جهت ایجاد آینده‌ای پایدار برای انرژی گام بردارند. برای انجام این کار، وی‌پاور پلتفرم تهیه و تجارت انرژی‌های تجدیدپذیر را به‌وجود آورده است. پلتفرم وی‌پاور سازمان‌هایی را که به دنبال خرید برق تجدیدپذیر (خریداران انرژی) هستند به‌صورت مستقیم به صاحبان پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر (صاحبان پروژه) متصل می‌کند و با ابزار و قراردادهای استاندارد شده امکان تعامل و تراکنش بین طرفین معامله را فراهم می‌کند. خریداران انرژی می‌توانند به‌صورت شفاف و آسان هزینه‌های برق خود را براساس پایین‌ترین نرخ موجود در ساعات مختلف روز کاهش دهند. فروشندگان هم قادر هستند برق خود را به طیف وسیعی از خریداران بفروشند و پروژه‌های خود را از لحاظ مالی تأمین کنند. این پلتفرم به فروشندگان امکان برگزاری مزایده برای فروش تولید خود را فراهم می‌کند. در حین مزایده، خریداران، مقدار مورد نیاز و قیمت پیشنهادی خود را اعلام می‌کنند. در صورت توافق، قرارداد هوشمندی بین طرفین ایجاد می‌شود و انرژی و مبلغ آن براساس مفاد قرارداد بین آنها رد و بدل می‌شود [۲۲].

۹- پلتفرم ری‌اِستارت انرژی[۵۸]-رومانی: ری‌اِستارت انرژی، یک شرکت مستقل تأمین برق و گاز اتحادیه اروپا با درآمد سالیانه ۲۰ میلیون دلار است که اولین مجوز[۵۹] خرده‌فروشی انرژی را ایجاد کرده است. این شرکت یک پلتفرم و اکوسیستم تأمین انرژی الکتریکی غیرمتمرکز و غیربومی (نداشتن محدودیت مکانی) مبتنی بر فناوری بلاکچین جهانی را ارائه کرده است. در این پلتفرم که پلتفرم دموکراسی ری‌اِستارت انرژی[۶۰] نام دارد، مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان برای دسترسی به ۱) تأمین انرژی جهانی، ۲) کنتورهای وای‌فای هوشمند؛ ۳) نرم‌افزار وات پریدیکت[۶۱] (یک نرم‌افزار ابتکاری یادگیری هوش مصنوعی است که برای تخمین میزان انرژی خورشیدی تولیدی در روز بعد طراحی شده است)، ۴) تبادل انرژی همتا به همتا، ۵) امکان کسب گواهینامه سبز (پاک) ثبت‌نام می‌کنند.

۱۰- پلتفرم وِرو[۶۲]-انگلیس: از سال ۲۰۰۹، وِرو به دلیل فناوری تفکیک‌پذیری که اطلاعات دقیقی از میزان مصرف هر یک از لوازم خانگی در اختیار اعضای خانه قرار می‌دهد، در صنعت انرژی انگلستان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. محصول اصلی این شرکت هاب خانگی وِرو[۶۳] است که یک دستگاه کنترل بار غیرمخرب و هاب انرژی خود-نصب[۶۴] است که مصرف برق خانه را تقریبا ۵ میلیون برابر سریع‌تر از کنتورهای هوشمند نمونه‌برداری می‌کند. محصول جدید این شرکت که پلتفرم معاملاتی وِرو[۶۵] نام دارد، از لحاظ مفهومی با سایر پلتفرم‌های مبادله انرژی همتا به همتا یکسان است، اما با وجود داده‌های انرژی با وضوح فوق العاده بالا که از طریق سخت افزار و فناوری هاب خانگی وِرو قابل دستیابی است، وِرو امیدوار است که بتواند راه حلی مؤثرتر و قانع کننده‌تر، خصوصاً نسبت به رقبا که از فناوری کنتور هوشمند استفاده می‌کند، ارائه دهد.

شکل (۲): بهترین ویژگی‌های فناوری بلاکچین (T5) و انرژی‌های تجدیدپذیر (D5) [۱۹]

Figure (2): The best features of blockchain technology (T5) and renewable energy (D5) [19]

پلتفرم ارائه شده توسط وِرو ترکیبی از فناوری‌های یادگیری ماشین، بلاکچین، اینترنت اشیاء و ذخیره انرژی است. مشارکت‌کنندگان برای مبادله انرژی در این پلتفرم باید از توکن‌ها مخصوص به نام وی‌لوکس[۶۶] استفاده کنند که براساس استاندارد ERC20 هستند [۲۳].

در کنار پلتفرم‌های مطرح شده، برخی از پلتفرم‌های مشترک توسط تعدادی از سازمان‌ها برای گسترش برنامه‌های بلاکچین ایجاد شده‌اند. در میان این پلتفرم‌ها، نرم‌افزار وب انرژی[۶۷] مبتنی بر اتریوم و چارچوب هایپرلجر مبتنی بر لینوکس از محبوب‌ترین‌ها به شمار می‌روند. جزئیات بیشتر در مورد پلتفرم‌های بلاکچینی به کار گرفته شده در بخش انرژی در مرجع [۲۴] ارائه شده است. علاوه بر پلتفرم‌های مطرح شده تعداد زیادی پلتفرم مبادله انرژی همتا به همتای مبتنی بر بلاکچین در مناطق مختلف دنیا ارائه شده است که لیستی از آنها در جدول (۲) ارائه شده است. با بررسی پلتفرم‌های مطالعه شده، مشخص می‌شود که غالب (حدود ۶۰ درصد) پلتفرم‌های ارائه شده در این حوزه از بلاکچین اتریوم و الگوریتم اجماع PoW به‌عنوان لایه زیرساختی استفاده می‌کنند. دلیل این امر این است که اتریوم به دلیل منبع‌باز بودن، امکان استقرار و ایجاد قراردادهای هوشمند و برنامه‌های غیر متمرکز[۶۸] (dapps) را بدون هیچگونه خرابی، کلاهبرداری، کنترل یا دخالت شخص ثالث برای برنامه‌نویسان و توسعه‌دهندگان فراهم می‌کند. به همین دلیل توانسته است مقبولیت و محبوبیت زیادی کسب کند. به همین دلیل، در این مقاله از شبیه‌ساز شبکه اتریوم به نام بلاکچین گاناچه[۶۹] که کاملا منطبق با پروتکل‌های اتریوم است برای پیاده‌سازی استفاده شده است تا کدهای ارائه شده در پلتفرم پیشنهادی کاملا قابل استفاده و استقرار در شبکه بلاکچین واقعی باشد.

یکی از کارهای مشابهی که اخیرا در این حوزه انجام شده است، پیاده‌سازی برنامه کاربردی موبایلی است که در مرجع [۲۵] ارائه شده است. در این مقاله از شبکه بلاکچین توبالا[۷۰] که وب انرژی توسعه داده است جهت ساخت و اعتبارسنجی قرارداد هوشمند استفاده شده است. همچنین از سیستم اِس‌کیولایت[۷۱] برای ایجاد کنتور هوشمند و پایگاه داده کاربران استفاده شده است. از آنجایی که تبادل انرژی در پلتفرم‌های همتا به همتای مبتنی بر بلاکچین بدون دخالت شخص ثالث انجام می‌شود، تعیین روش تسویه بازار کارآمد و قابل اعتماد یکی از نیازمندهای اصلی به شمار می‌رود [۲۶]. تسویه بازار در معاملات انرژی، الگوریتم خرید یا فروش انرژی، مزایده‌ها یا آگهی‌های مناقصه و اقدامات خاصی در معاملات انرژی را شامل می‌شود. هدف از تسویه بازار این است که مشارکت‌کنندگان بتوانند انرژی تولید شده خود را براساس میزان تقاضای انرژی قیمت‌گذاری کنند تا علاوه بر سود ایجاد رقابت، پیشنهادات خود را در مدت زمان معینی از روز ارائه دهند. فرآیند مکانیزم تسویه براساس عرضه و تقاضا به‌طور خودکار پیشنهادهای موفق یا برنده را تعیین می‌کند. پرکاربردترین روش‌های تسویه بازار عبارتند از تئوری حراج، بهینه‌سازی محدود، نظریه بازی و روش‌های مبتنی بر عامل که مرور بر آنها در مرجع [۲۷] ارائه شده است. در مرجع [۲۸] هم دو مکانیزم جدید تسویه بازار مبتنی بر بلاکچین تعبیه شده در قراردادهای هوشمند، برای تبادل امن انرژی‌های تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. در سال‌های اخیر با گسترش اینترنت، اشتراک‌گذاری داده‌ها نقش مهمی در زندگی انسان ایفا می‌کند [۲۹]. جهت حفظ تعادل منصفانه بین کارایی اقتصادی و حریم خصوصی اطلاعات، زمان‌بندی مناسب برای ذخیره انرژی و همچنین پیاده‌سازی مبتنی بر بلاکچین پلتفرم دیگری در مرجع [۳۰] ارائه شده است. این پلتفرم از دو لایه کلیدی بازار و بلاکچین تشکیل شده است. لایه بازار حراج کوتاه-مدت به همراه تسویه بازار با استفاده از روش غیرمتمرکز بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها را ارائه می‌دهد. لایه بلاکچین سطح بالایی از اتوماسیون، امنیت و تسویه حساب سریع در زمان واقعی را از طریق اجرای قرارداد هوشمند فراهم می‌کند.

۴- تحلیل و طراحی پایلوت پلتفرم بومی

هدف اصلی این مقاله آماده‌سازی یک پایلوت برای تبادل انرژی به‌صورت همتا به همتا است. استفاده از ساختارهای همتا به همتا باعث حذف واسطها می‌گردد و در کنار حذف واسطها فناوری بلاکچین و قراردادهای هوشمند این امکان را فراهم می‌کنند که اطلاعات مربوط به تولید انرژی (توکن‌ها) در یک بستر ایمن و خودکار مورد استفاده قرار گیرند. به‌منظور تحلیل و طراحی این پلتفرم سناریویی تعریف و تدوین شده است که در ادامه شرح داده شده است.

