فصلنامه
سیاست‌نامهٔ علم و فناوری
دوره ۱۰ شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۹

امن‌سازی رایانش مرزی از طریق زنجیرهٔ بلوکی

سعید کاظم پوریان[۱]
محمد شهبازی[۱]
محمدرضا تقوا[۲]

چکیده

فناوری‌های دفتر کل توزیع‌شده اخیراً توجه بسیاری را به خود جلب کرده است و زنجیرهٔ بلوکی، به‌منزلهٔ فناوری زیربنایی رمزارزها، کانون این توجهات است. از زنجیرهٔ بلوکی در حوزه‌های گوناگونی استفاده شده است، ازجمله رایانش ابری، رایانش مهواره‌ای، رایانش مرزی و اینترنت اشیا (IoT). بااین‌حال، این فناوری با محدودیت‌هایی مواجه است و قابلیت پشتیبانی از تراکنش‌های مکرر را ندارد. از سوی دیگر، پس از رایانش ابری و رایانش مهواره‌ای، رایانش مرزی نیز به‌منزلهٔ توانمندساز کلیدی برای بسیاری از فناوری‌های آتی مانند 5G، اینترنت اشیا و ارتباطات وسائط نقلیه با یکدیگر از راه اتصال منابع و همچنین خدمات رایانش ابری به کاربران نهایی ایفای نقش می‌کند و این منابع و خدمات را تا مرز شبکه گسترش می‌دهد. اما این فناوری اکنون با چالش‌هایی در حوزهٔ مدیریت نامتمرکز و امنیت روبه‌روست. ترکیب زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی در قالب یک سیستم دسترسی و کنترل مطمئن شبکه، ذخیره‌سازی و محاسبات توزیع‌شده در مرزهای شبکه و درنتیجه، مقیاس بزرگی از سرورهای شبکه، فضای ذخیره‌سازی داده‌ها و محاسبهٔ اعتبار را در نزدیکی مرز شبکه و از راهی امن فراهم می‌آورد. با وجود مزایای سیستم‌های حاصل از یک‌پارچه‌سازی زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی، پیش از پیاده‌سازی گسترده باید ارتقای مقیاس‌پذیری، خودسازمان‌دهی، مدیریت منابع، یک‌پارچگی کارکردها و مسائل امنیتی آن‌ها مدنظر قرار گیرد. در این مقاله، برخی از پژوهش‌های صورت‌گرفته در حوزهٔ سیستم یک‌پارچه متشکل از زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی بررسی می‌شود. همچنین، برخی جنبه‌های حیاتی یک‌پارچه‌سازی زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی شناسایی می‌شود. درنهایت، تأثیرات این یک‌پارچه‌سازی در کسب‌وکار بررسی خواهد شد.

واژگان کلیدی: رایانش مرزی، زنجیرهٔ بلوکی، رایانش مهواره‌ای، اینترنت اشیا، امنیت داده‌ها

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳

۱. دانشجوی دکتری مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی (نویسندهٔ مسئول)؛ Saeed.kazem.313@gmail.com
۲. دانشیار دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی

مقدمه

زنجیرهٔ بلوکی[1] که به‌منزلهٔ فناوری زیربنایی رمزارز[2] دیجیتال ظهور کرد، اخیراً توجه بسیاری را به خود جلب کرده است (Tomaso et al., 2017). بنابر گزارش شرکت هوش بازار تراکتیکا[3] درآمد سالانهٔ استفادهٔ بنگاه‌ها از زنجیرهٔ بلوکی تا سال ۲۰۲۵، به ۱۹/۹میلیارد دلار خواهد رسید و بازار از ۲۹ مورد استفادهٔ کلیدی تشکیل خواهد شد که دست‌کم در ۱۹ بخش صنعتی گوناگون تأثیر خواهند گذاشت (Yang et al., 2019).

زنجیرهٔ بلوکی، با رویکردی متفاوت با دفتر کل[4] دیجیتال متمرکز، از اعتبارسنجی انجمنی جهت همگام‌سازی دفاتر کل توزیع‌شده نزد چندین کاربر بهره می‌گیرد. برخورد با مشکل هزینه‌های دوگانه[5] اولین‌بار با بیت‌کوین[6] مطرح شد (Florian and Bjorn, 2016). زنجیرهٔ بلوکی، فراتر از طراحی و کاربرد اصیل خود، به فناوری بنیادینی تبدیل شده است که باعث تغییر پارادایم از کنترل متمرکز به کنترل نامتمرکز می‌شود. از منظر فناوری اطلاعات و ارتباطات، مالکیت دارایی‌ها و حقوق تکالیف ناشی از توافقنامه‌ها روی یک زنجیرهٔ بلوکی (به علت فقدان تمرکز، شفافیت، امنیت، تغییرناپذیری و خودکاربودن آن) ثبت می‌شوند، اما همچنان نقصی اساسی مانع تحقق این کاربردها می‌شود و آن مقیاس‌پذیری است. درحال حاضر، زنجیرهٔ بلوکی مقیاس‌پذیری محدودی دارد (Vukolic, 2015).

از سوی دیگر، پیشرفت سریع در فناوری‌های رایانشی، طیف گسترده‌ای از موارد کاربردی را ممکن ساخته است. رایانش مرزی[7] درحکم فناوریِ بسط‌یافته از ابر در این حوزه معرفی شده است (Satyanarayanan, 2017). الگوی رایانش مرزی امکان پردازش سریع، تأخیر کمتر در زمان پاسخ برنامهٔ کاربردی، توزیع جغرافیایی، سیاربودن، نزدیکی، ناهمگونی،[8] آگاهی از زمینه[9] و آگاهی از مکان را فراهم می‌سازد. این الگو نیازهای دیجیتالی کردن صنعت در ارتباط چابک، خدمات بلادرنگ، بهینه‌سازی داده‌ها و هوش کاربردی را نیز برآورده می‌کند (Novo, 2018). این ویژگی‌ها رایانش مرزی را برای کاربردهای گوناگون در آینده مناسب می‌سازند؛ کاربردهایی مانند خودکارسازی صنعتی، واقعیت مجازی، پایش بلادرنگ ترافیک، خانهٔ هوشمند، پایش هوشمند دریا و تحلیل داده‌ها. این کاربردها در شکل ۱ نشان داده شده است.

