7th International Conference on Web Research
May 19-20, 2021; Tehran, IRAN ICWR2021

Ressource Allocation in Edge Computing Using Blockchain Technology

Hasan Aghapour[1], Zahra Movahedi[2,*], Kazim Fouladi-Ghaleh[2]

[1]MSc Student in Information Technology Engineering, Department of Computer Engineering,
Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran
hassan.aghapour@ut.ac.ir

[2]Assistant Professor, Department of Computer Engineering,
Faculty of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran
{zmovahedi, kfouladi}@ut.ac.ir

Abstract

In recent years, with the proliferation of IoT devices, edge computing has gained tremendous attention from academic and industry communities. Edge computing is an extension of cloud computing that allows IoT services to be run close to data sources at the edge of network. This characteristic fulfills the low latency requirements of IoT applications and leads to better use of available computing, storage and network resources. However, there are two main problems in this area: 1) The need for optimal edge resource allocation considering the large amount of data produced by IoT; and 2) The need for security and data integrity considering the data produced by various IoT device sources.

For the first problem, applying load balancers to make the best use of fog resources could be the solution, and for the second problem, blockchain as a basic cryptographic technology is one of the solutions that has been increasingly considered recently. This new paradigm has key points such as security, privacy and scalability. In order to solve the mentioned problems, in this paper, a blockchain-based load balancer is proposed. In the proposed method, blockchain is used to confirm the integrity of data in edge computing and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is used to optimally allocate edge resources.

Keywords: Blockchain, IoT, Edge Computing, Security, Load Balancing, Particle Swarm Optimization.

7th International Conference on Web Research
May 19-20, 2021; Tehran, IRAN ICWR2021

تخصیص منابع در محاسبات لبه ای با استفاده از زنجیره ی بلوکی

حسن آقاپور[۱]، زهرا موحدی [۲,*]، کاظم فولادی قلعه[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات،
گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده‌ی مهندسی، پردیس فارابی، دانشگاه تهران
hassan.aghapour@ut.ac.ir
[۲] استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده‌ی مهندسی، پردیس فارابی، دانشگاه تهران
{zmovahedi, kfouladi}@ut.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، رایانش لبه‌ای مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. رایانش لبه‌ای اجازه می‌دهد تا سرویس‌های اینترنت اشیا به منظور پردازش در نزدیکی منابع داده، اجرا شوند. این امر منجر به پایین آمدن تأخیرهای ارتباطی و استفاده بهتر از منابع رایانشی، ذخیره‌سازی و منابع شبکه‌ای در دسترس، می‌شود. درراینش لبه‌ای دو مشکل اساسی ۱) نیاز به تخصیص بهینه منابع با توجه به داده‌های حجیم تولیدشده توسط اشیاء و کمبود منابع در لبه و ۲) امنیت و جامیعت داده‌ها احساس می‌شود.

برای مشکل اول، نیاز به استفاده از متوازن‌کننده‌های بار جهت استفاده از منابع لبه می‌باشد و برای مشکل دوم، استفاده از زنجیره‌ی بلوکی (بلاک‌چین)، به‌عنوان فناوری اساسی رمزنگاری یکی از راهکارهایی است که استفاده از آن اخیراً رو به افزایش است. این پارادایم جدید، دارای ملاحظاتی کلیدی مانند امنیت، حفظ حریم خصوصی و مقیاس‌پذیری می‌باشد. بر همین اساس، در راستای حل مشکلات ذکرشده، در این مقاله یک راهکار مبتنی بر زنجیره‌ی بلوکی در کنار یک متوازن‌کننده مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه شده است.

کلمات کلیدی

زنجیره‌ی بلوکی (بلاک‌چین)، اینترنت اشیا، محاسبات (رایانش) لبه‌ای، امنیت، توازن‌بار، الگوریتم ازدحام ذرات

۱- مقدمه

اینترنت اشیا[۱] منجر به حضور همیشگیِ دستگاه‌های محاسباتیِ تحت شبکه در مکان‌های عمومی، تجاری و همچنین خانه‌های هوشمند شده است. در واقع اینترنت اشیا حجم غیرقابل تصوری از انواع مختلف داده را ایجاد می‌کند [۱]. این حجم داده برای پردازش به مرکز رایانش ابری فرستاده می‌شود. به‌دلیل اینکه روش پردازشِ متمرکز (ابر) منجر به تأخیرهای ارتباطیِ بالا شده و نرخ انتقال داده‌ها بین دستگاه‌های IoT وکاربران بالقوه را پایین می‌آورد، غیرعملی است [۲]. برای حل این مشکل، اخیراً مفهوم رایانش لبه‌ای پیشنهاد شده است [۳] که اجازه می‌دهد تا سرویس‌های IoT به منظور پردازش داده به جای درگیر شدن در محیط ابری، در نزدیکیِ منابع داده و سینک‌های داده‌ی خودشان پردازش شوند. این منجر به پایین آمدن تأخیرهای ارتباطی و استفاده‌ی بهتر از منابع رایانشی، ذخیره‌سازی و منابع شبکه‌ای می‌شود. همچنین می‌تواند زمان اجرا و میزان مصرف انرژی را کاهش دهد که در واقع برای به‌کارگیری اینترنت اشیا می‌تواند بسیار مفید باشد. نظر به اینکه رایانش لبه‌ای یک موضوع تحقیقاتیِ تازه است، تخصیص بهینه منابع، مجازی‌سازی منابع اینترنت اشیا و توزیع سرویس‌های اینترنت اشیا روی منابع در دسترس به‌طوری‌که حریم خصوصی رعایت شود، از جمله مسائل چالشی در رایانش لبه‌ای می‌باشند [۴]. اما در این میان، تخصیص منبع در رایانش لبه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا به‌طور مستقیم بر روی میزان مصرف انرژی و همچنین کاهش زمان تأخیر در ارایه‌ی خدمات به کاربر می‌شود. یک سیستم تخصیص منبع را می‌توان هر مکانیزمی در نظر گرفت که هدف آن تضمین تأمین نیازمندی‌های برنامه‌های کاربردی باشد. به‌علاوه، مکانیزم تخصیص منابع باید وضعیت جاری هر منبع را در محیط رایانش لبه‌ای