Table (2): Other blockchain-based peer-to-peer energy exchange platforms

جدول (۲): سایر پلتفرم مبادله انرژی همتا به همتای مبتنی بر بلاکچین

نام پروژه (پلتفرم)	کشور	پلتفرم	الگوریتم اجماع
Conjoule	آلمان	اتریوم	PoW
Solar Bankers (SunCoin)	سنگاپور	Skyledger	Web of Trust
Electrify.Asia	سنگاپور	اتریوم	PoW
Pylon	اسپانیا	Pylon Coin CORE	Proof of Capacity
Energy & Stedin	هلند	Quasar	نامشخص
Spectral Energy	هلند	MultiChain	Round Robin based ،PoW
Sunchain	فرانسه	هایپرلجرفابریک	Practical Byzantine Fault Tolerance
Dajie	انگلستان	نامشخص	نامشخص
Enledger	آمریکا	Tendermint-based	DPoS
Volts Markess	آمریکا	اتریوم	PoW
Daisee	فرانسه	اتریوم	PoW
Energy Bazaar	هلند	اتریوم	PoW
OurSolarGrid	آلمان	اتریوم	PoW
Divvi	استرالیا	اتریوم	PoW
CoSol	برزیل	اتریوم	PoW
KEPCO	ژاپن	اتریوم	PoW
Hive Power	سوئیس	اتریوم	PoW
Blockcypher	آمریکا	اتریوم	PoW
TOBLOCKCHAIN	هلند	نامشخص	نامشخص
Elblox	سوئیس	نامشخص	نامشخص
Minden	ژاپن	وب انرژی	Proof of Authority
Digital Grid	ژاپن	نامشخص	نامشخص
Lition	آلمان	اتریوم	PoW
Rakuten	ژاپن	اتریوم	PoW
Nydro	آرژانتین	نامشخص	نامشخص
Electron	انگلیس	اتریوم	Proof of Authority ،PoW
Grid+	آمریکا	اتریوم	PoW
Alliander	هلند	اتریوم	PoW
Innogy	آلمان	اتریوم	PoW
Vector Energy	نیوزیلند	اتریوم و اِکوچین	PoW

۱-۴- سناریوی مورد نظر

در پلتفرم پیشنهادی هر مصرف کننده می‌تواند تولیدکننده هم باشد. میزان مصرف و تولید هر مشترک از طریق کنتورهای هوشمند قابل اندازه‌گیری است. با توجه به این‌که کنتورهای هوشمند موجود در ایران قابلیت سنجش همزمان میزان تولید و مصرف را ندارند، برای محاسبه این دو متغییر، دو کنتور مجزا برای مشترکین تولید-مصرف‌کننده باید در نظر گرفته شود. علاوه بر این، هر مشترک دارای یک واحد کامپیوتری است که ماژول‌های محاسباتی، ذخیره‌سازی و شبکه را شامل می‌شود. کنتورهای هوشمند جهت انتقال داده‌ها به واحد کامپیوتری متصل هستند. واحد کامپیوتری نقش گره بلاکچین را برعهده دارد و داده‌های مشترک از جمله داده‌های کنتور هوشمند، قیمت و دارایی (توکن) را به‌منظور ثبت در بلاکچین دریافت می‌کند. به‌منظور شناسایی هر گره کامپیوتری (بلاکچینی) یک شناسه خاص و منحصر به فرد برای آن در نظر گرفته می‌شود. نکته مهم این است که گره‌های سمت مشترکین، گره‌های سبک[۷۲] بلاکچینی هستند که تنها اطلاعات تراکنش‌های مربوط به خود را

ذخیره و به گره‌های کامل[۷۳] مجاور در شبکه ارسال می‌کنند. از آنجا که این گره‌ها تنها بخشی از اطلاعات مربوط به یک سری تراکنش‌های خاص را در خود نگهداری می‌کنند، در مقایسه با گره‌های کامل به منابع محاسباتی و ذخیره‌سازی کمتری نیاز دارند. گره‌های کامل گره‌هایی هستند که اطلاعات تمام تراکنش‌ها را با جزئیات کامل در اختیار دارند، می‌توانند صحت تمام تراکنش‌های انجام شده در گذشته را مجددا بررسی و تصدیق نمایند. با توجه به وضعیت فعلی کشور و انحصاری بودن صنعت برق، در پایلوت پلتفرم ارائه شده، گره‌های کامل در اختیار شرکت‌های توزیع برق و زیرمجموعه‌های آنها یعنی مناطق برق قرار می‌گیرند. نکته مهم این است که تبادل انرژی همتا به همتا از طریق بستر شبکه توزیع موجود انجام می‌شود. به همین علت درصدی به هزینه برق مبادله شده افزوده می‌شود که به‌عنوان سهم شبکه توزیع از این مبادله در نظر گرفته می‌شود که شامل استفاده از بستر شبکه توزیع و همچنین پاداش تایید، ساخت و افزودن بلوک جدید به بلاکچین است. مشترکین به‌منظور تعامل با پلتفرم، و مدیریت و مشاهده لحظه‌ای میزان تولید و مصرف و همچنین تراکنش‌های خود نیازمند پورتال هستند. این اطلاعات به‌صورت گرافیکی و نموداری برای مشترکین نمایش داده می‌شوند. در ابتدا مشترکین باید در این پورتال ثبت‌نام کننده و اطلاعاتی از جمله نام، نام خانوادگی، شماره ملی، شناسه کنتور(ها)، شماره کیف پول (شماره حساب) را ثبت کنند. بعد از ثبت‌نام، پورتال علاوه بر نام کاربری و کلمه عبور، کلیدهای عمومی و خصوصی در اختیار مشترکین قرار می‌دهد. مشترکین علاوه بر مشاهده میزان مصرف و تولید خود، می‌توانند با ورود به بخش خرید و فروش مازاد انرژی خود را بفروش بگذارند یا از دیگر تامین‌کنندگان اقدام به خرید برق مورد نیاز خود بکنند. خریدها و فروش‌ها از طریق قراردادهای هوشمند از قبل تعریف شده و براساس اطلاعات وارد شده توسط مشترک انجام و امضا می‌شوند. واحدهای کامپیوتری (گره‌های سبک) سمت مشترکین قراردادهای هوشمند و داده‌های کنتورها را در بازه‌های زمانی مشخص به استخر حافظه[۷۴] که استخری از تراکنش‌های تایید نشده است ارسال می‌کنند. استخراج‌کننده‌ها (گره‌های کامل متعلق به مناطق برق و شرکت‌های توزیع) را به‌منظور اعتبار و صحت‌سنجی به استخر تا همچنین، هر کاربر از طریق کیف پول الکترونیکی خود می‌تواند حساب کاربری (توکن انرژی) خود را بررسی کند. ارائه و انتشار رمزارزها به هر شکلی در ایران در انحصار بانک مرکزی است و تشکیل و فعالیت اشخاص و شرکت‌ها برای ایجاد و اداره شبکه پولی و پرداخت مبتنی بر فناوری بلاکچین، از نظر این بانک، غیرمجاز محسوب می‌شود. این قضیه در مورد توکن با پشتوانه ریال هم صادق است. بنابراین بهترین و تنها راهکار برای ارائه توکن در صنعت برق، ارائه توکن با پشتوانه دارایی‌های مشهود و غیرمشهود است که تابع قوانین بورس بوده و امکان تبادل در بورس را دارا است. مدل مفهومی اکوسیستم پلتفرم پیشنهادی با در نظر گرفتن مدل مرجع شبکه هوشمند اروپا در مرجع [۳۱] در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل هم مشخص شده است، برنامه کاربردی (داشبورد کاربری)، پایگاه-داده بلاکچینی و غیربلاکچینی (رابطه‌ای) و برنامه قرارداد هوشمند چهار رکن اصلی پایلوت پلتفرم پیشنهادی محسوب می-شوند. با توجه به این‌که هیچ پلتفرم مشابهی در کشور برای این‌منظور وجود ندارد، و مشتریان آن تمامی افرادی هستند که با برق و انرژی سروکار و نیاز دارند، اصلی‌ترین گام در تولید محصول MVP تهیه لیستی از امکانات و نیازهای عملکردهای و غیرعملکردی ضروی سیستم است که در بخش بعدی ذکر شده‌اند. با توجه به ویژگی‌هایی مانند پیچیدگی و بزرگی پلتفرم، محدودیت منابع انسانی، مالی و زمانی، برای مدل‌سازی از زبان مدل‌سازی UML و برای تولید و توسعه نرم‌افزار از متدولوژی اسکرام[۷۵] استفاده شده است.

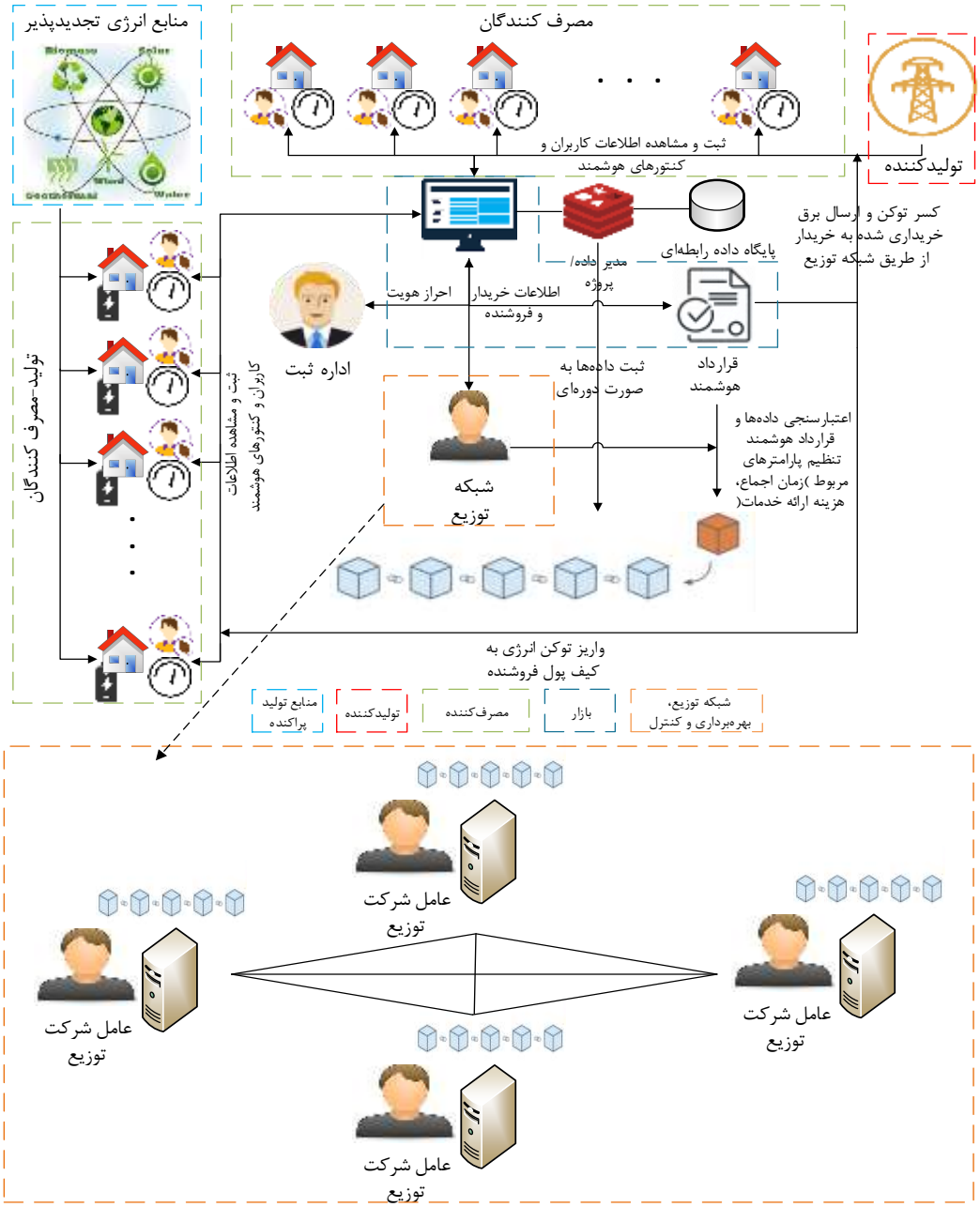
۲-۴- نیازمندی‌های عملکردی و غیرعملکردی

در این بخش نیازمندی‌های عملکردی و غیر عملکردی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نیازمندی‌های عملکردی بیانگر عملکردهایی هستند که باید در پلتفرم پیاده‌سازی گردد. این نیازمندی‌ها عبارتند از:

- اطلاعات مربوط به برق تولید شده توسط تولیدکننده‌ها باید در سیستم به‌صورت ایمن ذخیره گردند.
- تولیدکننده باید قادر باشد اطلاعات مربوط به تولید خود را مشاهده نماید.
- تولیدکننده باید امکان دریافت توکن به ازای انرژی تولید شده را داشته باشد.
- تولیدکننده باید امکان فروش توکن‌های انرژی را به هر مصرف کننده‌ای داشته باشد.