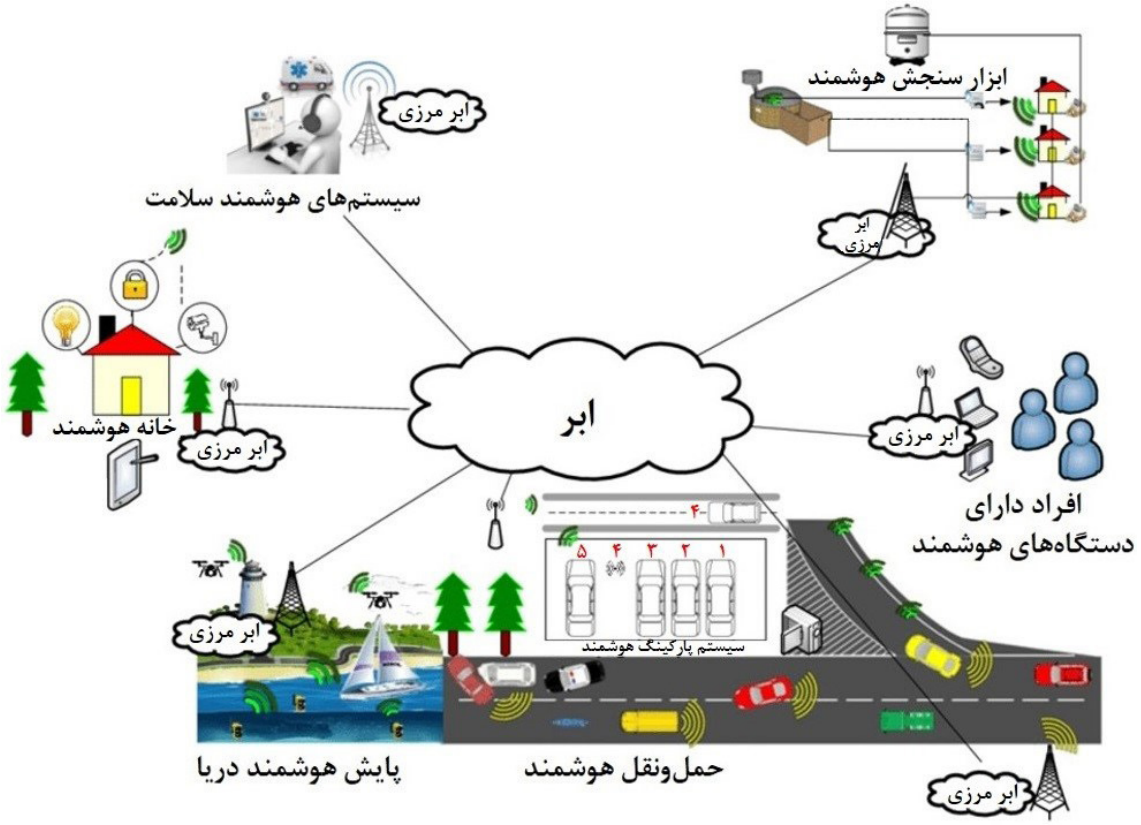
دستگاه‌های مرزی مانند مسیریاب‌ها، نقاط دسترسی[10] و ایستگاه‌های پایه،[11] میزبانی خدمات گوناگونی مانند QoS[12] و VPN[13] و VoIP[14] را برعهده دارند (Zhang et al., 2019). این دستگاه‌های مرزی به‌منزلهٔ پلی عمل می‌کنند که ارتباط میان دستگاه‌های سیار هوشمند را با ابر برقرار می‌کنند. برخی پژوهش‌ها جنبه‌های متعدد رایانش مرزی مانند رایانش مهواره‌ای[15] را بررسی کرده‌اند (Yi et al., 2015; Vaquero and Rodero-Merino, 2014; Stojmenovic and Wen, 2014; Bonomi et al., 2012; Ahmed et al., 2017a)، درحالی‌که پژوهش چندانی در حوزهٔ رایانش مرزی انجام نشده است.

اگرچه رایانش مرزی با فراهم‌ساختن مزایای فوق، سیستم‌های رایانش ابری را متحول کرده است، اما این موضوع چالش‌های گوناگونی را نیز به همراه داشته است (Kahn et al., 2019). امنیت و حریم خصوصی در رایانش مرزی چالش‌های مهمی هستند، زیرا گره‌های[16] مرزی متفاوت و ناهمگونی در آن شرکت دارند و مهاجرت خدمات در سرتاسر گره‌های مرزی انجام می‌شود (Yu et al., 2017).

بنابراین یک‌پارچه‌سازی زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی در قالب یک سیستم کانون توجهات قرار می‌گیرد. با ترکیب زنجیرهٔ بلوکی و شبکهٔ رایانش مرزی، سیستم حاصل‌شده امکان دسترسی و کنترل مطمئن شبکه و ذخیره‌سازی و محاسبات بر روی تعداد زیادی از گروه‌های مرزی توزیع‌شده را فراهم می‌آورد؛ درنتیجه امنیت شبکه، یک‌پارچگی داده‌ها و اعتبار محاسبات سیستم بهبود چشمگیری می‌یابد. همچنین به‌کارگیری رایانش مرزی منابع محاسباتی و ذخیره‌سازی بسیاری را به‌صورت توزیع‌شده در مرز شبکه فراهم می‌کند و بار ذخیره‌سازی در زنجیرهٔ بلوکی و محاسبات کاوشی را در دستگاه‌هایی که قدرت محدود دارند کاهش می‌دهد. افزون بر این، ذخیره‌سازی و محاسبهٔ خارج از زنجیره[17] در دستگاه‌های مرزی ذخیره‌سازی و محاسبهٔ مقیاس‌پذیر بر روی زنجیرهٔ بلوکی را ممکن می‌کند (Liu et al., 2017).

تحقیقات متعددی در حوزهٔ ترکیب رایانش مرزی با زنجیرهٔ

1. Blockchain
2. Cryptocurrency
3. Tractica
4. Ledger
5. Double-spending
6. Bitcoin
7. Edge Computing
8. Heterogeneity
9. Context-Awareness
10. Access Point
11. Base Station
12. Quality of Service
13. Virtual Private Network
14. Voice over IP
15. Fog Computing
16. Node
17. Off-Chain



شکل ۱: کاربردهای رایانش مرزی (Khan et al., 2019)

بلوکی انجام شده و چارچوب‌های متفاوتی برای این کار ارائه شده است که بسیاری از آن‌ها در این پژوهش لحاظ شده‌اند. با وجود این، تاکنون مطالعه‌ای مروری بر این تحقیقات صورت نگرفته است. در این پژوهش، علاوه‌بر معرفی و شرح فناوری‌های زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی، چارچوب‌های مطرح‌شده در این حوزه معرفی می‌شود و روش‌ها و مزایا از نظر کاربرد با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۱. زنجیرهٔ بلوکی

زنجیرهٔ بلوکی دفتر کل دیجیتال و نامتمرکزی در شبکهٔ نقطه‌به‌نقطه (P2P) است و هر شرکت نسخه‌ای از دفتر کلِ صرفاً افزودنیِ تراکنش‌های امضاشده و رمزشدهٔ دیجیتالی را نگه‌داری می‌کند. اگرچه زنجیرهٔ بلوکی از فناوری‌های ابتدایی نشئت گرفته، محبوبیت بسیاری را از راه بیت‌کوین به‌دست آورده است. بیت‌کوین سیستم پرداخت الکترونیکی است که آغاز به کار آن به سال ۲۰۰۸ بازمی‌گردد (Nakamoto, 2008). همان‌طور که درک افراد از زنجیرهٔ بلوکی به‌تدریج عمیق‌تر می‌شود، قلمرو و کاربردهای این فناوری نیز گسترش می‌یابد.

۱ـ۱. لایه‌های زنجیرهٔ بلوکی

برای داشتن درکی بهتر و شفاف‌تر از این‌که در حوزه‌های فنی و عملکردی چه بهبودهایی حاصل شده است، براساس مطالعات گوناگون (Croman et al., 2016; Yu et al., 2018; 2019)، ساختاری از سیستم زنجیرهٔ بلوکی در لایه‌های جداگانه معرفی شده است که از پایین به بالا، لایه‌های داده‌ها، شبکه، اجماع،[1] توپولوژی دفتر کل، مشوق،[2] قرارداد و کاربرد را دربر می‌گیرد (شکل ۲).

لایهٔ داده‌ها، داده‌هایی را که برنامه‌های گوناگون تولید کرده‌اند از راه تراکنش‌ها و بلوک‌ها بسته‌بندی می‌کند. تراکنش‌های میان دو طرف بررسی و تأیید می‌شوند و در قالب یک بسته با سرآیندی[3] متصل به بلوک قبلی قرار می‌گیرند که به فهرست مرتبی از بلوک‌ها منجر می‌شوند. سرآیند بلوک فراداده‌ها را مشخص می‌کند که دربرگیرندهٔ این بخش‌هاست: هش بلوک قبلی، هش بلوک فعلی، برچسب زمان ساخته‌شدن بلوک، مقدار تصادفی[4] مرتبط با رقابت