به‌منظور فراهم ساختن الگوریتم‌هایی برای تخصیص بهتر منابع فیزیکی یا مجازی و کاهش هزینه‌های عملیاتی بررسی کند، زیرا امکان دارد در حین فرآیند پردازش تعدادی از سرورها دارای بار زیادی باشند، درحالی‌که بعضی دیگر دارای بار کمتر یا فاقد بار باشند، که در این حالت می‌توان ضمن پخش بار بین سایر گره‌های پردازشی با بار کمتر، زمینه‌سازی توازن‌بار را نیز فراهم کرد. واضح است که به دلیل مقیاس و پیچیدگی این سیستم‌ها انتساب متمرکز کارها به گره مشخصی بدون در نظرگرفتن راهکارهای خاص، در واقع غیرممکن است و همچنین با توجه به رشد روزافزون میزان بار و حجم درخواست‌ها در مراکز داده‌ای پیشرفته و نیاز مبرم جهت دستیابی به کیفیت سرویس مطلوب، نیاز به راهکارهایی جهت افزایش بهره‌وری سرویس‌دهنده‌های موجود در مرکز داده احساس می‌شود. یکی از روش‌های دستیابی به بهره‌وری مطلوب و همچنین کاهش مصرف انرژی، استفاده از راهکارهای توازن بار است. با توازن بار مناسب، درخواست‌ها به‌صورت پویا و متوازن در میان تمامی گره‌ها، با حصول اطمینان از تخصیص عادلانه و کارآمد هر منبع رایانشی، توزیع خواهد شد. این فرایند، منجر به افزایش رضایت‌مندی کاربر و بهره‌برداری بالا از منابع می‌شود که نهایتاً افزایش کارایی را به همراه خواهد داشت. در کنار تخصیص بهینه‌ی منابع و همچنین توازن‌بار، چالش‌های اعتماد و همچنین امنیت به سرویس‌های مبتنی بر رایانش لبه‌ای نیز وجود دارد. بر همین اساس راهکارهای امنیتی متفاوتی برای این منظور پیشنهاد شده است که جدیدترین آنها بهره‌گیری از تکنیک بلاک‌چین (زنجیره‌ی بلوکی) می‌باشد. بلاک‌چین امکان برقراری تبادلات همتا به همتا را بدون نهاد ناظر یا مرکزی مهیا کرده است. در واقع بلاک‌چین یک پایگاه داده‌ی توزیع‌شده است که تمامی سوابق معاملات و رویدادهای دیجیتالی که انجام شده است را در خود ثبت می‌کند و بین طرف‌های شرکت‌کننده به‌اشتراک می‌گذارد [۵]. در بلاک‌چین هر بلاک شامل یک سری داده، کد درهم‌سازی (هش) مربوط به آن بلاک و کد درهم‌سازی مربوط به بلاک قبلی می‌باشد. داده‌هایی که در هر بلاک ذخیره می‌شوند به نوع بلاک‌چین بستگی دارند. هنگامی که یک بلاک به وجود می آید هش آن محاسبه شده و با تغییر در آن بلاک، هش آن نیز تغییر می‌کند. هر یک از هش‌ها مجموعه‌ای از اعداد و حروف هستند که بر اساس اطلاعات ذخیره شده در بلاک‌ها ایجاد می‌شود. عنصر دیگری که در هر بلاک وجود دارد، هش بلاک قبلی است که از عوامل تأثیرگذار در به‌وجود آمدن زنجیره‌ی بلاک‌ها می‌باشد. تغییر در داده‌های بلاک موجب تغییر در هش آن بلاک می‌شود که این امر خود به خود هشی که در بلاک بعدی به عنوان هش بلاک قبلی ذخیره شده است را تغییر می‌دهد و این تغییر، خود را در شبکه نشان می‌دهد و عدم مطابقت این دو هش با یکدیگر مانع از تغییر داده‌های بلاک می‌شود. با تغییر اطلاعات یک بلاک هش آن بلاک نیز تغییر می‌کند و در نتیجه تمام بلاک‌های بعد از آن نامعتبر می‌شوند [۶]. بر همین اساس، در این پژوهش از طریق ترکیب زنجیره بلاک-چین و رایانش لبه‌ای یک راهکار بهینه به منظور افزایش توازن و کارایی و همچنین امنیت در زیرساخت رایانش لبه‌ای ارائه می‌شود. برای این منظور، جهت تخصیص منبع، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و جهت افزایش امنیت از زنجیره‌ی بلوکی در رایانش لبه‌ای استفاده می‌شود.

ادامه‌ی این مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: دربخش دوم، پیشینه‌ی پژوهش مورد بررسی قرار گرفته، بخش سوم راهکار پیشنهادی توضیح داده شده است. پیاده‌سازی و ارزیابی‌ها در بخش چهارم آورده شده است و در بخش پنجم به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، موضوع امنیت و جامعیت داده در مدیریت منابع رایانش لبه ای از طریق بلاک‌چین مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است.

در مقاله [۷]، یک راهکار توزیع شده و سیستم احراز هویت قابل اعتماد بر پایه‌ی بلاک‌چین و رایانش لبه‌ای پیشنهاد شده است. این سیستم از سه لایه‌ی فیزیکی، لبه‌ی بلاک‌چین و همچنین شبکه‌ی بلاک‌چین تشکیل شده است. بر همین اساس الگوریتمی به نام PBFT[۲] ارائه شده و هدف آن ایجاد یک راهکار چندمنظوره به کمک بلاک‌چین جهت ذخیره‌سازی داده‌ها و گزارش احراز هویت است. در [۸] یک راهکار احرازهویت مبتنی بر بلاک‌چین و همچنین مدیریت کلید با استفاده از زیرساخت رایانش لبه‌ای ارائه شده است. در این تحقیق بیان شده است که با توجه به تأخیرات زیادی که در شیوه‌ی عملکرد سنتی رایانش ابری به‌وجود آمده است، نیاز به رایانش لبه‌ای بیش از پیش وجود دارد، اما با وجود رمزنگاری‌های مختلفی که در زیرساخت رایانش - لبه‌ای جهت تأمین امنیت انجام گرفته است مشکلات مربوط به عدم پشتیبانی پروتکل‌های موجود از مدیریت کامل کلید می‌باشد. راهکار پیشنهادی قادر است با بهره‌گیری از زنجیره بلوکی یک پروتکل امنیتی جهت احراز هویت و همچنین مدیریت کلید در رایانش لبه‌ای ارائه دهد. در مقاله [۹] یک چهارچوب مبتنی بر بلاک‌چین به منظور افزایش کیفیت ارایه سرویس در اینترنت اشیا و برقراری توازن بار از طریق بهره‌گیری از رایانش لبه‌ای ارائه شده است. در این کار یک معماری جدید به منظور نظارت و برقراری امنیت سیستم‌های اینترنت اشیا پیشنهاد شده است و این عملیات بر اساس یک نمونه از خانه‌ی هوشمند بیان شده است. بخش کنترل‌کننده‌ی هوشمند وظیفه مدیریت گره‌های IoT و تمامی گره‌های شبکه‌ی بی‌سیم مربوطه را بر عهده دارد. از Raspberry Pi هم به منظور اجرای دستورات هوشمند در زنجیره‌ی اصلی بلاک‌چین استفاده می‌شود. در انتها با ارزیابی‌های انجام گرفته نشان داده شده است که راهکار از طریق برقراری توازن، توانسته است میزان انرژی و دما را در زیرساخت رایانش لبه‌ای کاهش دهد. در [۱۰] از بلاک‌چین به عنوان یک راهکار جهت افزایش امنیت و کارایی در به اشتراک‌گذاری داده در رایانش لبه‌ای و شبکه خودرویی استفاده شده است. در این پژوهش به اهمیت رایانش لبه‌ای به عنوان یک قدرت پردازشی عظیم و همچنین فضای ذخیره-سازی مناسب جهت به‌کارگیری در شبکه‌های خودرویی استفاده شده است. با توجه به آنکه حجم پردازش سیستم‌های خودران پایین می‌باشد در نتیجه می-توان وظایف پردازشی آنها را به رایانش لبه‌ای ارسال کرد، اما با توجه به اعتماد پایین به این نوع راهکار در این پژوهش از بلاک‌چین جهت تأمین امنیت