- امکان در نظر گرفتن توکن جهت محاسبه صورت حساب برق مصرفی باید وجود داشته باشد.
- برای احراز هویت و ثبت نام تولیدکنندگان و مصرف کنندگاه اداره ثبت باید روال‌های مورد نظر را فراهم کند.
- هر کاربر در سیستم دارای یکی کیف پول است که اطلاعات توکن‌ها و حساب کاربری را نگهداری می‌کند.
- امکان تغییر پارامترهای مربوط به قراردادهای هوشمند باید توسط عامل توزیع فراهم گردد.
- عامل توزیع باید قادر باشد زمان‌های اجماع را تغییر دهد.
- عامل توزیع باید قادر باشد اطلاعات اجماع‌ها را بررسی کند.
- عامل توزیع باید امکان مشاهده قراردادهای فعال در سیستم را داشته باشد.
- سابقه قراردادهای ثبت شده در کل سیستم باید توسط عامل توزیع قابل مشاهده باشد.

از جمله نیازمندی‌های غیر عملکردی که می‌بایست در این پلتفرم در نظر گرفته شوند عبارتند از:



شکل (۳): مدل مفهومی اکوسیستم پلتفرم پیشنهادی

Figure (3): Conceptual model of the proposed platform ecosystem

- امنیت: امنیت اطلاعات تولید شده در سیستم توسط ذخیره‌سازی در بلاکچین تامین می‌گردد.
- مقیاس‌پذیری: با استفاده از فنآوری بلاکچین و به‌کارگیری کسب‌وکار به‌صورت نظیر به نظیر سیستم امکان افزایش مقیاس را خواهد داشت. در واقع چون یک موجودیت مرکزی برای انجام کارها در سیستم وجود ندارد سیستم به راحتی قابل گسترش است.
- انعطاف‌پذیری: به واسطه پایش برخط تراکنش‌ها در شبکه امکان تغییر در محاسبات و محاسبه برخط صورت حساب‌ها نیز وجود خواهد شد و به عبارت دیگر به دلیل دیجیتالی شدن تمانی فرآیند خرید و فروش امکان تعریف مکانیزم‌های منعطف تر فراهم خواهد شد.
- قابلیت استفاده: به واسطه استفاده برخط از اطلاعات انرژی های تولید شده می‌توان به محض دریافت اطلاعات توکن‌های لازم جهت استفاده در تبادلات را تولید نمود و به عبارت دیگر سیستم قابلیت استفاده بیشتری برای کاربران خواهد داشت زیرا زمان انجام فرآیندهای مربوط به خرید و فروش کاهش چشمگیر خواهند داشت.

۴-۳- استخراج کاربران، عملکردها و قابلیت‌های پلتفرم

تولیدکننده، مصرف‌کننده، عامل توزیع و عامل اداره ثبت چهار کاربر اصلی در پلتفرم مبادله انرژی همتا به همتای مبتنی بر بلاکچین پیشنهادی محسوب می‌شوند که نقش و توضیحات مربوط به آنها در جدول (۳) بیان شده است. در راستای ارائه حداقل محصول قابل عرضه یا کمینه محصول پذیرفتنی، در این بخش، خلاصه‌ای از توانمندی‌ها و قابلیت‌های پلتفرم پیشنهادی در جدول (۴) آورده شده است.

۴-۴- معماری پلتفرم پیشنهادی

شمای کلی معماری پلتفرم پیشنهادی با در نظر گرفتن مدل مفهومی اکوسیستم پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است. در جدول (۵) هم بخش‌های مختلف این معماری به شکل خلاصه معرفی شده‌اند. در حوزه معماری سیستم‌های نرم‌افزاری، الگوهای معماری متعددی مانند لایه‌ای، میکروکرنل و میکروسرویس وجود دارند. معماری پلتفرم پیشنهادی مبتنی بر میکروسرویس انتخاب شده است زیرا اشتراکات زیادی بین این نوع معماری و قراردادهای هوشمند وجود دارد. هر دوی آنها از نظر اندازه کد کوچک هستند و به‌طور مستقل اجرا می‌شوند و ترجیح آنها بر این است که به‌صورت کاملا توزیع شده اجرا شوند و به موجودیت خاصی از سیستم وابسته نباشند. معماری میکروسرویس سبکی از مهندسی نرم‌افزار است که به ساخت سیستم‌های نرم‌افزاری کاملاً خود سازمانده و همتا به همتا کمک می‌کند. ایده این معماری برخلاف روش‌های سنتی سامانه‌های یکپارچه، یک سیستم توزیع شده متشکل از چندین سرویس است که هر سرویس به‌صورت مجزا پیاده‌سازی شده و سرویس مربوطه را از طریق API در اختیار سایر سرویس‌ها و مشتریان قرار می‌دهد.

Table (3): Proposed platform users

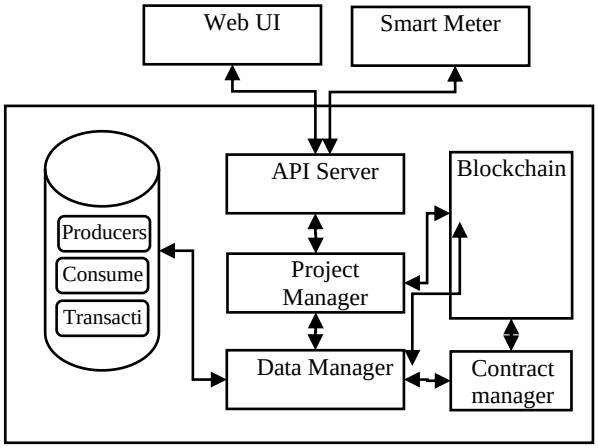
جدول (۳): کاربران پلتفرم پیشنهادی

نام	نقش	توضیحات
تولیدکننده	فروشنده انرژی	فرد حقیقی یا حقوقی است که درخواست فروش انرژی تولیدی خود را در قالب سفارش ثبت می‌نماید.
مصرف‌کننده	خریدار انرژی	فرد حقیقی یا حقوقی است که درخواست خرید انرژی را با بررسی سفارشات موجود و در قالب یک قرارداد هوشمند ثبت می‌نماید.
عامل توزیع	نظارت بر خرید و فروش انرژی و تحویل گیرنده/دهنده انرژی از/به تولید/مصرف‌کننده	فردی حقوقی و عضو یکی از شرکت‌های توزیع برق است که وظیفه نظارت بر انجام معاملات انرژی و تحویل انرژی خریداری شده به مصرف‌کننده است.
عامل اداره ثبت	احراز کننده هویت	فردی حقوقی و عضو اداره ثبت و احوال است که هویت افرادی که در پلتفرم ثبت‌نام می‌کنند را بررسی و در صورت احراز و تایید هویت، امکان ورود به پلتفرم، دریافت کیف پول، انجام معامله از طریق قرارداد هوشمند برای افراد فراهم می‌شود.

Table (4): Summary of capabilities

جدول (۴): خلاصه قابلیت‌ها

قابلیت	توضیحات
امکان ثبت مشخصات کاربری	کاربران برنامه (خریدار، فروشنده و عامل توزیع) می‌توانند مشخصات خود را در پلتفرم ذخیره و ثبت/ویرایش کنند.
امکان ثبت درخواست فروش	فروشنده می‌تواند درخواست فروش انرژی تولیدی را در برنامه ثبت نماید.
امکان ثبت درخواست خرید	خریدار می‌تواند درخواست خرید انرژی را از لیست فروش موجود در برنامه انتخاب و خرید خود را ثبت نماید.
امکان مشاهده درخواست‌ها خرید و فروش	خریدار و فروشنده می‌توانند، درخواست‌های خرید و فروش خود را مشاهده نمایند.
امکان مشاهده میزان تولید/مصرف و کیف پول	کاربران می‌توانند در صفحه شخصی خود میزان تولید/مصرف انرژی و مانده حساب خود را از طریق کیف پول مشاهده نمایند.
امکان انعقاد قرارداد هوشمند	خریدار و فروشنده می‌توانند جهت انعقاد قرارداد، از قرارداد هوشمندی که از قبل در پلتفرم ایجاد شده است، استفاده نمایند. بعد از امضای قرارداد هوشمند از طریق کلید خصوصی، امکان تغییر درخواست از سوی طرفین وجود ندارد.
امکان ثبت قرارداد هوشمند در بستر بلاکچین	پس از انعقاد و امضا، قرارداد هوشمند در بستر بلاکچین ثبت و اجرا می‌شود.
امکان مشاهده صورت حساب	کاربران بسته به نوع کاربری، امکان مشاهده صورت حساب مربوط به خود (خریدار یا فروشنده) یا تمامی صورت حساب‌ها (عامل توزیع) هستند.
امکان انجام تراکنش های مالی	پلتفرم به‌صورت خودکار و براساس قرارداد هوشمند، انتقال توکن را از کیف پول خریدار به کیف پول فروشنده و عامل توزیع انجام می‌دهد.
امکان تنظیم پارامترهای شبکه توسط عامل توزیع	عامل توزیع علاوه بر نظارت بر قراردادهای هوشمند، صدور صورت‌حساب، می‌تواند پارامترهای مانند زمان اجماع و هزینه ارائه خدمات را تنظیم کند.