1. Consensus
2. Incentive
3. Header
4. Nonce

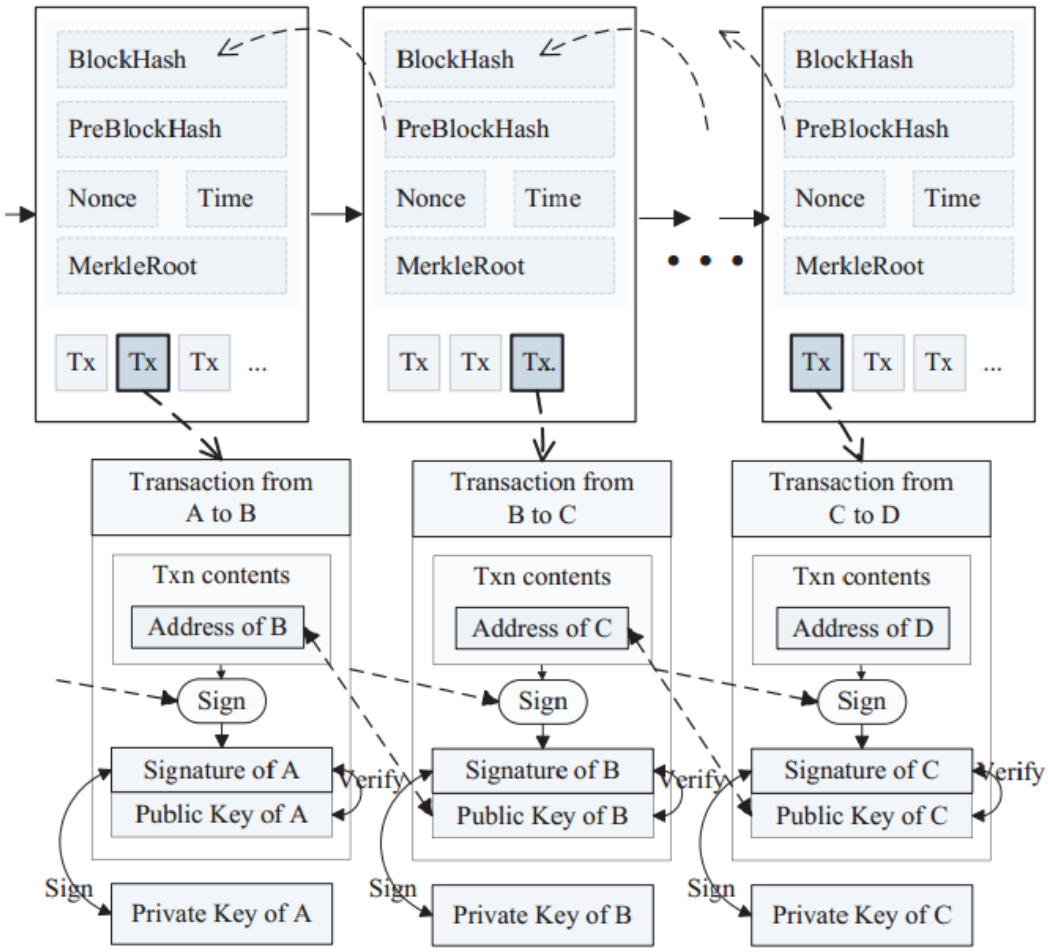
شکل ۲: لایه‌های زنجیرهٔ بلوکی (Yang et al., 2019)

کاوش[1] در لایهٔ بالاتر و ریشهٔ مرکل[2] نشئت‌گرفته از درخت هش تمامی تراکنش‌ها در بدنهٔ بلوک (Yang et al., 2019).

لایهٔ شبکه، سازوکار شبکه‌سازی استفاده‌شده در زنجیرهٔ بلوکی را تعریف می‌کند. هدف این لایه انتشار داده‌های تولیدشده در لایهٔ داده‌هاست. شبکه به‌صورت کلی در قالب شبکهٔ P2P مدل‌سازی می‌شود که در آن نقطه‌ها شرکت‌کننده‌ها هستند. با استفاده از سازوکار شبکه‌سازی، زمانی‌که تراکنشی انجام شود در سطح همسایه‌ها توزیع می‌شود، فقط تراکنش‌های معتبر ارسال خواهند شد.

لایهٔ اجماع شامل الگوریتم اجماع به‌منظور رسیدن به اجماعی میان گره‌های نامطمئن در محیط‌های نامتمرکز است. در سیستم‌های موجود، سه سازوکار عمده برای اجماع درنظر گرفته شده است: اثبات کار (PoW) (Nakamoto, 2008)[3]، اثبات سهم (PoS) (Buterin, 2014; Seijas et al., 2016)[4] و تحمل خطای بیزانس کاربردی (PBFT) (Cachin, 2016)[5]. در رقابت برای افزودن بلوک‌ها به زنجیرهٔ بلوکی بیت‌کوین با هدف کسب جایزه، برای هر رقیب (کاوشگران)[6] PoW ضروری است. آن‌ها باید توابع هش را مکرر اجرا کنند تا مقداری تصادفی بیابند که تولیدش دشوار، اما اعتبارسنجی‌اش برای دیگران آسان باشد. منابع محاسباتی لازم برای PoW، باعث ممانعت از حملات گره‌های خرابکار می‌شود، زیرا قدرت محاسباتی آن‌ها در مقایسه با قدرت محاسباتی کلی شبکه محدود است (کمتر از ۵۱٪). در PoS

1. Mining Competition
2. Merkle Root
3. Proof-of-Work
4. Proof-of-Stake
5. Practical Byzantine Fault Tolerance
6. Miners



شکل ۳: مدل زنجیرهٔ بلوکی بیت‌کوین (Yang et al., 2019)

استفاده‌شده در اتریوم[1] (King and Nadal, 2012)، هدف هش به‌ازای سن هر سکه است که به‌سادگی به‌منزلهٔ مقدار ارزی تعریف می‌شود که دورهٔ نگه‌داری را مشخص می‌کند؛ بنابراین زنجیرهٔ بلوکی، با داشتن بالاترین سن کلی مصرفی سکه، درحکم زنجیرهٔ اصلی درنظر می‌شود. این کار باعث برطرف‌شدن مصرف بالای انرژی در PoW می‌شود، اما با بالابردن هزینهٔ کنترل یک سهم درخور ملاحظه از حملات جلوگیری می‌کند. PBFT متفاوت است با PoW و PoS که در زنجیرهٔ بلوکی عمومی به‌کار گرفته می‌شوند و فرض بر این دارد که کمتر از یک‌سوم گره‌ها خطا دارند و بقیه به‌درستی عمل می‌کنند (Yang et al., 2019).

لایهٔ توپولوژی دفتر کل، توپولوژی دفتر کل را برای ذخیرهٔ داده‌هایی که لایهٔ اجماع احراز هویت و تولید کرده تعریف می‌کند. این لایه شامل زنجیره‌ای از بلوک‌هاست که دفتر کل سیستم و برخی حالت‌های دیگری که لایهٔ اجماع تولید کرده را ذخیره می‌کنند. فراتر از ساختار سنتی زنجیرهٔ بلوکی (زنجیرهٔ اصلی)، که در شکل ۳ نشان داده شده است، به برخی توپولوژی‌های جدیدی باید توجه شود که به‌منظور بهبود مقیاس‌پذیری تولید شدند. برای مثال، زنجیره‌های جانبی، که به‌منزلهٔ سلسله‌مراتبی از نمونه‌های اجماع رده پایین ارائه شدند (Back et al., 2014)، ممکن است به‌نسبت زنجیرهٔ سطح بالا به‌صورت بالقوه درجهٔ پایین‌تری از فقدان تمرکز داشته باشند و امکان جابه‌جایی وجوه میان زنجیره‌ها را از راه تراکنش‌ها فراهم سازند. تراکنش خارج از زنجیره این امکان را فراهم می‌سازد که فعالیت‌ها روی زنجیرهٔ بلوکی حادث نشوند. برای مثال، شبکهٔ صاعقه (Poon and Dryja, 2016)، کانال‌های ریزپرداختی[2] را با هدف ارسال تراکنش‌ها ارائه می‌کند که انتقال مقدار آن‌ها خارج از زنجیرهٔ بلوکی به وقوع می‌پیوندد. زنجیره‌های پلاسما[3] (Poon and Buterin, 2017)، که در سلسله‌مراتبی از درخت قرار می‌گیرند، برای تقویت زنجیره‌های فرزند به‌منظور به‌حداکثررساندن کارایی کم‌هزینه و محاسبهٔ تراکنش‌ها در پایان روز از اثبات مرکلی استفاده می‌کنند.