داده‌ها در طی فرایند ارسال و ذخیره‌سازی آنها در رایانش لبه‌ای استفاده شده است. این راهکار به‌طور مؤثری می‌تواند از دسترسی به داده‌های اشتراکی بدون فرایند احراز هویت جلوگیری کند. در این روش از کنترل‌کنندگان محلی به عنوان واسطه‌هایداده‌ای جهت مدیریت درخواست داده به پایگاه داده محلی استفاده می‌شود. یک انبار داده نیز وظیفه‌ی ذخیره‌سازی داده‌های محلی بارگذاری شده توسط خودروها را برعهده دارد. هر درخواست‌کننده پس از پیداکردن مناسب‌ترین فراهم‌کننده داده، یک درخواست را به نزدیک‌ترین [۳] RSUمربوطه ارسال می‌کند. فراهم‌کننده داده نیز در صورت لزوم در مورد احراز هویت کاربر به کمک بلاک‌چین تصمیم‌گیری می‌کند. در انتها و پس از ارزیابی‌های انجام گرفته این نتیجه حاصل شده که این راهکار قادر است با دقت زیاد و در زمان مناسبی به درخواست‌ها پاسخ دهد. در مقاله [۱۱] به عنوان یک سرویس ذخیره‌سازی برای دفترکل بلاک‌چین[۴] از رایانش لبه‌ای استفاده شده است. دلیل بهره‌گیری از این راهکار در نیاز به فضای ذخیره‌سازی برای بلاک‌چین است که توسط موبایل و یا دستگاه‌های هوشمند پشتیبانی نمی‌شود. بر همین اساس از دستگاه‌های موجود در اینترنت اشیا در جهت استفاده از منابع پردازشی آنها استفاده می‌شود. اما از طرفی با توجه به محدودیت فضای ذخیره‌سازی که این دستگاه‌ها دارند نیاز به یک روش جایگزین جهت ذخیره‌سازی دفترکل است که برای این منظور و جهت جلوگیری از مشکلات محرمانگی داده‌ها از قابلیت رایانش لبه‌ای بعنوان یک راهکار استفاده می‌شود. در انتها این نتیجه حاصل شده که معماری پیشنهادی مبتنی بر راهکار بلاک‌چین و رایانش لبه‌ای در مقایسه با معماری‌های سنتی موجود، به‌خوبی می‌تواند کارایی پردازنده و منابع را افزایش دهد. درمقاله [۱۲] نگرانی اصلی در رایانش لبه را توازن بار بیان کرده است. بار می‌تواند، بار پردازنده، ظرفیت حافظه، تأخیر و یا بار شبکه باشد. پیشنهاد این مقاله یک روش مبتنی بر دو الگوریتم فراکتشافی مبتنی بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها و بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مشکل توازن بار و در نتیجه کاهش زمان پاسخ و هزینه ارتباطی در محیط رایانش لبه است. خلاصه پیشینه تحقیق مطابق جدول (۱) می‌باشد.

با توجه به بررسی‌هایی که در این بخش انجام شد، اهمیت امنیت در فرایند رایانش لبه‌ای کاملاً مشخص است. در اینترنت اشیا ممکن است چالش‌های امنیتی متفاوتی با توجه به معماری ناهمگون آن به‌وجود آید و به‌کارگیری فقط یک راهکار لزوماً نمی‌تواند کلیه‌ی این چالش‌ها را برطرف نماید. بر همین اساس در این پژوهش به یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها که امنیت در فرایند تخلیه‌بار است، پرداخته می‌شود. زیرا در طی فرایند تخلیه‌بار، امکان دارد هم از لحاظ جامعیت و هم از لحاظ محرمانگی داده‌ها مشکلاتی به‌وجود آید؛ در نتیجه رفع آن یک ضرورت خواهد بود. از طریق به‌کارگیری زیرساخت پردازشی رایانش لبه‌ای در کنار زنجیره‌ی بلاک‌چین، می‌توان تا حد زیادی این دسته از مشکلات و چالش‌های امنیتی را مرتفع نمود. همچنین از یک الگوریتم زمانبند PSO استفاده خواهیم کرد تا سرورهایی با بیشترین منابع در درسترس انتخاب شوند که این کار با در نظر گرفتن کاهش مصرف منابع و انرژی، باعث ایجاد توازن می‌شود. بر همین اساس در ادامه راهکار پیشنهادی جهت به‌کارگیری بلاک‌چین و رایانش لبه‌ای به منظور تأمین امنیت در فرایند تخلیه‌بار تشریح شده است.