شکل (۴): معماری پلتفرم پیشنهادی

Figure (4): Proposed platform architecture

۱-۴-۴- زیرسیستم‌های پلتفرم پیشنهادی

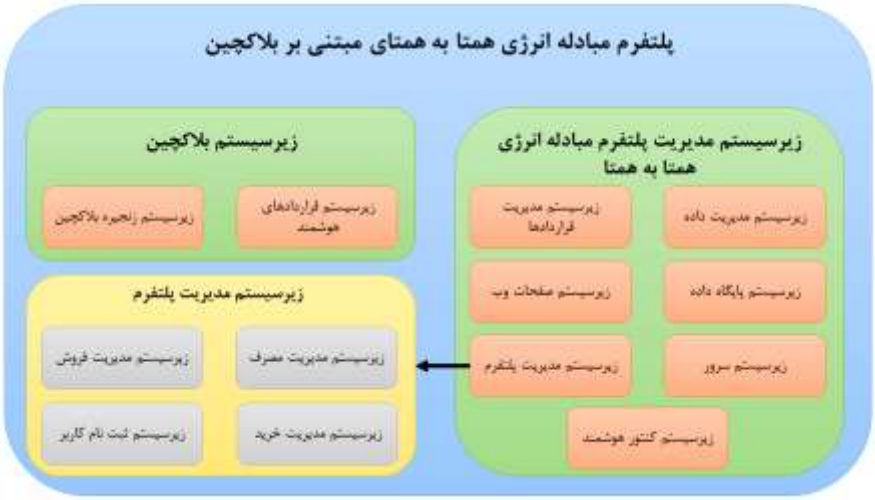
همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، پلتفرم پیشنهادی مبادله انرژی همتا به همتا از دو زیرسیستم اصلی زیر تشکیل شده است:

- زیرسیستم مدیریت پلتفرم مبادله انرژی همتا به همتا: این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی فعالیت‌های پلتفرم است. این زیر سیستم دارای هفت زیرسیستم دیگر است که در شکل (۵) و جدول (۶) معرفی شده‌اند.
- زیرسیستم بلاکچین: این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی فعالیت‌های مربوط به بلاکچین است. این زیرسیستم نیز دارای دو زیرسیستم دیگر است که در شکل (۵) و جدول (۶) به آنها پرداخته شده است.

Table (5): Units with task description

جدول (۵): واحدها به همراه شرح وظایف

نام واحد	وظیفه
Web UI	در این واحد واسط های کاربری مورد نیاز در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.
API server	این واحد وظیفه پیاده سازی توابع مورد نیاز واسط کاربری در سمت سرور را به عهده دارد.
Project Manager	این واحد مسئول پیاده سازی تمامی نیازمندی های عملکردی است که با پایگاه داده ها در ارتباط هستند. به منظور اجرای تراکنش ها نام تراکنش و پارامتر های مورد نظر به بخش Data Manager ارسال میگردد. واحد Project Manager وظایفی مانند استخراج کد تراکنش از بلاکچین و ارسال آن به بخش مدیر داده را نیز به جهت اجرای کد های درون زنجیره ای را پشتیبانی می‌کند.
Data Manager	این واحد وظیفه پیاده سازی توابع مربوط به عملیات روی داده ها را دارد. این واحد مسئول پیاده سازی پرسجو ها بر روی دو پایگاه داده بلاکچینی و غیر بلاکچینی است.
Contract Manager	این واحد وظیفه مدیریت تراکنش های روی بلاچین را بر عهده دارد. قرارداد های هوشمند در این بخش اجرا میشوند.
Blockchain	این واحد وظیفه پیاده سازی بلاکچین را در قالب یک سرویس بر عهده دارد. بخش مربوط به اجرای بلاکچین و مدیریت الگوریتم های مربوط به آن در این بخش قرار دارند.
Database	این واحد وظیفه ذخیره سازی داده ها را بر روی یک پایگاه داده رابطه ای بر عهده دارد.



شکل (۵): زیرسیستم‌های پلتفرم پیشنهادی

Figure (5): Proposed platform sub-systems

Table (6): Subsystems of the proposed platform with their responsibilities description

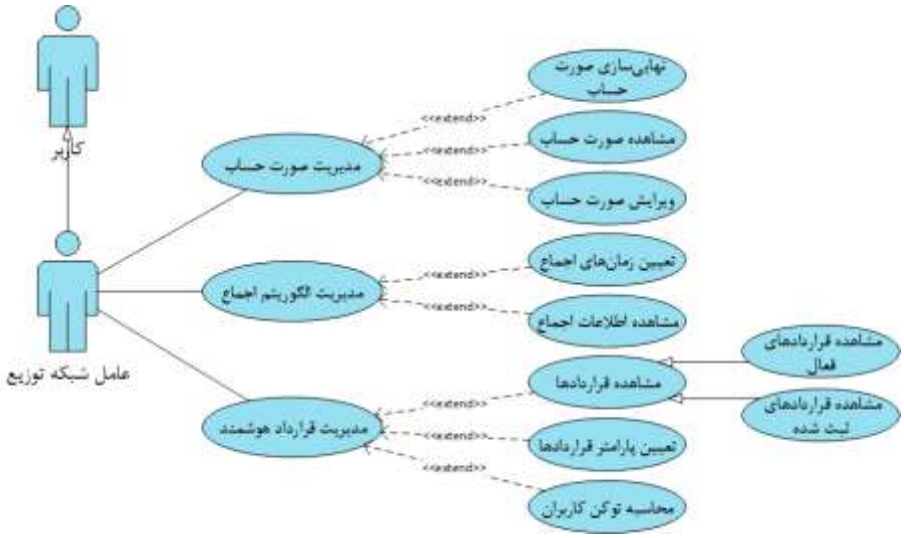
جدول (۶): زیرسیستم‌های فرعی پلتفرم پیشنهادی به همراه شرح مسئولیت آنها

نام زیرسیستم	مسئولیت
زنجیره بلاکچین	این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی پایگاه داده بلاکچینی است.
قراردادهای هوشمند	این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی قراردادهای هوشمند در سمت بلاکچین است.
مدیریت داده‌ها	این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی تمامی توابعی است که بر روی داده‌ها فعالیتی انجام می‌دهند.
مدیریت قراردادها	این زیرسیستم مسئول اجرای قراردادهای هوشمند است.
پایگاه داده	این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی پایگاه داده غیر بلاکچینی است.
صفحات وب	این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی صفحات و پنل‌های کاربران است.
سرور	این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی توابعی است که در سمت سرور اجرا می‌شوند.
مدیریت پلتفرم	این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی فعالیت‌های مربوط به مدیریت پلتفرم است.
کنتور هوشمند	این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی فعالیت‌های کنتور هوشمند است.

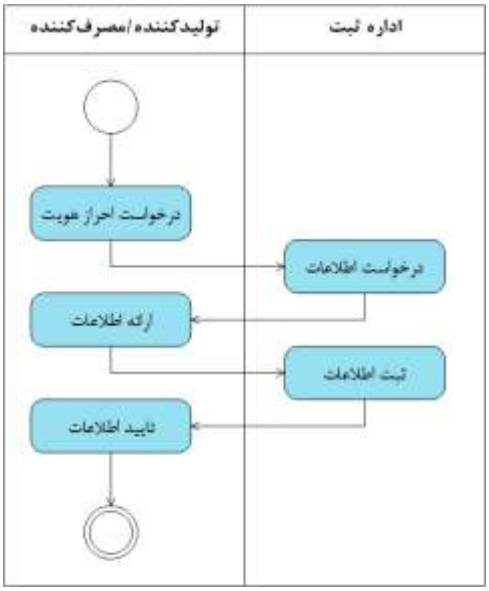
لازم به ذکر است که زیر سیستم مدیریت پلتفرم دارای چهار زیرسیستم است که در ادامه ذکر شده‌اند:
زیرسیستم مدیریت مصرف: این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی فعالیت‌های مربوط به مدیریت مصرف است.
- زیرسیستم مدیریت فروش: این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی فعالیت‌های مربوط به مدیریت فروش است.
- زیرسیستم مدیریت خرید: این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی فعالیت‌های مربوط به مدیریت خرید است.
- زیرسیستم ثبت‌نام: این زیرسیستم مسئول پیاده‌سازی فعالیت‌های مربوط به ثبت‌نام است.

۵-۴- نمودارهای رفتاری و ساختاری

نمودارهای رفتاری (شامل فعالیت، توالی و موارد کاربرد) و ساختاری (کلاس) پرکاربرد UML به منظور تحلیل پلتفرم و با درنظر گرفتن نیازهای عملکردی و غیرعملکردی طراحی و استخراج شده‌اند. موارد کاربرد مربوط به عامل شبکه توزیع به‌عنوان نمونه از نمودارهای موارد کاربرد در شکل (۶) نشان داده شده است. نمونه‌ای از نمودارهای فعالیت مربوط به احراز هویت کاربران نیز در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۶): موارد کاربرد مربوط به عامل شبکه توزیع
Figure (6): Distribution network agent use cases



شکل (۷): نمودار فعالیت احراز هویت
Figure (7): Authentication activity diagram

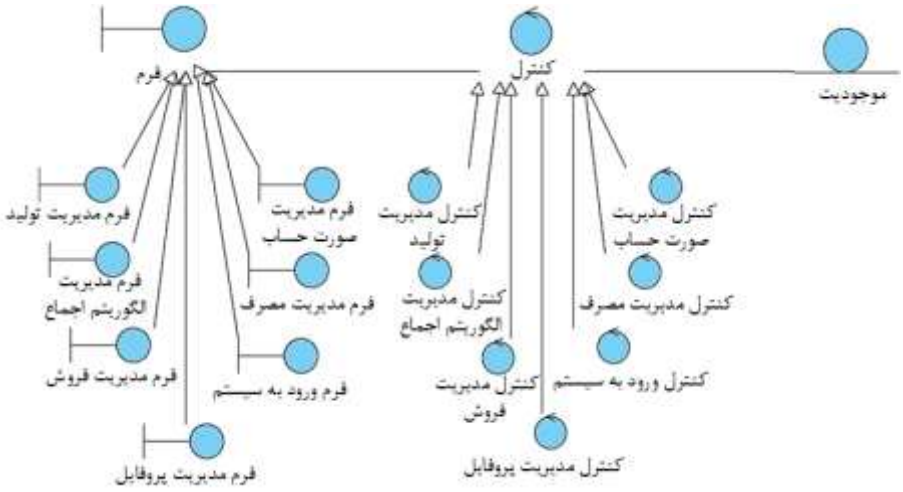
نمودار کلاس‌ها در قالب سه پکیج موجودیت، کنترل و فرم ساماندهی شده‌اند. در داخل پکیج موجودیت کلاس‌های مربوط به موجودیت‌های مانا در سیستم سازماندهی شده‌اند. در پکیج کنترل، کلاس‌هایی که مسئول پیاده‌سازی فرآیندها در سیستم هستند طراحی شده‌اند و در پکیج فرم تمامی فرم‌های مورد نیاز برای ورود و خروج اطلاعات سازماندهی شده‌اند. کلاس‌های مربوط به ارتباط فرم‌ها، کنترل‌ها و موجودیت‌ها در شکل (۸) نمایش داده شده‌اند.