1. Ethereum

2. Micropayment

3. Plasma

لایهٔ مشوق، مشوق‌های اقتصادی را به‌منظور انگیزش گره‌ها و کمک به تلاش آن‌ها برای بررسی و تصدیق داده‌ها یک‌پارچه می‌سازد. حفظ سیستم نامتمرکز زنجیرهٔ بلوکی بدون هویت متمرکزی که در قالب یک کل عمل کند حیاتی است. در بیت‌کوین و اتریوم، بیت‌کوین‌ها و اترها به‌مثابهٔ جوایز به گره‌هایی اعطا خواهند شد که بلوک‌ها را به زنجیره می‌افزایند (Teutsch and Reitwießner, 2019) و برای امن‌سازی محاسبات برون‌سپاری‌شده نیز جریمه‌هایی در نظر گرفته می‌شود.

لایهٔ قرارداد ویژگی‌هایی را که قابلیت برنامه‌نویسی دارند برای زنجیرهٔ بلوکی به ارمغان می‌آورد. نوشتن قطعه‌کدها در بیت‌کوین، روش‌های متنوعی را برای خرج‌کردن سکه‌ها فراهم می‌سازد. ورودی‌های هر تراکنش، اساساً به خروجی قبلی متصل می‌شود و این اتصال زمانی معتبر است که قطعه‌کد خروجی با توجه به امضایی که ورودی ارائه کرده، صحیح باشد (Romano and Schmid, 2017). در اتریوم، قرارداد هوشمند درحکم قابلیت برنامه‌نویسی قدرتمند، گروهی از قوانین حالت ـ پاسخ است که دارایی‌های دیجیتال را به‌صورت خودکار میان کاربران انتقال می‌دهد.

بالاترین لایه در زنجیرهٔ بلوکی لایهٔ کاربرد است و شامل رمزارز، اینترنت اشیا،[1] شهرهای هوشمند و مواردی است که حوزه‌های بسیاری مانند مالی، مدیریت و کارخانه‌ها را متحول می‌کنند. بااین‌حال، زنجیرهٔ بلوکی هنوز در مراحل ابتدایی است و محیط‌های دانشگاهی و صنعتی برای تعمق در این فناوری (از منظر فناوری اطلاعات و ارتباطات) با هدف پشتیبانی از این کاربردها تلاش می‌کنند (Dai et al., 2019).

۱ـ۲. ویژگی‌های زنجیرهٔ بلوکی

عوامل متعددی سیستم‌های زنجیرهٔ بلوکی را متمایز می‌سازند. در این بخش، مشخصات مهم آن‌ها از لحاظ استقرار، پیاده‌سازی و ویژگی‌ها بیان می‌شود:

۱ـ۲ـ۱. زنجیرهٔ بلوکی خصوصی، عمومی و مجوزدار: تمایز میان این زنجیره‌های بلوکی، در طرح تسهیم دفتر کل و افراد مجاز برای شرکت در یک سیستم است (Buterin, 2014). در زنجیرهٔ بلوکی خصوصی، دفاتر کل به‌صورت داخلی به‌اشتراک گذاشته می‌شوند و گروهی از گره‌های ازپیش‌تعریف‌شده آن را اعتبارسنجی می‌کنند. این سیستم مستلزم راه‌اندازی یا اعتبارسنجی گره‌هایی است که می‌خواهند بخشی از سیستم باشند. گره‌های مجاز مسئول نگه‌داری اجماع‌اند. زنجیره‌های بلوکی خصوصی برای سیستم‌های بسته مناسب است که در آن‌ها تمامی گره‌ها کاملاً مطمئن‌اند. از سوی دیگر، زنجیره‌های بلوکی عمومی مانند بیت‌کوین، اتریوم و سایر موارد مشابه، به همه اجازه می‌دهند که با مجوزهایی برای اعتبارسنجی یک‌پارچگی دفتر کل با اجرای سازوکار اجماع، به دفتر کل توزیع‌شده دسترسی داشته باشند. شبکه‌های زنجیرهٔ بلوکی عمومی کاملاً باز و توزیع‌شده‌اند و همه می‌توانند آزادانه به آن‌ها بپیوندند یا آن را ترک کنند. بنابراین، این سیستم تحت تأثیر گره‌های شناخته‌شده و ناشناس عمل می‌کنند. زنجیره‌های بلوکی مجوزدار ترکیبی از زنجیره‌های بلوکی خصوصی و عمومی‌اند و بخش‌های بسیاری را ترکیب می‌کنند و گره‌های اصلی از آغاز با دقت بالایی انتخاب می‌شوند. زنجیره‌های بلوکی مجوزدار برای سیستم‌های نیمه‌بسته‌ای مناسب‌اند که از بنگاه‌های کمی تشکیل می‌شوند و اغلب در قالب کنسرسیوم سازمان‌دهی می‌شوند (Viriyasitavata and Hoonsopon, 2018)؛

۱ـ۲ـ۲. تمرکز و فقدان تمرکز: در پایگاه داده‌های سنتی، تراکنش‌ها ذاتاً مطمئن‌اند یا اعتبارشان با واسطه‌های مرکزی مطمئن تأیید می‌شود. این کار هنگام استفاده از سرورهای مرکزی، باعث بروز هزینه‌های اضافی شده، عملکرد به مسئله‌ای بزرگ تبدیل می‌شود. فناوری زنجیرهٔ بلوکی برای مشکلات مدیریت تراکنش توزیع‌شده راهکاری امیدوارکننده است (Dinh et al., 2017) که در میان نقاط شبکهٔ P2P برقرار می‌شود. تمامی انواع زنجیره‌های بلوکی (عمومی، خصوصی، مجوزدار) شامل درجات گوناگونی از عدم تمرکزند که باعث کاهش نقطهٔ واحد شکست و همچنین کاهش یک‌پارچگی داده‌ها می‌شود؛

۱ـ۲ـ۳. پایداری: تراکنش‌های ثبت‌شده در دفتر کل زنجیرهٔ بلوکی، پایدار در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا در سرتاسر شبکه منتشر می‌شوند و هر گره، سوابق خود را نگه‌داری و کنترل می‌کند. تازمانی‌که اکثر گره‌ها خوش‌خیم[2] باشند، پایداری به‌صورت مداوم حفظ می‌شود. برخی ویژگی‌ها مانند شفافیت و تغییرناپذیربودن از این مشخصه مشتق می‌شوند. این شفافیت و تغییرناپذیربودن بدین‌معناست که زنجیره‌های بلوکی قابلیت ممیزی‌شدن دارند (Hammerschmidt, 2018)؛

۱ـ۲ـ۴. اعتبار: برخلاف برخی سیستم‌های توزیع‌شده، زنجیره‌های بلوکی مستلزم اجرای همهٔ گره‌ها نیستند. تراکنش‌ها یا بلوک‌هایی که در سیستم‌های زنجیرهٔ بلوکی منتشر شده‌اند با سایر گره‌ها اعتبارسنجی خواهند شد؛ بنابراین هرگونه تحریف به‌آسانی تشخیص داده خواهد شد. این سیستم شامل سه نقش اصلی است (Correia et al., 2011):

الف) پیشنهاددهندگان که مقداری را پیشنهاد می‌کنند؛

ب) پذیرندگان که اعتبارسنجی می‌کنند و تصمیم می‌گیرند که کدام مقدار اتخاذ شود؛

ج) یادگیرندگان که مقدار انتخاب‌شده را می‌پذیرند.