۳- راهکار پیشنهادی

با توجه به آنکه منابع پردازشی در رایانش لبه‌ای در نزدیکی دستگاه‌های IoT می‌باشد، وظایفی که در دستگاه‌های موبایل دارای پیچیدگی پردازشی باشند به گره‌های موجود در لبه تخلیه‌بار می‌شوند؛ به این‌صورت می‌توان به منابع پردازشی بالا با تأخیر پایین دسترسی پیدا کرد. اما ممکن است در طی فرایند انتقال، ضعف و مشکلات مختلفی مربوط به امنیت و جامعیت داده در اثر نشت و یا نقص عملیات انتقال رخ دهد. در واقع هنگامی که یک وظیفه‌ی پردازشی از طریق به‌کارگیری الگوریتم زمان‌بند به یک ماشین‌مجازی در لبه جهت پردازش، تخلیه‌بار می‌شود،

این ماشین‌مجازی قادر نخواهد بود که کاربرهای عادی موبایل را از حمله‌کننده‌ها تشخیص دهد. در نتیجه ممکن است حریم‌خصوصی نقض و امنیت داده‌های انتقال‌یافته تضمین نشود. در این پژوهش از بلاک‌چین برای رفع این مشکل استفاده می‌شود. در نتیجه پس از تخلیه‌بار، اطلاعات مربوط به مهاجرت، به‌جای یک کنترل‌کننده‌ی مرکزی توسط سایر مراکز پردازشی ارزیابی می‌گردد. اطلاعات هر سرور می‌تواند در قالب یک بلوک، کپسوله شده و از بلاک‌چین به‌منظور رمزنگاری اطلاعات تخلیه‌بار از جمله مقدار هش بلوک قبلی، اطلاعات کاربر، اطلاعات وظیفه و سایر موارد استفاده گردد. سایر ماشین‌ها به‌جز ماشینی که سرویس مورد نظر را برای دستگاه موبایل ارایه داده است، جهت اعتبارسنجی رکورد مربوط به عملیات تخلیه‌بار باهم رقابت خواهند کرد. پس از آنکه اطلاعات مربوط به سرویس توسط تمام ماشین‌ها مورد بررسی قرار گرفت، می‌توان مطمئن شد که امنیت و جامعیت در طی فرایند تخلیه‌بار به‌طور کامل اعمال شده است و در نتیجه عملیات تخلیه‌بار شروع می‌شود.

۳-۱ –معماری پیشنهادی

معماری پیشنهادی در قالب شکل (۱) ارائه شده است. این معماری در سه لایه تدوین شده است. در پایین‌ترین لایه، دستگاه‌های اینترنت اشیا قرار داده شده‌اند که این امکان را می‌دهند که کلیه اشیا با یکدیگر و یا لایه‌ی بالاتر ارتباط برقرار کنند. این لایه با لایه‌ی میان‌افزار در ارتباط است. در لایه‌ی میان‌افزار بخش‌های مربوط به زمان‌بند، مانیتورینگ و بلاک‌چین قرار گرفته است. در این لایه، به‌کمک بخش مانیتورینگ می‌توان اطلاعات لحظه‌ای در مورد سرورهای پردازشی را به‌دست آورد تا در نتیجه، واحد زمان‌بند بتواند از طریق به‌کارگیری آن بهترین زمان‌بندی را برای فرایند تخلیه‌بار انجام دهد. پس از تعیین نحوه‌ی تخلیه‌بار، به کمک واحد بلاک‌چین، کلیه‌ی اطلاعات مربوطه در قالب یک بلوک، ثبت می‌شود تا از طریق آن بتوان فرایند تخلیه‌بار را ردیابی و تایید کرد. هر بلوک شامل تصمیم‌گیری مربوط به تخلیه‌بار، دستگاه اصلی موبایل، داده مربوط به وظیفه و مقدار اثبات کار[۵] می‌باشد. در بالاترین قسمت این معماری، لایه‌ی زیرساخت پردازشی قرار گرفته است. در این لایه منابع.

جدول (۱) خلاصه پیشینه تحقیق

هدف	کارایی				الگوریتم	بلاکچین	رایانش لبه	اینترنت اشیا	کارها
	توازن بار	کاهش مصرف منابع	کاهش مصرف انرژی	امنیت					
امنیت داده و احراز هویت				*	PBFT2	*	*	*	[۷]
مدیریت کلید و احراز هویت				*		*	*	*	[۸]
افزایش کیفت ارایه سرویس درخانه های هوشمند	*		*	*	WSN	*	*	*	[۹]
افزایش امنیت درشبکه خودرهای خودران				*		*	*	*	[۱۰]
ذخیره سازی دفتر کل بلاکچین به به کمک رایانش لبه ای				*		*	*	*	[۱۱]
توازن بار و کاهش زمان پاسخ	*				ACO-PSO		*	*	[۱۲]
تخصیص منابع و افزایش امنیت به کمک بلاکچین	*	*	*	*	PSO	*	*	*	این مقاله

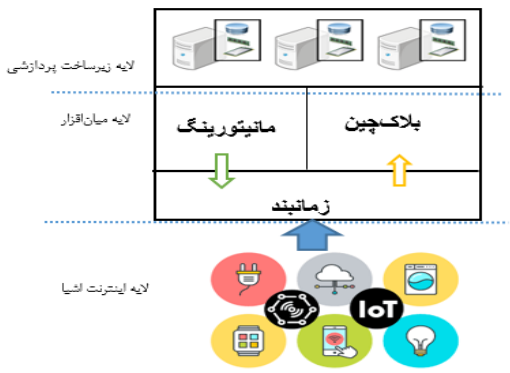
پردازشی پرقدرت و زیرساخت‌های ذخیره‌سازی با ظرفیت بالا در نزدیک لبه‌ی شبکه قرار گرفته است. وظیفه اصلی این بخش اجرای فرایندهای پردازشی مربوط به بلاک‌چین و دستورات تخلیه‌بار شده می‌باشد

۳-۲- فرمول‌بندی مصرف انرژی و وضعیت منابع

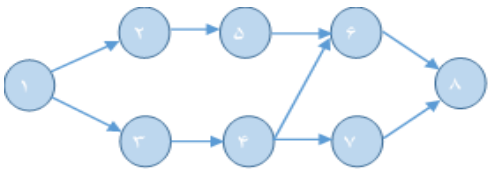
در حالت کلی، جریان کاری یک برنامه که از مجموعه‌ای وظایف تشکیل شده است، به‌صورت یک گراف جهت‌دار بدون دور (DAG[۲]) است. در شکل (۲)، یک نمونه از این جریان کاری مبتنی بر گراف DAG نشان داده شده است.

بر همین اساس در ابتدا یک گراف جهت‌دار بدون دور $G = (T, E)$ درنظرگرفته می‌شود که در آن T بیانگر وظایف (Tasks) که به صورت مجموعه‌ی $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_i, \ldots, t_n\}$ نشان داده می‌شود و E مجموعه‌ای از وابستگی‌ها یا ارتباطات بین مجموعه وظایف می‌باشد. به‌صورت کلی $n \in N$ وظیفه وجود دارد و به‌طور مشخص، هر وظیفه $t_i \in T$ دارای بار پردازشی CW_i خواهد بود. همچنین، هر لبه‌ی جهت‌دار $e_{ij} \in E$ بیانگر آن است که t_j نمی‌تواند قبل از اتمام t_i پردازش شود و هچنین e_{ij} دارای وزن غیرمنفی CV_{ij} مختص به خود است که بیانگر هزینه ارتباطات انتقال داده‌ی t_i به t_j است. وظیفه‌ای مانند t_i که فاقد یال قبلی باشد (ورودی) به‌صورت T_{start} و وظیفه‌ای مانند t_j بدون یال خروجی به‌صورت T_{end} نشان داده می‌شود.