مدیریت تولید، الگوریتم اجماع، فروش، پروفایل، ورود به سیستم، مصرف، صورت‌حساب اصلی‌ترین اجزاء در این پکیج محسوب می‌شوند که کلاس‌های مربوط به مدیریت فروش به‌عنوان نمونه در شکل (۹) نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن کلاس‌های استخراج شده در بخش پیشین برای هر یک از موارد کاربرد توصیف شده برای سیستم دیاگرام‌های ترتیب ارائه گردید که دیاگرام ترتیب مشاهده کیف پول به‌عنوان نمونه در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

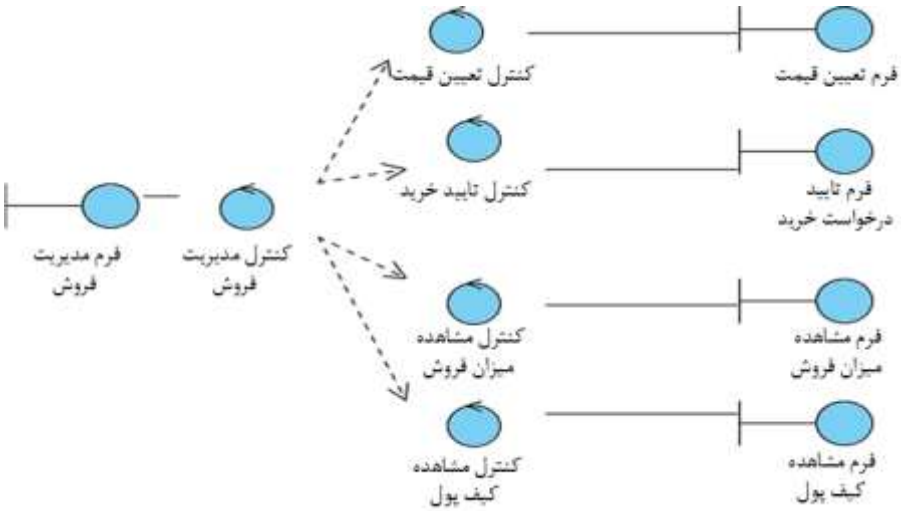
۶-۴- تحلیل و طراحی پایگاه داده

در این پلتفرم برای ذخیره‌سازی داده‌ها در پایگاه داده از دو شیوه ذخیره‌سازی استفاده شده است:



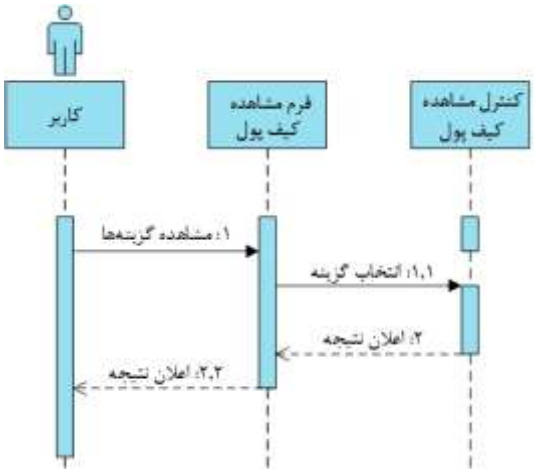
شکل (۸): کلاس‌های مربوط به ارتباط فرم‌ها، کنترل‌ها و موجودیت‌ها

Figure (8): Classes related to forms, controls, and entities



شکل (۹): کلاس‌های مربوط به مدیریت فروش

Figure (9): Sales management classes

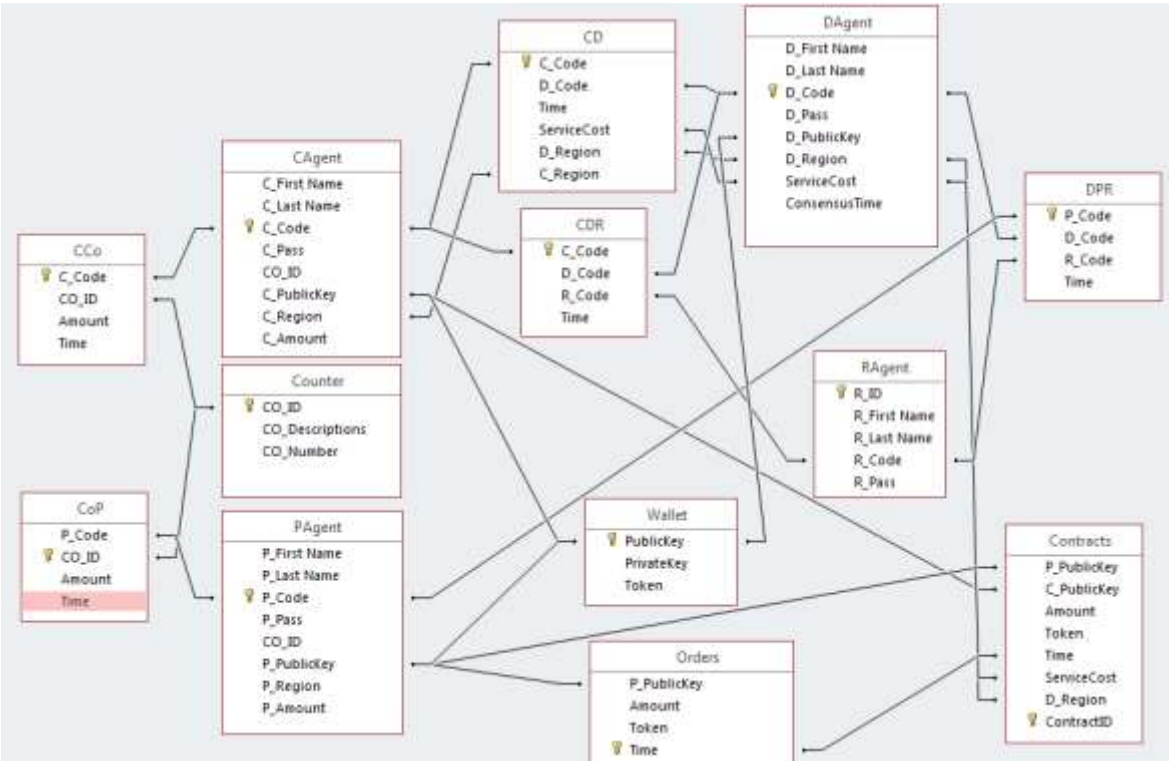


شکل (۱۰): دیاگرام ترتیب مشاهده کیف پول

Figure (10): Wallet view sequence diagram

- ذخیره‌سازی در پایگاه داده بلاکچینی: ذخیره‌سازی اطلاعات در بلاکچین هزینه زمانی و محاسباتی بالایی دارد فلذا انتخاب بخشی از داده‌ها که باید در بلاکچین ذخیره شود می‌بایست با دقت بالایی صورت گیرد. در پلتفرم پیشنهادی داده‌های مربوط به قرارداد هوشمند، تراکنش‌ها و کنتور و اطلاعات کاربران در دوره‌های زمانی مشخص(زمان اجماع) در بلاکچین ذخیره می‌شوند.

- ذخیره‌سازی در پایگاه داده غیر بلاکچینی: در این بخش از یک پایگاه داده رابطه‌ای برای ذخیره‌سازی داده‌ها استفاده می‌گردد. با توجه به نیازمندی‌های پلتفرم بخش‌های مرتبط با اطلاعات پرسنلی(تولید کننده و مصرف کننده) و توکن‌ها در پایگاه داده ذخیره می‌گردد. برای طراحی پایگاه داده غیربلاکچینی از دو سطح طراحی معنایی و طراحی منطقی استفاده شده است. ساختار کلی پایگاه داده غیربلاکچینی به همراه ارتباطات میان جداول در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): جداول پایگاه داده و ارتباط میان آنها

Figure (11): Database tables and the relationship between them

۵- پیاده‌سازی و آزمون پلتفرم پیشنهادی

برنامه کاربردی برای پلتفرم پیشنهادی براساس نیازمندی‌های عملکردی و غیرعملکردی و همچنین نمودارهای رفتاری و ساختاری که در بخش قبلی ارائه گردیدند، پیاده‌سازی شده است. مشخصات برنامه کاربردی و پایگاه داده مورد استفاده در جدول (۷) بیان شده است. پلتفرم پیاده‌سازی شده با معماری سه لایه تحت وب طراحی شده است. این برنامه در سمت سرور شامل ۸ کلاس معادل با ۸ صفحه در طراحی رابط گرافیکی (سمت کلاینت) است. این ۸ کلاس عبارتنداز فرم ورود کاربران به برنامه کاربردی، فرم ثبت نام کاربران در برنامه کاربردی، داشبورد تولیدکننده، داشبورد مصرف‌کننده، داشبورد عامل توزیع، ثبت سفارش فروش انرژی، خرید انرژی و ثبت قرارداد و صفحه ویرایش اطلاعات کاربران.

۵-۱- کارکرد پلتفرم پیشنهادی و رابط گرافیکی

رابط گرافیکی از هشت صفحه مجزا شامل ۱) صفحه ورود کاربران، ۲) صفحه ثبت نام کاربران، ۳) صفحه داشبورد تولیدکننده، ۴) صفحه داشبورد مصرف‌کننده، ۵) صفحه داشبورد عامل توزیع، ۶) صفحه ثبت سفارش، ۷) صفحه خرید انرژی و ۸) صفحه ویرایش اطلاعات کاربران تشکیل شده است. شکل (۱۲) صفحه طراحی و پیاده‌سازی شده برای ثبت نام کاربران را نشان می-دهد.

۵-۲- اتصال برنامه کابردی به قرارداد هوشمند و بلاکچین

Table (7): Application and database specifications

جدول (۷): مشخصات برنامه کاربردی و پایگاه داده

عنوان	مقدار
زبان برنامه‌نویسی سمت سرور	ASP.NET C#
مدل برنامه‌نویسی	WEB FORM
زبان برنامه‌نویسی سمت کاربر	CSS/XHTML
پایگاه داده	ACCESS
تعداد جداول پایگاه داده	۱۳ عدد
زبان برنامه نویسی قرارداد هوشمند	Solidity
شبیه‌سازی بلاکچین اتریوم	Ganache

شکل (۱۲): صفحه ثبت نام کاربران

Figure (12): User registration page

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اطلاعات و تراکنش‌های پلتفرم توسط بخش مدیر داده در دو پایگاه داده رابطه‌ای (غیربلاکچینی) و بلاکچینی ثبت می‌شوند. تمامی اطلاعات و تراکنش‌ها در پایگاه داده رابطه‌ای ثبت می‌شوند، اما به دلیل هزینه‌بر بودن ثبت اطلاعات در بلاکچین، فقط اطلاعات و تراکنش‌ها مهم در بلاکچین ثبت می‌شوند. به همین علت، قرارداد هوشمند و اطلاعات مربوط به آن بهمراه تراکنش‌های مالی و اطلاعات کیف پول کاربران در بلاکچین ثبت می‌شوند. بنابراین پلتفرم پیشنهادی در بخش‌هایی از کارکرد خود، با قرارداد هوشمند و بلاکچین در تعامل است و این بخش‌ها عمدا در فرم خرید قرار دارند. به منظور تطابق کامل با بلاکچین اتریوم در این اتصال از کتابخانه‌ای به نام نِتریوم[۷۶] و از بلاکچین گاناچه که یک بلاکچین خصوصی اتریوم برای توسعه و اجرای قراردادهای هوشمند و برنامه‌های کاربردی توزیع شده است، استفاده شده است [۳۲]. در این کتابخانه تمامی توابع موجود در برنامه قرارداد هوشمند، شبیه‌سازی شده و قابل فراخوانی است. دو کتابخانه نِتریوم.وب۳[۷۷] و نِتریوم.کانترکت[۷۸] دانلود و در ویژوال استودیو[۷۹] ۲۰۱۷ نصب شدند [۳۳].