۱ـ۲ـ۵. گمنامی و هویت: گمنامی مشخصهٔ اصلی زنجیره‌های بلوکی عمومی است. هویت در این سیستم می‌تواند با هویت

1. Internet of Things

2. Benign

دنیای واقعی کاربر یکسان باشد. هر کاربر می‌تواند برای اجتناب از قرارگیری هویت خود در معرض مخاطره چندین هویت را کسب کند (Yeow et al., 2018). برای محافظت از اطلاعات خصوصی هیچ نیازی به موجودیت مرکزی نیست. درنتیجه، هویت دنیای واقعی از اطلاعات تراکنش به‌دست نمی‌آید و بخشی از حریم خصوصی حفظ می‌شود. از سوی دیگر، هویت معمولاً مستلزم سیستم‌هایی است که از راه موجودیت‌های شناخته‌شده (در شرایطی مانند زنجیره‌های بلوکی خصوصی و مجوزدار) عملیاتی و هدایت شوند؛

۱ـ۲ـ۶. قابلیت ممیزی: برچسب زمان سوابق و اطلاعات پایدار، این امکان را فراهم می‌سازد که سوابق قبلی را با گره‌های موجود در شبکه‌های زنجیرهٔ بلوکی به‌آسانی تأیید و ردیابی کند. میزان قابلیت ممیزی به نوع سیستم‌های زنجیرهٔ بلوکی و پیاده‌سازی آن‌ها وابسته است. زنجیره‌های بلوکی خصوصی پایین‌ترین قابلیت ممیزی را دارند؛ زیرا یک موجودیت گره‌های آن را مدیریت می‌کند. زنجیره‌های بلوکی مجوزدار در ردهٔ دوم قرار می‌گیرند؛ زیرا ممکن است برخی توافقنامه‌ها (مانند داده‌های رمزشده) در آن‌ها، مانع بهره‌مندی کامل اطلاعات از قابلیت ممیزی شوند. زنجیره‌های بلوکی عمومی بالاترین درجهٔ قابلیت ممیزی را به خود اختصاص می‌دهند و گره‌های آن کاملاً نامتمرکزند (Viriyasitavata and Hoonsopon, 2018).

۱ـ۲ـ۷. بسته‌بودن و بازبودن: زنجیره‌های بلوکی باز به‌منظور نگه‌داری از سوابق تراکنش‌ها بر گره‌های عمومی متکی هستند؛ بنابراین هرکسی می‌تواند یک تراکنش را منتشر کند، با تبعیت از مجموعه‌ای از قوانین به سیستم بپیوندد؛ اطلاعات داخل این زنجیرهٔ بلوکی نیز عمومی است. زنجیره‌های بلوکی مجوزدار، نیمه‌باز در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا گره‌ها از قبل مشخص شده یا پیش از الحاق، اعتبارسنجی می‌شوند. این زنجیره‌ها در میان زنجیره‌های بلوکی عمومی و خصوصی قرار می‌گیرند و سیاست‌های کنسرسیوم اطلاعات داخل آن‌ها را کنترل می‌کنند. این کنسرسیوم می‌تواند تصمیم بگیرد که اطلاعات کاملاً باز، نیمه‌باز یا بسته باشند. زنجیره‌های بلوکی خصوصی، مانند زنجیره‌های بلوکی مجوزدار، چگونگی انتخاب گره‌ها و میزان بازبودن داده‌ها را براساس سیاست‌ها کنترل می‌کنند؛ بااین‌حال، آن‌ها نیز به یک موجودیت یا مالک واحد متکی‌اند (ibid).

۱ـ۳. کاربردهای زنجیرهٔ بلوکی

فناوری زنجیرهٔ بلوکی در دنیای اقتصاد کاربردهای گوناگونی دارد. شرکت‌های فناوری مالی[1] درحال کاوش در حوزهٔ رمزارزها و بازارهای تبادل ارزند. همچنین کاوش در فناوری زنجیرهٔ بلوکی برای تراکنش‌های B2B شامل مزایایی مانند کاهش مخاطرهٔ سایبری، کاهش مخاطرهٔ طرف مقابل و افزایش شفافیت است (Dimbean-Creta, 2017; Geranio, 2017). در حوزهٔ سلامت، اطلاعات بیماران و داده‌های پژوهش‌های پزشکی باید طوری به‌اشتراک گذاشته شوند که اطلاعات شخصی حساس نه‌فقط افشا، بلکه دست‌کاری نیز نشوند (Dubovitskaya et al., 2017). این فناوری می‌تواند در سازمان‌های ثبت احوال، ثبت اسناد و املاک و دفاتر ثبت اسناد رسمی نیز به‌کار گرفته شود (Lemieux, 2016). برخی از کاربردهای معمول فناوری زنجیرهٔ بلوکی عبارت‌اند از است:

۱ـ۳ـ۱. رمزارز: یکی از فعال‌ترین حوزه‌های زنجیرهٔ بلوکی، بخش مالی و به‌ویژه حوزهٔ رمزارز است. از زمان ظهور اولین بیت‌کوین در زنجیرهٔ بلوکی (Nakamoto, 2008)، رمزارزهای متعددی خلق شده‌اند. ازآنجاکه سازوکارهای گمنامی، قابلیت تأیید، فقدان تمرکز و اجماع بیت‌کوین متمایزند، ارزش بیت‌کوین به ۶۳۰۰ پوند نیز رسید (Guo and Liang, 2016). در همین زمان، برخی رمزارزهای دیگر با ویژگی‌های بهبودیافته ظهور کردند و بازار پررونق فعلی رمزارزها را شکل دادند. در میان آن‌ها، اتریوم (Buterin, 2014) بستر زنجیرهٔ بلوکی عمومی را خلق کرد که در آن، قراردادهای هوشمند در سال ۲۰۱۵ استقرار یافتند. با ظهور قراردادها، فناوری زنجیرهٔ بلوکی در طیف وسیع‌تری از سناریوهای کسب‌وکار (مانند پردازش قرارداد، تغییرات مالکیت و اینترنت اشیا) به‌کار گرفته شد (Huawei, 2018)؛

۱ـ۳ـ۲. انرژی: تجارت انرژی و کالاها (حتی ساده‌ترین تراکنش‌ها) اغلب بازی متعادلی میان چند طرف است (Merz, 2016). از اجرای تراکنش تا نتیجهٔ آن، هر دو طرف باید داده‌های تراکنش را هماهنگ و تأیید کنند. علاوه‌براین، ممکن است شرکت‌ها در طول چرخهٔ حیات تراکنش، نیازمند تعامل با سایر طرف‌های مقابل، صرافی‌ها، کارگزاران، ارائه‌کنندگان تدارکات، بانک‌ها و قانون‌گذاران باشند. همچنین فرایند تأیید، نیازمند هماهنگی دقیق نه‌فقط میان دو طرف تراکنش، بلکه درون شرکت به‌منظور نگه‌داری از فرایندهای دستی میان بخش‌های گوناگون برای حصول اطمینان از دیدی دقیق به کل فرایند تراکنش است. براساس فناوری زنجیرهٔ بلوکی، ساده‌ساختن جریان‌های کاری داخلی و فرایندهای مرتبط با بازارهای خارجی امکان‌پذیر است و این موضوع می‌تواند ترتیبات تراکنش‌های انرژی را کاملاً تغییر دهد. تسهیل فرایندهای فوق باعث صرفه‌جویی شایان توجهی (مانند کاهش کار یدی، کاهش هزینه‌های سرمایه از راه تسریع تلاش‌های فناورانه و کاهش وابستگی به سیستم‌های متعدد) نیز خواهد شد (Chen et al., 2018). درحال حاضر، محدودیت اصلی به‌کارگیری زنجیرهٔ بلوکی در حوزه انرژی، مربوط به عملکرد

1. Fintech

است (Dütsch and Steinecke, 2017). برای استفاده از زنجیرهٔ بلوکی درحکم زیرساختی صنعتی، دربارهٔ برخی استانداردها باید در آن صنعت توافق شود و این موضوع به چالشی عظیم تبدیل شود و طرف‌های متعددی باید با آن موافقت کنند.

۱ـ۳ـ۳. خودرو/ تلفن هوشمند: برای مثال سیستم دزدگیر خودروها فقط زمانی فعال می‌شود که دکمهٔ مربوطهٔ روی کلید را فشار دهید. تلفن هوشمند فقط زمانی کار خواهد کرد که کلمهٔ عبور صحیح را وارد کنید. آن‌ها همگی دربردارندهٔ فناوری‌های رمزنگاری برای محافظت از مالکیت‌اند. مشکل اصلی ویژگی هوشمندی این است که کلید در محفظه‌ای فیزیکی نگه‌داری می‌شود و نمی‌تواند به‌آسانی منتقل یا تکثیر شود. دفتر کل زنجیرهٔ بلوکی با فراهم‌ساختن امکان جایگزینی و تکثیر پروتکل‌های ازدست‌رفته برای کاوشگران، این مشکل را زنجیرهٔ بلوکی حل می‌کند (Chen et al., 2018).