در این مقاله، منابع موجود (حافظه و پردازنده) را به صورت مجموعه R = {r_1, r_2, ..., r_k} نشان می دهیم. میزان مصرف منابع سرور kام (پردازنده و



شکل (۱) معماری راهکار پیشنهادی



شکل(۲) یک نمونه از جریان کاری مبتنی بر گراف

حافظه در ماشین‌های پردازشی موجودر لبه) طبق [۱۳] و به صورت فرمول (۱) مدل می‌شود:

$$W_k = \frac{|{L_k}^p - {L_k}^m|}{{U_k}^p + {U_k}^m} \qquad (۱)$$

L_k^m و L_K^p به‌ترتیب، مقدار پردازنده باقی مانده و مقدار حافظه باقی مانده برای منبع kام است. U_k^m و U_K^p به ترتیب، مقدار پردازنده مصرف شده و مقدار حافظه مصرف شده برای منبع فیزیکی kام است. این پارامترها به دلایل زیر انتخاب و لحاظ شده‌اند:

- تاثیر استفاده از تمامی منابع (پردازنده و حافظه)
- حفظ تعادل هر سرور از نظر مصرف منابع
- توازن بار بر روی شبکه با توجه به میزان مصرف حافظه، پردازنده‌های ماشین‌مجازی، حافظه و پردازنده‌های باقی مانده برای ماشین‌های فیزیکی

به منظور مدل کردن میزان انرژی مصرفی از راهکار ارایه شده در [۱۴] استفاده شده است. این مدل بر این اساس ایجاد شده که بهره‌وری پردازنده در واقع یک رابطه خطی با میزان مصرف انرژی دارد. به‌عبارتی دیگر برای یک وظیفه بخصوص اطلاعات مربوط به زمان پردازش آن و همچنین میزان بهره‌وری پردازنده، جهت محاسبه میزان مصرف انرژی برای آن وظیفه کافی است.

برای منبعی مانند r_K در هر زمان داده شده، میزان بهره‌وری به‌صورت فرمول (۲) تعریف می‌شود:

$$P_k = \sum_{i=1}^{n} w_{i.k} \qquad (۲)$$

که در فرمول (۲)، n تعداد وظایفی است که در آن لحظه در حال اجراست و $w_{i.k}$ میزان منبع استفاده شده توسط وظیفه t_i در منبع k می‌باشد. بر همین اساس میزان مصرف انرژی (E_k) منبع r_k در هر لحظه بصورت فرمول (۳) محاسبه می‌شود:

که در این فرمول p_{max} میزان مصرف انرژی در حداکثر بارکاری می باشد (یعنی در حالت بهره‌وری ۱۰۰درصد) و همچنین p_{min} حداقل میزان مصرف انرژی در حالت فعال بودن سرور مورد نظر می‌باشد.

بر همین اساس و با توجه به مصرف منبع و انرژی تابع هدف مربوط به راهکار می‌تواند بصورت فرمول (۴) بیان شود:

$$f = E_k + W_k \qquad (۴)$$

تابع فوق دو فاکتور اصلی انرژی و منبع را درنظر می‌گیرد که قادر است یک نوع توازن را در انرژی و مصرف منابع بوجود آورد.

۳-۲-۱- فرموله‌سازی مساله زمانبندی به کمک PSO

بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم هوشمند بر اساس ازدحام است که از رفتار اجتماعی حیوانات مانند پرندگان که جهت یافتن منبع غذا تلاش می‌کنند، نشأت گرفته شده است. یک ذره در بهینه‌سازی ازدحام ذرات مشابه یک پرنده در فضای مسئله است. حرکت هر ذره به‌وسیله یک بردار سرعت که دارای اندازه (بُعد) و جهت سرعت است، انجام می‌گیرد. موقعیت ذره در هر نمونه از زمان از بهترین موقعیت و موقعیت بهترین ذره در فضای مسئله تأثیرپذیر است. کارایی هر ذره توسط مقدار شایستگی که مختص مسئله است، اندازه گیری می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مشابه دیگر الگوریتم‌های تکاملی است. در بهینه‌سازی ازدحام ذرات، اندازه‌ی جمعیت برابر با تعداد ذره‌ها در فضای مسئله است. ذرات به صورت تصادفی مقداردهی اولیه می‌شوند. هر ذره یک مقدار سازگاری خواهد داشت و به وسیله تابع سازگاری که بایستی در هر نسل بهینه شود، ارزیابی خواهد شد. به عبارت دیگر، این راهکار معادل حرکت یک پرنده در الگوی حرکت جمعی پرندگان می‌باشد. هر ذره یک مقدار شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می‌شود. هر چه ذره در فضای جستجو به هدف نزدیک‌تر باشد، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد. هر ذره با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای مسئله ادامه می‌دهد؛ به این شکل که گروهی از ذرات در بهینه‌سازی ازدحام در آغاز کار به‌صورت تصادفی به‌وجود می‌آیند و با به‌روز کردن نسل‌ها سعی در یافتن راه حل بهینه می‌نمایند. در واقع، هر ذره بهترین مکان (p_{best}) و بهترین موقعیت تا کنون خود را از بین گروه کاملی از ذرات g_{best} پیدا می‌کند. p_{best} هر ذره بهترین نتیجه‌ی تاکنون به‌دست آمده به‌وسیله ذره است، در حالیکه g_{best} بهترین ذره به‌نسبت معیار سازگاری در کل جمعیت می‌باشد. در هر نسل سرعت و موقعیت ذرات به ترتیب توسط فرمول‌های (۵) و (۶) به‌روزرسانی خواهد شد. سرعت و موقعیت اولیه در واقع پارامترهای ورودی می‌باشند.

$$E_k = (P_{max} - P_{min}) \times P_k + P_{min} \qquad (۳)$$

$$v[\ ] = v[\ ] + c1 * rand() * (p_{best}[\ ] - position\ [\ ]) + 2 * rand() * (g_{best}[\ ] - position[\ ]) \qquad (۵)$$

$$position[\ ] = position[\ ] + v[\ ] \qquad (۶)$$

برای نمایش ذرات فرض می‌شود که یک جمعیت دارای N ذره و یک فضای جستجوی D–بعدی باشد. برای هر ذره P_i $(i = 1.2. \ldots . N)$ دو پارامتر اصلی X_i و V_i درنظر گرفته می‌شود که X بیانگر موقعیت و V سرعت آن ذره می‌باشد. در این حالت، هر گره وظیفه در گراف DAG بیانگر یک بعد از یک ذره می‌باشد. به عبارت دیگر، ابعاد یک ذره برابر با تعداد وظایف در یک جریان کاری خواهد بود. جواب بهینه برای هر بعد از ذره بیانگر یک نگاشت بین وظیفه و گره پردازشی است. به عنوان مثال، با توجه به شکل (۲)، گراف DAG مربوط به جریان کاری برنامه، دارای ۸ وظیفه می‌باشد. بر همین اساس ابعاد ذره متناظر با آن نیز برابر با ۸ خواهد بود. جدول (۲) بیانگر یک