۱-۲-۵- برنامه قرارداد هوشمند

همان‌طور که در بخش ۲-۲ بیان شد، قرارداد هوشمند یک برنامه کامپیوتری است که ایجاد آن نیازمند برنامه‌نویسی است. یک قرارداد هوشمند شامل کد برنامه، فایل ذخیره‌سازی و مانده حساب است. هر کاربر می‌تواند یک قرارداد را با ارسال یک تراکنش به بلاکچین ایجاد کند. زمانی که کد قرارداد برنامه‌نویسی شده تایید و اجرا شد، دیگر قابل تغییر و بازگشت نیست. به عبارت دیگر، در ابتدا، دارایی‌ها و شرایط قرارداد، کد گذاری می‌شوند و در یک بلاک از شبکه بلاکچین قرار می‌گیرند. این قرارداد بین گره‌های شبکه، توزیع می‌شود. پس از انجام پردازش، قرارداد مطابق با شرایط مشخص شده اجرا می‌گردد. با توجه به بررسی-های انجام شده در مورد زبان‌های برنامه‌نویسی قراردادهای هوشمند، در بخش ۲-۲، زبان برنامه‌نویسی سالیدیتی اولین انتخاب برای نوشتن قراردادهای هوشمند است [۳۴]. در این مقاله هم با توجه به نیازمندی‌های پلتفرم پیشنهادی، از این زبان برای نوشتن قرارداد هوشمند استفاده شده است. این زبان برنامه‌نویسی مخصوص توسعه قراردادهای هوشمند بر روی بلاکچین اتریوم با استفاده از ماشین مجازی اتریوم است. برای تحلیل نیازمندی و طراحی قرارداد هوشمند مورد نیاز در پروژه، "فرم درخواست خرید و فروش در بازار مشتقه و بازار سایر اوراق بهادار قابل معامله بورس انرژی ایران" به‌عنوان قرارداد نمونه در نظر گرفته شده است. به منظور نگاشت این قرارداد به قرارداد هوشمند پارامترهای کلید عمومی فروشنده و خریدار، که همان آدرس کیف پول کاربران هم محسوب می‌شود، میزان انرژی سفارش داده شده برای فروش (بر حسب کیلووات)، قیمت فروش (برحسب توکن یا اتر)، شماره و زمان قرارداد و هزینه ارائه خدمات برای ثبت در قرارداد هوشمند همتا به همتای انرژی مورد نیاز است. این پارامترها با نام متغییرهایی که در جدول (۸) تعریف شده‌اند در قرارداد هوشمند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مقاله، برای پیاده‌سازی قرارداد هوشمند با زبان برنامه‌نویسی سالیدیتی از محیط رِمیکس[۸۰] که یک محیط توسعه یکپارچه[۸۱] (IDE) قراردادهای هوشمند بر روی پلتفرم اتریوم است، استفاده شده است [۳۵]. با استفاده از این IDE نیازی به نصب نرم‌افزارهای جانبی مانند ویرایشگر متن و کامپایلر نخواهد بود. برای تعریف متغییرهای مربوط به جدول قرارداد (جدول (۸)) مطابق شکل (۱۳) از ساختمان داده ساختار در سالیدیتی استفاده شده است.

Table (8): Smart contract parameters

جدول (۸): پارامترهای قرارداد هوشمند

پارامتر	توضیح
P_PublicKey	کلید عمومی (شماره حساب) فروشنده (تولیدکننده) انرژی
C_PublicKey	کلید عمومی (شماره حساب) خریدار (مصرف‌کننده) انرژی
Token	قیمت فروش انرژی (برحسب توکن، اتر) که توسط فروشنده تنظیم می‌شود.
Amount	میزان انرژی سفارش داده شده برای فروش (بر حسب کیلووات) که توسط فروشنده تنظیم می‌شود.
SecviceCost	هزینه ارائه خدمات شبکه توزیع که توسط عوامل توزیع تنظیم می‌شود.
ContractID	شماره قرارداد هوشمند ثبت شده
Time	زمان ثبت قرارداد هوشمند

```
struct Contract {
   address P_PublicKey;
   address C_PublicKey;
   uint Token;
   uint Amount;
   uint ServiceCost;
   uint ContractID;
   uint Time;
 }
```

شکل (۱۳): نحوه تعریف متغییرهای قرارداد هوشمند

Figure (13): Defining smart contract variables

تابع اصلی قرارداد هوشمند تابع سِت‌اُردِر[۸۲] است که کد آن در شکل (۱۴) نشان داده شده است، علاوه بر دریافت مقادیر مورد نیاز جهت تنظیم قرارداد هوشمند (کلید عمومی فروشنده و خریدار، قیمت فروش (برحسب توکن یا اتر)، میزان انرژی سفارش داده شده برای فروش (بر حسب کیلووات)، هزینه ارائه خدمات و شماره قرارداد)، عملیات محاسبه مانده حساب خریدار و فروشنده برای قبل و بعد انجام قرارداد هوشمند، فراخوانی تابع رسیودیپوزیت[۸۳] برای انتقال توکن از حساب خریدار به حساب فروشنده، فراخوانی تابع پیش‌فرض ترانسفر[۸۴] برای انتقال توکن از قرارداد هوشمند به حساب فروشنده، درج کلید عمومی فروشنده و خریدار در آرایه‌های سِل‌اُردِرز[۸۵] و بای‌اُردِرز[۸۶] را هم انجام می‌دهد. لازم به ذکر است به دلیل این‌که در این تابع انتقال توکن انجام می‌گیرد، این تابع و آدرس دریافت کننده توکن‌ها (فروشنده انرژی) هم از نوع قابل پرداخت[۸۷] تعریف شده‌اند. در ضمن متغییر زمان ثبت قرارداد هم با کلمه کلیدی حالا[۸۸] در متغییر تایم[۸۹] ذخیره می‌شود. با توجه به این‌که مقادیر مالی در سالیدیتی براساس وِی[۹۰] (وِی کوچکترین واحد اتر و معادل $۱۰^{-۱۸}$ اتر است) محاسبه می‌شوند، در زمان انتقال از طریق تابع ترانسفر این تبدیل با استفاده از ضرب مقدار وارد شده در یک اتر انجام می‌شود.

بعد از نوشتن و کامپایل کردن قرارداد، می‌بایست آن را در ماشین مجازی اتریوم آپلود کرد تا ضمن دسترسی و تعامل با آن، بتوان عملکرد قرارداد را صحت‌سنجی کرد. برای این‌منظور و همچنین ثبت اطلاعات در بلاکچین، در این مقاله از بلاکچین گاناچه استفاده شده است. گاناچه به دو صورت برنامه کاربری و ابزار خط فرمان در دسترس است. در این مقاله از حالت برنامه کاربردی گاناچه که دارای رابط کاربری است استفاده شده است. با تنظیم پارامترهای مورد نیاز و ذخیره فضای کاری، بلاکچینی با مشخصات و کاربران مورد نیاز ایجاد می‌شود [شکل (۱۵)].

برای اتصال رِمیکس به گاناچه، در بخش استقرار و اجرای تراکنش‌ها[۹۱]، متغییر محیطی[۹۲] را بر روی گزینه عرضه‌گر وب[۹۳] قرار داده و اندپوینت[۹۴] را مطابق با آدرس سرور بلاکچین گاناچه (http://127.0.0.1:7545) تنظیم می‌شود. با انتخاب آدرسی که متعلق به یکی از عوامل شبکه توزیع مانند آدرس اول در شکل (۱۵) است و فشار دادن دکمه استقرار[۹۵]، قرارداد با آدرس مشخصی در گاناچه ایجاد و بارگزاری می‌شود که این آدرس به‌منظور دستیابی و تعامل با قرارداد هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرد [شکل (۱۶)]. متغییرهای بلاکچین شامل نشانی وب بلاکچین، آدرس و واسط دودویی کاربردی[۹۶] قرارداد هوشمند، که برای اتصال برنامه کاربردی به بلاکچین مورد نیاز هستند در صفحه خرید انرژی و ثبت قرارداد گنجانده شده‌اند تا با فراخوانی قرارداد هوشمند اطلاعات مربوط به قرارداد در بلاکچین نیز ثبت شوند.

۳-۵- نیازمندی‌ها و الزامات پیاده‌سازی واقعی پلتفرم پیشنهادی

نیازمندی‌ها و الزامات پیاده‌سازی واقعی پلتفرم پیشنهادی و نحوه حرکت به سمت پایلوت میدانی به‌صورت مختصر در این بخش بیان شده است. در راستای تبدیل پایلوت پیاده‌سازی شده به پایلوت میدانی اقدامات زیر بایستی انجام پذیرد:

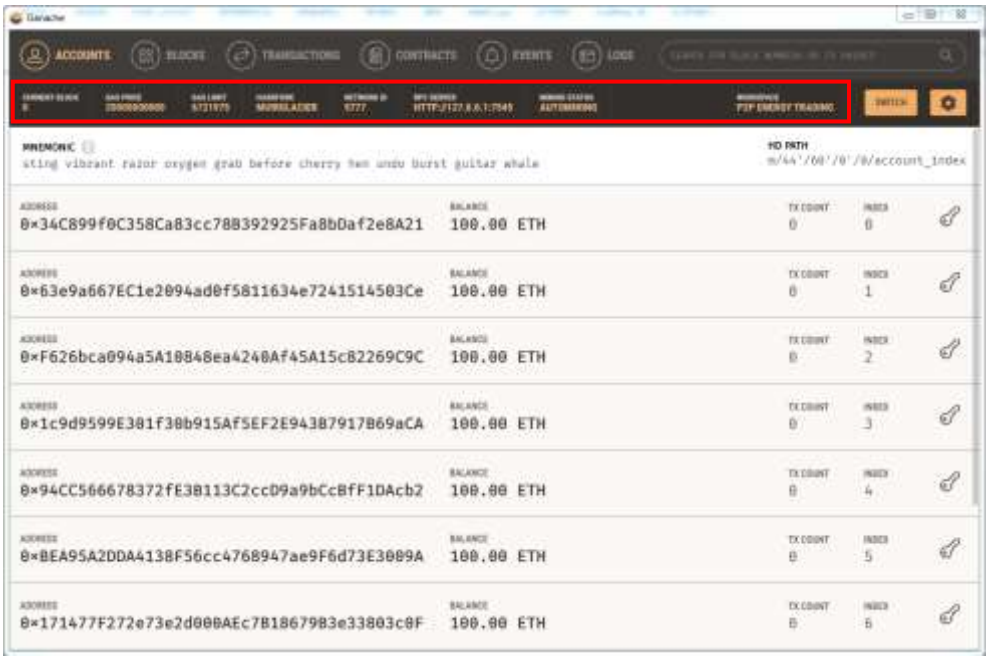
- ایجاد زیرساخت بلاکچین مبتنی بر پروتکل‌های اتریوم یکی از اساسی‌ترین نیازمندی‌های پیاده‌سازی پایلوت میدانی مبادله انرژی همتا به همتا است. در صورت توسعه زیرساخت مورد نظر به‌عنوان سرویس امکان استفاده از سرویس مورد نظر توسط کد توسعه داده شده وجود خواهد داشت و همچنین کاربردهای دیگر مبتنی بر بلاکچین را نیز می‌توان بر روی همین بستر ارائه کرد.

```
function setOrder(address payable P_PublicKey, address C_PublicKey,
uint Token,uint Amount,uint ServiceCost, uint ContractID) public payable {

    Order.P_PublicKey = P_PublicKey;
    Order.C_PublicKey = C_PublicKey;
    Order.Token = Token;
    Order.Amount = Amount;
    Order.ServiceCost = ServiceCost;
    Order.ContractID = ContractID;
    Order.Time = now;
    uint balance1 = P_PublicKey.balance;
    uint balance2 = C_PublicKey.balance;
    uint balanceP = balance1 + ((Order.Token) * 1 ether);
    uint balanceC = balance2 - ((Order.Token + Order.ServiceCost) * 1 ether);
    balance[P_PublicKey] = balanceP;
    balance[C_PublicKey] = balanceC;
    receiveDeposit();
    P_PublicKey.transfer((Order.Token)*(1 ether));
    SellOrders.push(P_PublicKey) -1;
    BuyOrders.push(C_PublicKey) -1;
}
```