۱ـ۳ـ۴. دولت زنجیرهٔ بلوکی: دموکرات‌ها و جمهوری‌خواهان امنیت سیستم رأی‌گیری را در انتخابات سال ۲۰۱۶ آمریکا زیر سؤال بردند. با استفاده از زنجیرهٔ بلوکی و قراردادهای هوشمند، هر فرد می‌تواند رأی خود و فرایند آماری کلی را مشاهده کند. همچنین نسبت درخور توجهی از بودجهٔ سالانهٔ دولت برای تأیید جریان سرمایه‌ها استفاده می‌شود و بهره‌گیری از فناوری زنجیرهٔ بلوکی می‌تواند این فرایند را تاحد زیادی تسهیل کند (ibid).

۲. رایانش مرزی

رایانش مرزی داده‌های محاسباتی، برنامه‌های کاربردی و خدمات را از سرورهای ابری دور و به سمت مرز شبکه هدایت می‌کند. تولیدکنندگان محتوا و توسعه‌دهندگان برنامه‌های کاربردی می‌توانند با ارائهٔ خدمات نزدیک‌تر به کاربران، از سیستم‌های رایانش مرزی استفاده کنند. ویژگی‌های خاص رایانش مرزی شامل پهنای باند بالا، تأخیر بسیار کم و دسترسی بلادرنگ به اطلاعاتی در شبکه است که چندین برنامهٔ کاربردی می‌توانند از آن استفاده کنند (Wang et al., 2019; Sahni et al., 2019; Ren et al., 2019).

ارائه‌کنندگان خدمات می‌توانند با گشودن دسترسی به برنامه‌های کاربردی و خدمات جدید، شبکهٔ دسترسی رادیویی (RAN) را برای کاربران فراهم سازند. رایانش مرزی خدمات جدیدی را برای بنگاه‌ها و مصرف‌کنندگان به ارمغان می‌آورد (Ning et al., 2019). موارد استفاده از رایانش مرزی شامل خدمات مکانی،[1] واقعیت افزوده،[2] تحلیل ویدئو[3] و ذخیره‌سازی پنهانی داده‌ها[4] می‌شود؛ بنابراین استانداردهای رایانش مرزی و استقرار بسترهای آن، به‌منظور جریان‌های درآمدی جدید برای فروشندگان و پیمانکاران به توانمندسازی کلیدی تبدیل شده‌اند.

براساس گزارش سیسکو،[5] رایانش مهواره‌ای بستر مجازی و بسط‌یافتهٔ پارادایم رایانش ابری است که منابع ذخیره‌سازی و محاسباتی و خدمات را از شبکهٔ اصلی به مرز شبکه می‌آورد (Cisco, 2015). ابرک[6] و رایانش مرزی سیار[7] مفاهیمی را شکل می‌دهند که با پارادایم رایانش مهواره‌ای مشابه‌اند. این دو مفهوم به‌منظور فراهم‌ساختن خدمات برای کاربران سیار (با انعطاف در استفاده از منابع دسترس‌پذیر محلی) طراحی شده‌اند (Satyanarayanan et al., 2009; Patel et al., 2010). با وجود این، مهواره به سخت‌افزارهایی وابسته است که سیسکو طراحی کرده و دربردارندهٔ قابلیت‌های محاسباتی به همراه کارکردهای عادی مانند مسیریاب‌هاست. رایانش مرزی مدل محاسباتی خودمختاری است که دستگاه‌های ناهمگون، متعدد و توزیع‌شده‌ای را شامل می‌شود که با شبکه در ارتباط‌اند و وظایف محاسباتی مانند ذخیره‌سازی و پردازش را انجام می‌دهند (Vaquero and Rodero-Merino, 2014).

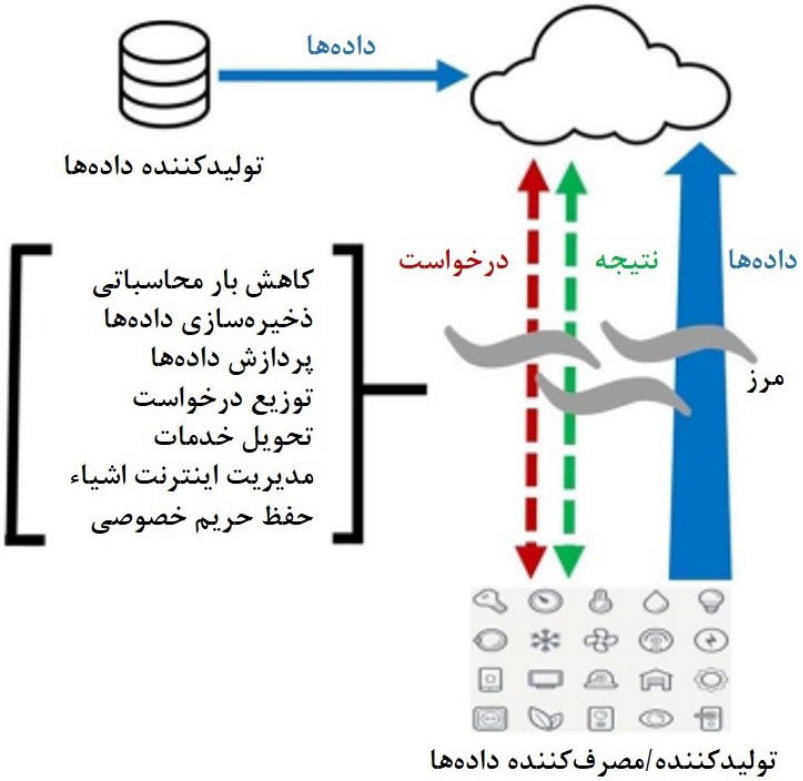
رسالت رایانش مرزی حل مسئلهٔ تأخیر بالا در خدمات و برنامه‌های کاربردی حساس به تأخیر است که در پارادایم رایانش ابری به‌خوبی اداره نمی‌شوند. این برنامه‌های کاربردی شامل الزامات زیرند: تأخیر بسیار کم و پیش‌بینی‌پذیر، آگاهی از موقعیت مکانی و پشتیبانی از حرکت و جابه‌جایی[8] (Khan et al., 2019).

۲ـ۱. معماری رایانش مرزی

فرض رایانش مرزی بر این است که محاسبه باید همیشه در نزدیکی منبع داده‌ها روی دهد. شکل ۴ مسیر دوطرفهٔ محاسبات را در رایانش مرزی نشان می‌دهد. ویژگی‌های رایانش مرزی انتقال، ذخیره‌سازی، انباشت و ادارهٔ داده‌ها و همچنین انتشار درخواست و تحویل تسهیلات از ابر به کاربر است. دستگاه مرزی خود مستلزم برنامه‌ریزی مناسب به‌منظور همگرا ساختن نیازهایی است که می‌توانند از لحاظ قابلیت اعتماد، امنیت و تفکیک وظایف در شبکه تأثیرگذار باشند (Shi et al., 2016).

این پارادایم دو مزیت دارد؛ تأخیر ارتباط میان دستگاه‌ها و ابر را کاهش می‌دهد و از منابع ابر و دستگاه‌های شبکهٔ محلی به شکلی کارا بهره می‌گیرد؛ زیرا دستگاه‌ها در رایانش مرزی در قالب مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان داده‌ها عمل می‌کنند (Hadžic et al., 2017). این بدین‌معناست که درخواست‌های میان دستگاه‌ها و ابر (همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود) دوطرفه‌اند. همچنین در کار جمع‌آوری داده‌ها از پایگاه داده‌های موجود در ابر و ارسال آن‌ها به کاربر، گره‌های

1. Location Services
2. Augmented Reality
3. Video Analytics
4. Data Caching
5. Cisco
6. Cloudlet
7. Mobile-Edge Computing
8. Mobility



شکل ۴: معماری رایانش مرزی (Shi et al., 2016)

مرز شبکه نیز وظایف محاسباتی بسیاری دارند؛ ازجمله مدیریت اینترنت اشیا و محافظت از حریم خصوصی.