نمونه از ذرات متناظر با شکل (۲) است. مقادیر این ذره در هر بعد بیانگر شناسه سرور لبه‌ای است که وظیفه مورد نظر به آن تخصیص داده می‌شود. بر همین اساس کدگذاری موقعیت هر ذره نیز می‌تواند به‌صورت جدول (۳) باشد.

گام‌های الگوریتم تغییریافته PSO در قالب الگوریتم (۱) لیست شده است.

در این حالت ورودی‌های الگوریتم عبارت از تعداد وظایف (T_n)، حداکثر تکرار (T_{max})، اندازه جمعیت ذرات (num) و مجموعه‌ای از سرورهای موجود در رایانش لبه‌ای (S) می‌باشد. خروجی آن نیز یک زمان‌بندی بهینه وظایف در سرور لبه می باشد (S_{best}). این الگوریتم با مقداردهی اولیه مکان و سرعت ذره آغاز به کار می‌کند. در این مسئله ذرات وظایفی هستند که واگذار می‌شوند و اندازه (بُعد) ذرات، تعداد وظایف موجود هستند. مقدار تخصیص داده شده به هر بُعد از ذرات شاخص‌های منابع پردازشی به‌شمار می‌آیند. به این ترتیب هر ذره، نگاشت یک منبع به یک وظیفه را نشان می‌دهد.

۳-۳-تضمین جامعیت و امنیت به کمک بلاک‌چین

در راهکار پیشنهادی هنگامی‌که استراتژی تخلیه‌بار به پایان رسید (نحوه تخلیه‌بار و سرور کاندیدا تعیین گردید) سایر ماشین‌های موجود در لبه که به‌عنوان استخراج‌کننده[۷] عمل می‌کنند برای ثبت‌کردن استراتژی تخلیه‌بار باهم رقابت می‌کنند. در واقع، هنگامی که یک وظیفه پردازشی به یک ماشین - مجازی در لبه جهت پردازش، تخلیه‌بار می‌شود، این ماشین قادر نخواهد بود که کاربرهای عادی موبایل را از حمله‌کننده‌ها تشخیص دهد. بر همین اساس حریم‌خصوصی کابران می‌تواند نقض نشود و امنیت داده انتقال‌یافته تضمین

جدول (۲) نگاشت بین وظایف و سرورها

وظیفه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
سرور	۴	۲	۳	۱	۲	۱	۴	۲

جدول (۳) کدگذاری مربوط به موقعیت هر ذره

سرور	۴	۲	۳	۱	۲	۱	۴	۲

1. Calculate average resource wastage cost using equation 3-2
2. Compute PSO($\{t_i\}$)
3. **For all** "ready" tasks $\{t_i\} \in T$ do
4. Select tasks$\{t_i\}$ for resources $\{p_j\}$ according to the solution provided by PSO
5. **End for**
6. Dispatch all the mapped tasks
7. Wait for polling time
8. Update the ready task list
9. Update the average resource wastage
10. Start blockchain for offload confirmation

الگوریتم (۱): الگوریتم پیشنهادی جهت تخصیص منابع

شود. در نتیجه، پس از تعیین نحوه‌ی تخلیه‌بار (از طریق به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات)، کلیه اطلاعات مربوطه در قالب یک بلوک، ثبت می‌شود تا از طریق آن بتوان فرایند تخلیه‌بار را ردیابی و تأیید کرد. هر بلوک شامل تصمیم‌گیری مربوط به تخلیه‌بار، دستگاه اصلی موبایل، داده مربوط به وظیفه و مقدار اثبات کار (PoW[۸]) می‌باشد. استخراج‌کنندگان با استفاده از PoW با یکدیگر بر سر تکمیل تراکنش‌های شبکه و گرفتن پاداش رقابت می‌کنند. اولین ماشین که بتواند مقدار PoW را محاسبه کند این حق را دارد که اطلاعات تخلیه‌بار را ثبت کند. در ادامه این سرور اطلاعات مربوط به بلوک تخلیه‌بار را به منظور بررسی برای سایر سرورها ارسال سراسری[۹] می‌کند. فقط هنگامی‌که اطلاعات بلوک توسط سایر استخراج‌کننده‌ها تأیید شود، این بلوک به زنجیره‌ی بلاک‌چین جاری اضافه خواهد شد و در نتیجه فرایند مهاجرت به سرور مورد نظر انجام می‌گیرد. بر همین اساس در صورتی‌که بلاک‌چین توسط کلیه سرورها نگه داشته شود هر بلوک اطلاعاتی باید به اجماع حداکثر سرورها دست پیدا کند، در غیر این‌صورت اجرا نخواهد شد. به‌عنوان مثال، در شکل (۲) به‌کمک استراتژی زمانبندی؛ تعیین شده است که وظیفه T_1 باید به سرور S_1 تخلیه‌بار شود. سایر سرورها به منظور ذخیره‌سازی اطلاعات تخلیه‌بار باهم رقابت می‌کنند.در این حالت سرور S_2 به این حق دست می‌یابد که بتواند اطلاعات مهاجرت را ثبت کند. در نتیجه S_2 یک پیام سراسری برای تأیید اطلاعات ارسال می‌کند. اگر سایر سرورها به یک اجماع بر روی اطلاعات تخلیه‌بار دست پیدا کنند، این اطلاعات در قالب یک بلوک ثبت و به بلاک‌چین جاری اضافه می‌شود. همچنین قبل از آنکه یک وظیفه مهاجرت داده شود اطلاعات مربوط به وابستگی‌های بلوک، بررسی می‌شود تا از این طریق بتوان در مورد فرایند انتقال داده اطمینان حاصل نمود. در نتیجه اگر داده‌های منتقل شده تغییر یا دزدیده شود، اطلاعات مربوط به استراتژی زمانبندی ذخیره شده در بلاک‌چین جاری و اطلاعات انتقال داده شده؛ با هم در تضاد خواهند بود و بر همین اساس به دلیل عدم برآورده شدن شرط جامعیت داده، عملیات مهاجرت لغو می‌شود. در واقع به‌کارگیری اطلاعات مربوط به بلوک این کمک را می‌کند که جامعیت داده همواره در طی فرایند تخلیه‌بار تضمین شود. در شکل ۲ نحوه‌ی ایجاد و اضافه شدن بلوک جدید به مجموعه موجود، نشان داده شده است.