شکل (۱۴): تابع سِت‌اُردِر

Figure (14): setOrder function



شکل (۱۵): مشخصات بلاکچین ایجاد شده به همراه کلیدهای عمومی کاربران در گاناچه

Figure (15): Created blockchain profile along with users' public keys in Ganache

شکل (۱۶): استقرار قرارداد هوشمند در گاناچه

Figure (16): Deploying smart contract in Ganache

- ایجاد زیرساخت جهت راه‌اندازی بخش غیر بلاکچینی که نیازمند یک سرور با پشتیبانی ویندوز سرور و توابع مورد نیاز است.

- علاوه بر نیازمندی‌های زیرساختی بلاکچینی و غیربلاکچینی، استانداردسازی تبادل اطلاعات و ارتباطات که شناسایی ساختار و مدل‌های داده‌ای، ارتباطات و نیازمندی‌های آنها و پروتکل‌های ارتباطی را شامل می‌شود یکی دیگر از اقدامات مورد نیاز است.
- بررسی و مطالعه زیرساخت‌های موجود و وضعیت فعلی بورس انرژی ایران، مکانیزهای قیمت‌گذاری و تطابق قیمت، ا ستخراج نیازمندی‌های بازار انرژی از مهمترین اقدامات مورد نیاز برای پیاده‌سازی پایلوت میدانی محسوب می‌شوند.
- استخراج پروتکل‌های سیستم ثبتی کشور و توسعه زیرساخت برای ثبت و احراز هویت تولیدکن نده، م صرف کن نده و عا مل توزیع در اداره ثبت از دیگر نیازمندی‌ها و الزامات به شمار می‌رود. این امر نیازمند تحقیق و بررسی سیستم ثبتی کشور ا ست و بخش‌هایی از پلتفرم ارائه شده باید مبتنی بر زیرساخت ثبتی کشور مجددا توسعه یابد.

۴-۵- آزمون پلتفرم پیشنهادی

آزمون نرم‌افزار به فرایند ارزیابی یک نرم‌افزار به منظور تشخیص تفاوت بین رفتار کنونی و رفتار مورد انتظار گفته می‌شود. علاوه بر آن آزمون نرم‌افزار ارزیابی امکانات و ویژگی‌های یک نرم افزار را نیز شامل می‌شود. آزمون‌های نرم‌افزاری به دو دسته آزمون‌های عملکردی و غیر عملکردی تقسیم می‌شوند. آزمون‌های عملکردی اشاره به آزمون عملکردهای یک نرم افزار دارد در حالیکه آزمون غیر عملکردی اشاره به ویژگی‌ها و محدودیت‌های ناظر بر عملکردهای نرم افزار دارد. پلتفرم پیاده‌سازی شده با استفاده از سناریوهای مختلف مورد ارزیابی و آزمون قرار گرفت. در این مقاله با توجه به این‌که پیاده‌سازی به‌صورت پایلوت بوده است، تاکید بر بررسی آزمون‌های عملکردی بوده است. آزمون‌های عملکردی انجام شده عبارتند از:
- آزمون واحد[۹۷]: آزمونی که برای بررسی واحدهای پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- آزمون یک‌پارچگی[۹۸]: آزمونی که برای بررسی نرم‌افزار پس از ترکیب و پکپارچه شدن تعدادی از واحدهای آن به عمل می‌آید.
- آزمون سیستم[۹۹]: آزمون نرم افزار به‌عنوان یک موجودیت واحد و یکپارچه متشکل از همه واحدهای موجود.
- آزمون پذیرش: آزمونی که پس از تحویل نسخه اجرایی به کاربر و استقرار در محل کارفرما با مدیریت تیم نرم افزاری انجام می‌شود.
- لازم به ذکر است که پلتفرم پیشنهادی آزمون‌های فوق را با موفقیت پشت سر گذاشته است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن وضعیت خاص شبکه برق ایران، برای اولین بار پلتفرم مبادله انرژی همتا به همتای بومی طراحی و مدل مفهومی اکوسیستم پلتفرم پیشنهادی براساس مدل مرجع شبکه هوشمند انرژی اروپا ارائه شد. معماری کلان سیستم براساس حداقل محصول قابل عرضه با درنظر گرفتن نیازهای عملکردی و غیرعملکردی در قالب نمودارهای رفتاری (فعالیت، توالی و موارد کاربرد) و ساختاری (کلاس) پرکاربرد UML ارائه شد. سپس، مهمترین ارکان پلتفرم پیشنهادی شامل برنامه کاربردی، پایگاه‌داده بلاکچینی و غیربلاکچینی (رابطه‌ای) و قرارداد هوشمند پیاده‌سازی شدند. در این راستا از بلاکچین گاناچه که کاملا منطبق با پروتکل اتریوم است استفاده شده است. بهره‌گیری از این پلتفرم می‌تواند مزایای زیادی از جمله کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، افزایش پایداری، تاب‌آوری، امنیت و قابلیت اطمینان شبکه، کاهش تلفات و هزینه انرژی و بهبود مدیریت را برای صنعت برق و ذینفعان پرشمار آن به ارمغان بیاورد [۳۶،۳۷]. با توجه به وسعت توکن‌های حوزه انرژی و ذینفعان بازارهای مربوطه، توسعه انواع توکن‌ها توسط بخش‌های مختلف بسیار هزینه بر خواهد بود. بنابراین، ارائه یک زیرساخت متن باز برای توسعه توکن‌های انرژی توسط ارگان‌های وابسته به وزارت نیرو یکی از نیازمندی‌های اصلی این حوزه محسوب می‌شود و می‌تواند باعث افزایش نظارت‌پذیری و همکاری در اکوسیستم انرژی گردد. استخراج چالش‌ها و الزامات پیاده‌سازی پایلوت میدانی جهت حرکت به سمت پیاده‌سازی واقعی این پلتفرم و ارزیابی نیازمندی‌های غیرعملکردی یکی دیگر از کارهای آتی جهت توسعه پلتفرم پیشنهادی محسوب می‌شود. به‌طور کلی در این مقاله گام‌های اولیه در خصوص تعریف توکن انرژی و قرارداد هوشمند برداشته شد که می‌تواند به‌صورت‌های زیر به گسترش یابد:

- پیاده‌سازی یک پلتفرم عمومی برای مدیریت توکن‌های برق و انرژی: در پیاده‌سازی فعلی تمرکز بر روی یک نوع توکن و یک نوع دارایی بوده است. این پیاده‌سازی به دلیل تطابق با پروتکل اتریوم می‌تواند به تعداد زیاد و متنوعی از دارایی‌ها گسترش یابد و به سمت یک پلتفرم عمومی سوق داده شود. با تعریف چندین مدل از توکن مانند توکن انرژی و توکن گازهای سمی می‌توان چرخه‌های اقتصادی و ارزش مربوط به چندین مدل از دارایی را در پلتفرم مدل‌سازی و پیاده‌سازی نمود. با چنین گسترشی می‌توان به یک پلتفرم پایه برای انواع توکن‌های دخیل در صنعت برق و انرژی دست یافت که می‌تواند برای وزارت نیرو ارزشمند باشد زیرا باعث افزایش قدرت حاکمیت بر توسعه توکن‌ها در آینده نزدیک خواهد شد.

- ارائه یک زیرساخت متن باز برای توسعه انواع توکن‌ها: با توجه به وسعت انواع توکن‌ها و ذینفعان بازارهای مربوطه توسعه انواع توکن‌ها توسط ارگان‌های وابسطه به صنایع مختلف بسیار هزینه‌بر خواهد بود. ارائه یک زیرساخت متن باز توسط یک سازمان دولتی می‌تواند باعث افزایش نظارت‌پذیری و همکاری در اکوسیستم مختلف از جمله انرژی گردد. فلذا توسعه زیرساخت‌ها و استانداردهای مناسب در این حوزه می‌تواند بسیار ضروری باشد.

- ارائه یک چهارچوب برای توسعه قراردادهای مربوط به برق و انرژی: تعداد و جنس قراردادها در تبادلات انرژی به‌صورت نظیر به نظیر با انواع قراردادهای موجود بسیار متفاوت است. در مقاله حاضر یک قرارداد به‌صورت کامل پیاده‌سازی شده است و امکان افزایش تعداد قراردادها و توسعه قراردادهای ساده و ترکیبی وجود خواهد داشت. با گسترش چارچوب ارائه شده می‌توان توسعه آتی قراردادهای هوشمند را در زیرساخت ارائه شده مدیریت کرد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پژوهش انجام شده در گروه پژوهشی فناوری اطلاعات و ارتباطات پژوهشگاه نیرو است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران گروه پژوهشی پژوهشگاه نیرو و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

[1] M. Abbasi, M. Nafar, M. Simab, "Management and control of microgrids connected to three-phase network with the approach of activating current limitation under unbalanced errors using fuzzy intelligent method with the presence of battery, wind, photovoltaic and diesel sources", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 49, pp. 59-71, June 2022 (dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.49.4.3).

[2] P. Wongthongtham, D. Marrable, B. Abu-Salih, X. Liu, G. Morrison, "Blockchain-enabled peer-to-peer energy trading", Computers Electrical Engineering, vol. 94, pp. 1-13, Sept. 2021 (doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107299).

[3] M. Pichler, M. Meisel, A. Goranovic, K. Leonhartsberger, G. Lettner, G. Chasparis, H. Vallant, S. Marksteiner, H. Bieser, "Decentralized energy networks based on blockchain: background, overview and concept discussion", Proceeding of the ICBIS, pp. 244-257, Berlin, Germany, Jan. 2018 (doi: 10.1007/978-3-030-04849-5_22).

[4] C L.Y. Sarah, P. Saiteja, H.Y. Ping, "Blockchain industries, regulations and policies in singapore", Asian Research Policy, vol. 9, no. 2, pp. 83-98, Dec. 2018.