۲ـ۲. ویژگی‌های رایانش مرزی

رایانش مرزی با رایانش ابری چندین مشخصهٔ مشابه دارد. بااین‌حال، ویژگی‌های متمایزکنندهٔ رایانش ابری، که آن را منحصربه‌فرد می‌کنند، شامل موارد زیر است:

۲ـ۲ـ۱. توزیع جغرافیایی متراکم: رایانش مرزی با استقرار بسترهای محاسباتی متعدد در شبکه مرزی، خدمات ابری را به کاربر نزدیک می‌کند (Satyanarayanan, 2019). توزیع جغرافیایی متراکم زیرساخت در موارد زیر یاری‌رسان است:

الف. مدیران شبکه خدمات سیار مبتنی‌بر مکان را بدون پیمودن کل شبکه WAN تسهیل می‌کند.

ب. کلان‌داده‌ها با سرعت و دقت بالاتری تحلیل می‌شوند (Ahmed et al., 2017b; Khelifi et al., 2019).

ج. سیستم‌های مرزی امکان تحلیل بلادرنگ در مقیاس بزرگ را فراهم می‌سازند (Jo˚A¡ilo and DA¡n, 2019; Fer-dowsi et al., 2019) که نمونه‌های آن شامل شبکه‌های حس‌گر برای پایش محیط و پایش خط تولید است.

۲ـ۲ـ۲. پشتیبانی از حرکت و جابه‌جایی: همان‌طور که تعداد خدمات سیار به‌سرعت درحال رشد است، رایانش مرزی نیز درحال پشتیبانی از حرکت و جابه‌جایی (مانند پروتکل تفکیک شناسه از موقعیت[1]) با هدف ارتباط مستقیم با دستگاه‌های سیار است. پروتکل LISP شناسهٔ میزبان را از شناسهٔ موقعیت جدا می‌کند و سیستم دایرکتوری توزیع‌شده‌ای پیاده‌سازی می‌کند. تفکیک شناسهٔ میزبان از شناسهٔ موقعیت، منشأ شکل‌گیری امکان پشتیبانی از حرکت و جابه‌جایی در رایانش مرزی است (Khan et al., 2019).

۲ـ۲ـ۳ آگاهی از موقعیت: ویژگی آگاهی از موقعیت در رایانش مرزی، این اجازه را به کاربران سیار می‌دهد که از نزدیک‌ترین سرور به موقعیت فیزیکی خود، به خدمات دسترسی یابند. کاربران می‌توانند از فناوری‌های گوناگونی مانند زیرساخت تلفن همراه، GPS یا دسترسی بی‌سیم برای یافتن موقعیت دستگاه‌های الکترونیکی استفاده کنند. این ویژگی در کابردهای متعددی در رایانش مرزی استفاده می‌شود؛ ازجمله ایمنی حمل‌ونقل مبتنی‌بر مهواره و مدیریت سانحه برمبنای رایانش مرزی (Al-Qamash et al., 2018).

۲ـ۲ـ۴. نزدیکی: منابع و خدمات محاسباتی در رایانش مرزی، در نزدیکی کاربران در دسترس‌اند و می‌توانند تجربهٔ آن‌ها را بهبود بخشند. دسترس‌پذیری منابع و خدمات محاسباتی به‌صورت

1. Locator/ ID Separation Protocol (LISP)

محلی، این امکان را به کاربران می‌دهد تا از اطلاعات زمینه‌ای شبکه به‌منظور اتخاذ تصمیمات کاهش بار محاسباتی و تصمیمات استفاده از خدمات حداکثر بهره را ببرند. ارائه‌کنندهٔ خدمات نیز می‌تواند با استخراج اطلاعات دستگاه و تحلیل رفتار کاربر، از اطلاعات کاربر سیار به‌منظور بهبود خدمات و تخصیص منابع به آن‌ها حداکثر استفاده را ببرد (Yousefpour et al., 2019).

۲ـ۲ـ۵. تأخیر کم: پارادایم رایانش مرزی، منابع و خدمات محاسباتی را به کاربران نزدیک‌تر می‌سازد و باعث کاهش تأخیر در دسترسی به خدمات می‌شود. تأخیر کمِ رایانش مرزی به کاربرانی که نیازمند منابع زیاد و حساس به تأخیرند امکان اجرای برنامه‌های کاربردی را روی دستگاه‌های مرزی قدرتمند (مانند مسیریاب یا سرور اختصاصی) می‌دهد (Shi et al., 2016).

۲ـ۲ـ۶. آگاهی از زمینه: آگاهی از زمینه، مشخصهٔ دستگاه‌های سیار است و با توجه به آگاهی از موقعیت تعریف می‌شود. اطلاعات زمینه‌ای دستگاه سیار در رایانش مرزی با هدف اتخاذ تصمیمات کاهش بار محاسباتی و دسترسی به خدمات مرزی استفاده می‌شوند (Han et al., 2019). اطلاعات بلادرنگ شبکه مانند بار شبکه و موقعیت کاربر می‌توانند برای ارائهٔ خدمات آگاه از زمینه به کاربران مرزی استفاده شوند. همچنین ارائه‌کنندهٔ خدمات می‌تواند از اطلاعات زمینه‌ای برای بهبود رضایت کاربران و کیفیت تجربهٔ آن‌ها استفاده کند.

۲ـ۲ـ۷. ناهمگونی: ناهمگونی در رایانش مرزی به وجود بسترها، معماری‌ها، زیرساخت‌ها و فناوری‌های محاسباتی و ارتباطی متنوعی اشاره دارد که عناصر رایانش مرزی (مانند دستگاه‌ها، سرورهای مرزی و شبکه‌ها) از آن‌ها استفاده می‌کنند. تنوع سخت‌افزارها، نرم‌افزارها و فناوری‌ها عوامل اصلی ناهمگونی این دستگاه‌ها را شکل می‌دهند. ناهمگونی در سرور مرزی عمدتاً از رابط برنامه‌نویسی برنامهٔ کاربردی (API)، سیاست‌های سفارشی و بسترها ناشی می‌شود. چنین تفاوت‌هایی به بروز مسائلی پیرامون قابلیت همکاری منجر می‌شود و این موضوع را به چالش اصلی در استقرار موفقیت‌آمیز رایانش مرزی تبدیل می‌کند. ناهمگونی شبکه به تنوع فناوری‌های ارتباطی اشاره دارد که بر تحویل خدمات مرزی اثر می‌گذارد (Al-Qamash et al., 2018).

۲ـ۳. کاربردهای رایانش مرزی

برخی حوزه‌ها می‌توانند از منافع رایانش مرزی بهره ببرند. برخی سناریوهایی که پیاده‌سازی رایانش مرزی در آن‌ها مزایای شایان توجهی در پی خواهد داشت، شامل انقلاب صنعتی چهارم، تولید هوشمند، انرژی هوشمند، شهرهای هوشمند، سلامت و کشاورزی است. در این بخش، نمونه‌هایی از کاربرد رایانش مرزی به‌اختصار ارائه خواهد شد.

رشد سریع اینترنت اشیا به بنیان‌گذاری پارادایم نوین انقلاب صنعتی چهارم و تحول دیجیتال، که اکنون در سازمان‌ها ظهور یافته، منجر شده است. بااین‌حال، این تغییرات باعث بروز چالش‌هایی در ارتباط با مدیریت حجم بزرگ داده‌هایی که دستگاه‌های مرزی تولید کرده‌اند، چگونگی پردازش این داده‌ها، ذخیرهٔ آن‌ها و تبدیل آن‌ها به اطلاعات ارزشمند برای تصمیم‌گیری اثربخش و کارا نیز شده است (Sittón and Rodríguez, 2017).