٤- پیاده‌سازی و ارزیابی

در این بخش راهکار پیشنهادی در محیط شبیه‌ساز ifogsim پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا در مقایسه با سایر راهکارهای متداول بتوان میزان تأثیر روش پیشنهادی در پارامترهای کیفیت سرویس را مورد بررسی قرار داد. همچنین لازم به ذکر است که کلیه عملیات مربوط به تولید بار کاری و همچنین صف‌بندی آنها در لیست وظایف آماده یا ناتمام، انتشار پیام‌ها، صف-بندی[۱۰]، تنگناها[۱۱]، ویژگی‌های لینک‌های ارتباطی، اعمال پروتکل TCP/IP، سوئیچ کردن و انتقال بسته‌ها و همچنین مسیریابی درخواست‌ها؛ توسط

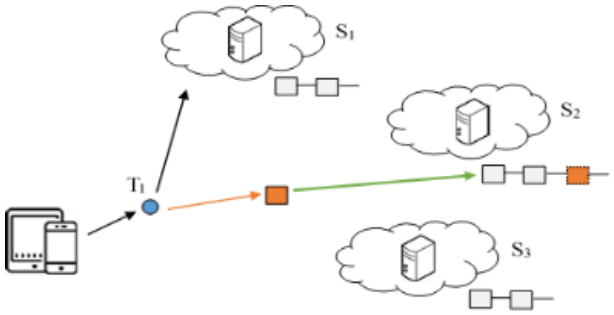
زیرساخت ifogsim شبیه‌سازی و انجام می‌گیرد. پارامترهای مورد ارزیابی در این شبیه‌سازی، شامل موارد زیر است:

- میزان استفاده از منابع : مقدار منابع مصرفی سرورهای فاگ (حافظه و پردازنده) در زمان تخصیص منابع به آن‌ها با توجه به فرمول (۱).
- میزان مصرف انرژی: انرژی مصرفی سرورهای فاگ (حافظه و پردازنده) در حالت‌های مختلف بهره‌وری در زمان تخصیص منابع به آن‌ها با توجه به فرمول (۳).

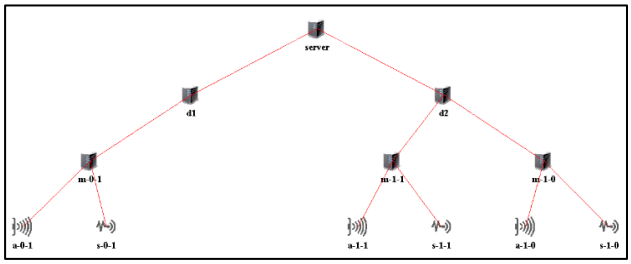
بهینه‌سازی ازدحام ذرات در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین در جدول (۵) پارامترهای مربوط به دستگاه‌های لبه شبکه نیز نشان داده شده است.

جهت ارزیابی راهکار پیشنهادی (ProposedMethod) با راهکار FogBus [۱۶] که در دو حالت یکپارچه شده با ابر (integrated) و فقط مه (fog) پیاده‌سازی شده است، مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. توپولوژی مورد نظر جهت شبیه‌سازی و ارزیابی راهکار به‌صورت شکل (۳) می‌باشد.

در ادامه و در شکل (۴) راهکارها با توجه به میزان انرژی مصرفی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همانطورکه ملاحظه می‌شود، راهکار پیشنهادی به نسبت راهکار دیگر انرژی کمتری را مصرف کرده است. در واقع با توجه به آنکه روش پیشنهادی سرورهای کمتری را درگیر کرده است و همچنین توازن را به‌صورت بهینه از طریق به‌کارگیری زمان‌بند در زیرساخت لبه برقرار کرده است، در نتیجه انرژی مصرفی نهایی نیز در راهکار پایین‌تر آمده است. در



شکل (۲) نحوه ایجاد یک بلوک در راهکار



شکل (۳) توپولوژی مورد استفاده جهت ارزیابی

واقع، بررسی‌کننده‌ی منبع این امکان را می‌دهد که عملیات زمانبندی با توجه به وضعیت منابع انجام گیرد و در نتیجه از ایجاد ازدحام در طی فرایند تخلیه‌بار جلوگیری به‌عمل آید. کاهش ازدحام و درنتیجه ایجاد توازن بهینه، زمینه‌ساز این میزان از کاهش میزان مصرف انرژی بوده است.

همان‌طورکه در شکل (۴) نیز ملاحظه می‌شود راهکار پیشنهادی به شکل مؤثری بهتر از دو راهکار دیگر در میزان انرژی مصرفی عمل کرده است. این میزان از بهینگی جهت بکارگیری بلاک‌چین در رایانش لبه، می‌تواند از جنبه اقتصادی نیز بسیار مفید باشد. زیرا علاوه بر عملکرد مناسب در کاهش میزان مصرف منابع، میزان انرژی مصرفی نیز به شکل قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

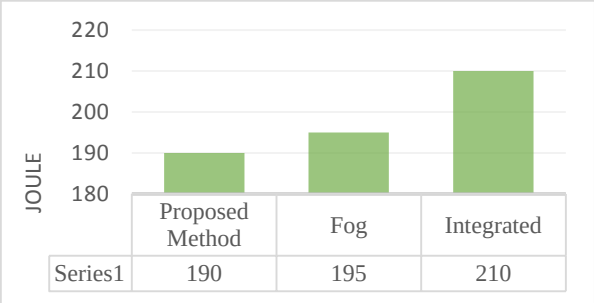
در ادامه و در شکل (۵) میزان استفاده راهکارها از منابع شبکه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نیاز بالای بلاک‌چین به منابع زیاد شبکه، هدف

جدول (٤) پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

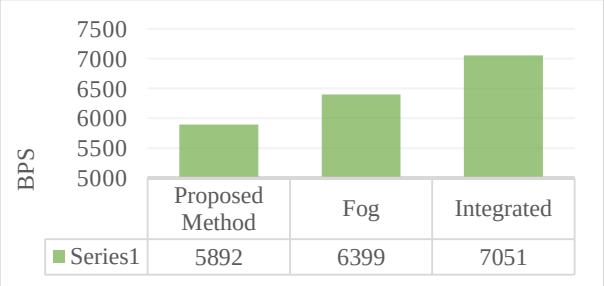
تعداد تکرار	۲۰۰
تعداد ذرات	۵۰
سرعت اولیه ذره	۰/۲