[5] Y. Wu, Y. Wu, H. Cimen, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, "P2P energy trading: Blockchain-enabled P2P energy society with multi-scale flexibility services", Energy Reports, vol. 8, pp. 3614-3628, Nov. 2022 (doi: 10.1016/j.egyr.2022.02.074).

[6] W. Mougayar, "The business blockchain: promise, practice, and application of the next internet technology", John Wiley & Sons, pp. 1-208, May 2016 (ISBN: 978-1-119-30031-1).

[7] S.M.H. Bamakan, A. Motavali, A.B. Bondarti, "A survey of blockchain consensus algorithms performance evaluation criteria", Expert Systems with Applications, vol. 154, pp. 1-39, Sept. 2020 (doi: 10.1016/j.eswa.2020.113385).

[8] M.R. Jabbarpour, M. Zahir, S. Seyedfarshi, F. Sedighi, "Introduction to blockchain technology in power industry", 1st Edition. Niroo Research Inistitute, pp. 1-260, 2021 (in Persian) (ISBN: 978-622-98001-5-7).

[9] R. Colomo-Palacios, M. Sánchez-Gordón, D. Arias-Aranda, "A critical review on blockchain assessment initiatives: A technology evolution viewpoint", Journal of Software: Evolution and Process, vol. 32, no. 11, pp. 1-11, May 2020 (doi: 10.1002/smr.2272).

[10] B. Waltl, C. Sillaber, U. Gallersdörfer, F. Matthes, "Blockchains and smart contracts: a threat for the legal industry?", Business Transformation through Blockchain, vol. 2, pp. 287-315, Dec. 2018 (doi: 10.1007/978-3-319-99058-3_11).
[11] C.D. Clack, "Smart Contract Templates: legal semantics and code validation", Journal of Digital Banking, vol. 2, no. 4, pp. 338-352, May 2018.
[12] A. Savelyev, "Contract law 2.0:'Smart'contracts as the beginning of the end of classic contract law", Information communications technology law, vol. 26, no. 2, pp. 116-134, April 2017 (doi: 0.1080/136008-34.2017.1301036).
[13] R.M. Parizi, A. Dehghantanha, "Smart contract programming languages on blockchains: An empirical evaluation of usability and security", Proceeding of the ICB, pp. 75-91, Seattle, WA, USA, June 2018 (doi: 10.1007/978-3-319-94478-4_6).
[14] S. Tikhomirov, E. Voskresenskaya, I. Ivanitskiy, R. Takhaviev, E. Marchenko, Y. Alexandrov, "Smartchec-k: Static analysis of ethereum smart contracts", Proceedings of the IWETSEB, pp. 9-16, Gothenburg, Sweden, May 2018 (doi: 10.1145/3194113.3194115).
[15] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, C. Weinhardt, "Designing microgrid energy markets: a case study: the Brooklyn microgrid", Applied Energy, vol. 210, pp. 870-880, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.054).
[16] Y. Kim, K. Kim, J. Kim, "Power trading blockchain using hyperledger fabric", Proceeding of the IEEE/ICOIN, pp. 821-824, Barcelona, Spain, Jan. 2020 (doi: 10.1109/ICOIN48656.2020.9016428).
[17] C. Liu, X. Zhang, K.K. Chai, J. Loo, Y. Chen, "A survey on blockchain-enabled smart grids: Advances, applications and challenges", IET Smart Cities, vol. 3, no. 2, pp. 56-78, May 2021 (doi: 10.1049/smc2.1-2010).
[18] M. Botticelli, F. Moretti, S. Pizzuti, S. Romano, "Challenges and opportunities of Blockchain technology in the energy sector", Proceeding of the IEEE/AEIT, pp. 1-6, Catania, Italy, Sept. 2020 (doi: 10.23919/AEI-T50178.2020.9241119).
[19] S.A. Chacra, Y. Sireli, U. Cali, "A review of worldwide blockchain technology initiatives in the energy sector based on go-to-market strategies", International Journal of Energy Sector Management, vol. 15, no. 6, pp. 1050-1065, Nov. 2021 (doi: 10.1108/IJESM-05-2019-0001).
[20] M.R. Jabbarpour, M. Zahir Joozdani, S. Seyedfarshi, "Blockchain applications in power industry", Proceeding of the IEEE/ICEE, pp. 1-5, Tabriz, Iran, Nov. 2020 (doi: 10.1109/ICEE50131.2020.9260690).
[21] Y. Akın, C. Dikkollu, B.B. Kaplan, U. Yayan, E.N. Yolaçan, "Ethereum blockchain network-based electrical vehicle charging platform with multi-criteria decision support system", Proceeding of the IEEE/UBMYK, pp. 1-5, Ankara, Turkey, Nov. 2019 (doi: 10.1109/UBMYK48245.2019.8965557).
[22] Y. Tian, R.E. Minchin, K. Chung, J. Woo, P. Adriaens, "Towards inclusive and sustainable infrastructure development through blockchain-enabled asset tokenization: An exploratory case study", Proceeding of the CCC, vol. 1218, pp. 1-6, Budapest, Hungary, June 2021 (doi: 10.1088/1757-899X/1218/1/012040).
[23] M. Foti, M. Vavalis, "What blockchain can do for power grids?", Blockchain: Research and Applications, vol. 2, no. 1, pp. 1-14, Mar. 2021 (doi: 10.1016/j.bcra.2021.100008).
[24] M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum, A. Peacock, "Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 100, pp. 143-174, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.rser.2018.10.014).
[25] I. El-Sayed, K. Khan, X. Dominguez, P. Arboleya, "A real pilot-platform implementation for blockchain-based peer-to-peer energy trading", Proceeding of the IEEE/PESGM, pp. 1-5, Montreal, Canada, Aug. 2020 (doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281855).
[26] M. Khorasany, Y. Mishra, G. Ledwich, "Market framework for local energy trading: a review of potential designs and market clearing approaches", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 12, no. 22, pp. 5899-5908, Nov. 2018 (doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5309)
[27] N.A.M. Kajaan, Z. Salam, R.Z.R.M. Radzi, "Review of market clearing method for blockchain-based P2P energy trading in microgrid", Proceeding of the IEEE/CENCON, pp. 202-207, Johor Bahru, Malaysia, Oct. 2021 (doi: 10.1109/CENCON51869.2021.9627254).
[28] S.V. Oprea, A. Bâra, A.L. Andreescu, "Two novel blockchain-based market settlement mechanisms embedded into smart contracts for securely trading renewable energy", IEEE Access, vol. 8, pp. 212548-212556, Nov. 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3040764).
[29] F. Sadeghi, A. Avokh, "Load-balanced data gathering in Internet of Things using an energy-aware cuckoo-search algorithm", International Journal of Communication Systems, vol. 33, no. 9, pp. 1-19, June 2020 (doi: 10.1002/dac.4385).
[30] A. Esmat, M. de Vos, Y. Ghiassi-Farrokhfal, P. Palensky, D. Epema, "A novel decentralized platform for peer-to-peer energy trading market with blockchain technology", Applied Energy, vol. 282, pp. 1-16, Jan. 2021 (doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116123).

[31] S. Wilker, M. Meisel, E. Piatkowska, T. Sauter, O. Jung, "Smart grid reference architecture, an approach on a secure and model-driven implementation", Proceeding of the IEEE/ISIE, pp. 74-79, Cairns, QLD, Australia, June 2018 (doi: 10.1109/ISIE.2018.8433754).
[32] D. Kirli, B. Couraud, V. Robu, M. Salgado-Bravo, S. Norbu, M. Andoni, I. Antonopoulos, M. Negrete-Pincetic, D. Flynn, A. Kiprakis, "Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 158, pp. 1-28, April 2022 (doi: 10.1016/j.rser.2021.112013).
[33] R. Taş, Ö.Ö. Tanrıöver, "Building a decentralized application on the Ethereum blockchain", Proceeding of the ISMSIT, pp. 1-4, Ankara, Turkey, Oct. 2019 (doi: 10.1109/ISMSIT.2019.8932806).
[34] S. Bragagnolo, H. Rocha, M. Denker, S. Ducasse, "SmartInspect: solidity smart contract inspector", Proceeding of the IWBOSE, pp. 9-18, Campobasso, Italy, Mar. 2018 (doi: 10.1109/IWBOSE.2018.8327566).
[35] R.M.A. Latif, K. Hussain, N.Z. Jhanjhi, A. Nayyar, O. Rizwan, "A remix IDE: smart contract-based framework for the healthcare sector by using blockchain technology", Multimedia Tools and Applications, pp. 1-24, Nov. 2020 (doi: 10.1007/s11042-020-10087-1).
[36] H. Hasanshahi, M. Nafar, M. Simab, "Operation of micro-grid for provide clean energy constrained to system optimal reliability", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 50, pp. 141-156, Sept. 2022 (dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.50.9.0).
[37] M.R. Momeni, F. Haghighat, M. Haghighat, "An efficient cloud based architecture to improve smart grid performance", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 10, no. 39, pp. 45-52, Nov. 2019 (dor: 20.1001.1.23223871.1398.10.39.5.3).

زیرنویس‌ها

1. Photovoltaic
2. Combined heat and power
3. Peer-to-peer
4. Consumer-to-business
5. Platform
6. Minimum viable product
7. Unified modeling language
8. Applied programming interf-erence
9. Hyperledger-fabric
10. Corda
11. OpenChain
12. Distributed cloud compu-ting
13. Proof of work
14. Byzantine fault tolerance
15. Proof of stake
16. Delegated proof of stake
17. Proof of elapsed time
8. Miner
19. Litecoin
20. Monero
21. Dash
22. Neo
23. Quantum (QTUM)
24. Self-governance
25. Lisk
26. Bitshares
27. Steem
28. Blockchain-as-a-service
29. Nick Szabo
30. Self-enforce
31. Vending machines
32. Automation
33. Enforceability
34. Type inference
35. Brooklyn microgrid
36. LO3 energy
37. Exergy
38. Permissioned
39. Powerledger
40. Busselton
41. Power ledger token
42. Sparkz
43. Ecochain
44. Ethereum smart bond
45. Escrow
46. Energo
47. Decentralized autonomous energy community
48. WATT
49. TSL
50. Proof of time
51. Raft
52. PROSUME
53. Proprietary
54. SunContract
55. Key2Energy
56. Bittwatt
57. WePower
58. Restart energy
59. Franchise
60. Restart energy democracy platform
61. Watt predict
62. Verv
63. Verv home hub
64. Self-install
65. Verv trading platform
66. VLUX
67. Energy web
68. Decentralized applications
69. Ganache
70. Tobalaba
71. SQLite
72. Light node
73. Full node
74. Memory pool
75. Scrum
76. Nethereum
77. Nethereum.Web3
78. Nethereum.Contract
79. Visual Studio
80. Remix
81. Integrated development en-vironment
82. SetOrder
83. ReceiveDeposit
84. Transfer
85. SellOrders
86. BuyOrders
87. Payable
88. Now
89. Time
90. Wei
91. Deploy and run transaction-s
92. Environment
93. Web3 provider
94. Endpoint
95. Deploy
96. Application binary interf-ace
97. Unit test
98. Integration test
99. System test