جدول (٥) پارامترهای مربوط به دستگاه‌های لبه شبکه

تعداد دستگاه (End Device)	۲۰
انرژی مصرفی در حالت مشغول‌بودن	۱۰۳
انرژی مصرفی در حالت بیکاری	۸۳
پهنای باند دانلود	۱۰۰۰۰
پهنای باند آپلود	۱۰۰



شکل (٤) مقایسه انرژی مصرفی در راهکارهای مورد ارزیابی



شکل (٥) میزان استفاده از منابع شبکه در راهکارهای مورد ارزیابی

از این ارزیابی بررسی میزان تأثیری است که پردازش بلاک‌چین بر روی شبکه دارد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود در این حالت نیز روش پیشنهادی به نسبت دو راهکار دیگر منابع کمتری از شبکه را مصرف کرده است. در واقع بهره-گیری از الگوریتم PSO در کنار رایانش لبه، توانسته است در این میزان از کاهش مصرف منابع مؤثر باشد؛ زیرا به کمک الگوریتم PSO و بررسی وضعیت منابع در دسترس، این امکان فراهم می‌شود که بتوان برای اجرای وظایف بهترین سرورهای در دسترس انتخاب شود که نتیجه آن کاهش تأخیر و مصرف بهینه‌ی منابع می‌باشد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به موضوع امنیت در زمانبندی و تخصیص منابع در لبه، روشی مبتنی بر تکنولوژی بلاک چین ارائه شده است تا جامعیت و امنیت داده ها حفظ شود. با بررسی نتایج حاصل از ارزیابی، این نتیجه حاصل می‌شود که راهکار پیشنهادی از نظر پارامترهای مورد بررسی از جمله انرژی مصرفی و مصرف بهینه منبع به نسبت دو روش دیگر، بهتر عمل کرده است که این امر به دلیل به‌کارگیری راهکار الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و همچنین بخش مانیتورینگ منبع می‌باشد که در طی عملیات تخلیه‌بار، وضعیت منابع بررسی و عملیات تخلیه‌بار در سرورهای با میزان منبع کافی انجام می‌شود. این امر موجب شده تا بتوان میزان تأثیر منفی به‌کارگیری بلاک‌چین را نیز تا حد زیادی کاهش داد. در ارزیابی‌ها نیز این نتیجه به‌دست آمده است که به‌کارگیری راهکار پیشنهادی در مقایسه با راهکارهای مبتنی بر FogBus میزان منابع کمتری از شبکه را مصرف کرده است.

در کارهای آتی می‌توان بر روی ارائه‌ی یک معماری ابری توزیع شده مبتنی بر بلاک‌چین و معماری توزیع شده امن گره مهی تمرکزکرد.

منابع

[1] Mahdavinejad, M. S., Rezvan, M., Barekatain, M., Adibi, P., Barnaghi, P., & Sheth, A. P. (2018). Machine learning for Internet of Things data analysis: A survey. Digital Communications and Networks, 4(3), 161-175.

[2] Ahlgren, B., Hidell, M., & Ngai, E. C. H. (2016). Internet of things for smart cities: Interoperability and open data. IEEE Internet Computing, 20(6), 52-56.

[3] Mao, Y., You, C., Zhang, J., Huang, K., & Letaief, K. B. (2017). A survey on mobile edge computing: The communication perspective. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(4), 2322-2358.

[4] Xiao, Y., Jia, Y., Liu, C., Cheng, X., Yu, J., & Lv, W. (2019). Edge Computing Security: State of the Art and Challenges. Proceedings of the IEEE, 107(8), 1608-1631.

[5] Xiong, Z., Zhang, Y., Niyato, D., Wang, P., & Han, Z. (2018). When mobile blockchain meets edge computing. IEEE Communications Magazine, 56(8), 33-39.

[6] Nofer, M., Gomber, P., Hinz, O., & Schiereck, D. (2017). Blockchain. Business & Information Systems Engineering, 59(3), 183-187.

[7] Guo, S., Hu, X., Guo, S., Qiu, X., & Qi, F. (2019). Blockchain meets edge computing: A distributed and trusted authentication system. IEEE Transactions on Industrial Informatics.

[8] Wang, J., Wu, L., Choo, K. K. R., & He, D. (2019). Blockchain based anonymous authentication with key management for smart grid edge computing infrastructure. IEEE Transactions on Industrial Informatics.

[9] Casado-Vara, R., de la Prieta, F., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2018, November). Blockchain framework for IoT data quality via edge computing. In Proceedings of the 1st Workshop on Blockchain-enabled Networked Sensor Systems (pp. 19-24). ACM.

[10] Kang, J., Yu, R., Huang, X., Wu, M., Maharjan, S., Xie, S., & Zhang, Y. (2018). Blockchain for secure and efficient data sharing in vehicular edge computing and networks. IEEE Internet of Things Journal.

[11] Damianou, A., Angelopoulos, C. M., & Katos, V. (2019, May). An Architecture for Blockchain over Edge-enabled IoT for Smart Circular Cities. In 2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS) (pp. 465-472). IEEE.

[12] Hussein, M. K., & Mousa, M. H. (2020). Efficient Task Offloading for IoT-Based Applications in Fog Computing Using Ant Colony Optimization. IEEE Access, 8, 37191-37201.

[13] GAO, Y., Guan, H., Qi, Z., Hou, Y., & Liu, L. (2013). A multi-objective ant colony system algorithm for virtual machine placement in cloud computing. Journal of computer and system sciences, 79(8), 1230-1242

[14] Yamini, R. (2012). Energy aware green task assignment algorithm in clouds. Ianternational Journal for Research in Science and Advance Technology, 1(1), 23-29.

[15] Gupta, H., Vahid Dastjerdi, A., Ghosh, S. K., & Buyya, R. (2017). IFogSim: A toolkit for modeling and simulation of resource management techniques in the Internet of Things, Edge and Fog computing environments. Software: Practice and Experience, 47(9), 1275-1296.

[16] Tuli, S., Mahmud, R., Tuli, S., & Buyya, R. (2019). Fogbus: A blockchain-based lightweight framework for edge and fog computing. Journal of Systems and Software, 154, 22-36.

زیرنویس

[1] Internet of Things (IoT)
[2] Practical Byzantine fault tolerance
[3] Roadside Units
[4] Blockchain ledger
[5] Proof of Work
[6] Directed Acyclic Graph (DAG)
[7] Miner
[8] Proof of Work
[9] Broadcast
[10] Queuing
[11] Bottlenecks