در شهرهای هوشمند، کاربران نهایی برای فراهم‌سازی خدمات منعطف باید در برنامه‌های درخواست ـ پاسخ جداول توزیع هوشمند نقشی فعال داشته باشند. علاوه‌براین، وسائط نقلیهٔ الکتریکی (ازجمله دستگاه‌های مرزی یا حس‌گرها)، که وظیفهٔ اصلی‌شان فراهم‌سازی حمل‌ونقل سبز است، در فراهم‌سازی انرژی توزیع‌شده در شهرهای هوشمند نقش مهمی دارند (Gaza-froudi et al., 2019).

سلامت الکترونیک باید با خدمات و دستگاه‌های مطمئن و تأخیر کم فراهم شود. رایانش مرزی می‌تواند برای این نیازمندی حیاتی باشد؛ زیرا به کاهش دفعات تعامل میان بیمار و زیرساخت سلامت کمک می‌کند. ابرک‌ها در پژوهشی (Ha et al., 2014) برای کاهش وظایف محاسباتی دستگاه‌های پوشیدنی استفاده شدند و پیشرفت زمان واکنش در آن بین ۸۰ تا ۲۰۰ میلی ثانیه تا نمایش نتایج بود. علاوه‌براین، با استفاده از ابرک‌ها کاهش مصرف انرژی نیز می‌تواند بین ۳۰ تا ۴۰ درصد باشد.

در پژوهشی دیگر، برای پیکربندی خودکار تجهیزات شبکه‌های بی‌سیم روستایی سیستمی ارائه شد (Fuentes et al., 2013). هدف این سیستم، خودکارسازی نصب سریع تجهیزات مشتری در زیرساخت مستقل و پایدارساختن آن و همچنین تبدیل این شبکه به شبکه‌ای برای افرادی است که سواد کامپیوتری کمتری دارند. مزایایی که این سیستم برای شبکه‌های بی‌سیم روستایی به همراه دارد کاهش هزینه‌ها از لحاظ نصب و نگه‌داری، خودکارسازی شبکه و سهولت یک‌پارچگی خدمات ارائه‌شده به مشتریان است. این موضوع باعث همراهی افرادی می‌شود که با وجود تمامی مزایای استفادهٔ گسترده از فناوری‌های نوین، هیچ‌گاه از آن‌ها استفاده نمی‌کردند (Fuentes et al, 2013).

۳. امن‌سازی رایانش مرزی با زنجیرهٔ بلوکی

۳ـ۱. مزایا

درحال حاضر، زیست‌بوم اینترنت اشیا و رایانش مرزی از معماری مشتری/ سرور با واسط‌های متمرکز به‌منظور اعتماد و پروتکل‌های امن مانند SSL و TLS بهره می‌گیرد. این مدل برای چندین سال به‌خوبی عمل کرده است. بااین‌حال، رویکرد متمرکز ممکن است به علت رشد مداوم دستگاه‌های اینترنت اشیا از لحاظ تعداد و کاربرد به گلوگاهی تبدیل شود. این موضوع تأخیر و خرابی ناشی از تراکم بیش از حد شبکه را در پی خواهد داشت (Pahl et al., 2018).

زنجیره‌های بلوکی در حوزه‌های متعدد (فراتر از حوزهٔ مالی)، پتانسیل بالایی از خود نشان داده‌اند و اعتقاد بر این است که دامنهٔ اینترنت اشیا نیز می‌تواند از فناوری زنجیرهٔ بلوکی برای برطرف‌کردن برخی چالش‌های خاص خود بهره گیرد. امروز چالش‌های شایان توجهی در حوزهٔ اینترنت اشیا شناسایی شده‌اند (Gubbi et al., 2013). برخی از این چالش‌ها مانند محرمانگی و یک‌پارچگی، رفتار مستقل و تاب‌آوری در برابر خطا با به‌کارگیری فناوری زنجیرهٔ بلوکی حل می‌شود.

دستگاه‌های اینترنت اشیا با دنیای فیزیکی و زندگی روزانهٔ ما ارتباط زیادی دارند (مثلاً در قالب دستگاه‌های پوشیدنی و خانه‌ها و خودروهای هوشمند). علاوه‌بر نگرانی‌ها درمورد تسهیم داده‌های حساس با افراد دیگر، این فناوری باعث افزودن سطح کاملاً جدیدی از نگرانی‌های امنیتی می‌شود؛ زیرا حملهٔ موفقیت‌آمیز به این دستگاه‌ها می‌تواند به آسیب بدنی کاربران آن‌ها منجر شود. فقدان استاندارد و هجوم برای تولید سریع پوشیدنی‌های نوآورانه به‌منظور به‌دست‌آوردن سهم بازار جزو دلایلی است که درحال حاضر به این نگرانی‌ها به اندازهٔ کافی توجه نمی‌شود. به‌کارگیری فناوری زنجیرهٔ بلوکی برای دستگاه‌های اینترنت اشیا خرابی دستگاه‌ها را به طرق زیر دشوارتر می‌سازد (Pahl et al., 2018):

الف) استفاده از داده‌هایی که از لحاظ رمزنگاری و تغییرناپذیری تصدیق‌شدنی هستند و تمامی شرکت‌کنندگان در شبکه آن‌ها را به اشتراک می‌گذارند؛

ب) اعتبارسنجی یک‌پارچگی تراکنش‌های شبکه پیش از پذیرش آن‌ها.

با نگاه به چگونگی توسعهٔ دستگاه‌های اینترنت اشیا، مشخص می‌شود که این دستگاه‌ها درحال هوشمندتر و مستقل‌ترشدن هستند. با افزایش تعداد دستگاه‌های استقراریافته و پیچیدگی تعاملات آن‌ها، شکلی از هوش باید در هر دستگاه اینترنت اشیا تعبیه شود تا آن را مستقل‌تر سازد. زنجیره‌های بلوکی کارکردی ارائه می‌کنند که مدیریت زیرساخت را برای عوامل مستقل در قالب قراردادهای هوشمند ممکن می‌سازد. این قراردادها، برنامه‌هایی با اجرای خودکارند که در خود زنجیرهٔ بلوکی قرار می‌گیرند. قراردادهای هوشمند حاوی منطق و شرایط کسب‌وکارند و زمان اجرای قراردادها را تعیین می‌کنند (Bartoletti and Pompianu, 2017)؛ بنابراین مجموعه‌ای از قراردادهای هوشمند می‌توانند رفتار دستگاه‌های اینترنت اشیا را مشخص کنند، دستگاه‌هایی که تعامل با بقیهٔ شبکه (مثلاً انتشار برخی اطلاعات پس از دریافت پرداخت) را ممکن می‌سازند. قراردادهای هوشمند را پروتکل‌های رمزنگاری محافظت می‌کنند و مانند سایر داده‌های موجود در زنجیرهٔ بلوکی به‌سادگی دستکاری نمی‌شوند.

درمورد دستگاه‌هایی که به‌درستی عمل نمی‌کنند یا حملات به شبکه‌های اینترنت اشیا، این شبکه باید مقاوم باشد تا از رخنه‌های امنیتی یا قطعی شبکه جلوگیری کند. ماهیت P2P فناوری زنجیرهٔ بلوکی، مقاومت دربرابر خطا و دسترس‌پذیری سیستم را افزایش می‌دهد؛ زیرا قطعی برخی از گره‌ها، کل شبکه را از کار نخواهد انداخت (Asharaf and Adarsh, 2017). همچنین معماری نامتمرکز زنجیرهٔ بلوکی امکان ارتباط سبک‌تر، سریع‌تر، مطمئن‌تر و امن‌تر میان گره‌ها را فراهم می‌سازد.

۴. چارچوب‌ها

در پژوهشی، معماری ابر توزیع‌شدهٔ زنجیرهٔ بلوکی به همراه رایانش مرزی با محوریت شبکهٔ نرم‌افزارمحور[1] ارائه شد (گره‌های مهواره در مرز شبکه بودند). این معماری ابر در سه لایه دسته‌بندی شد: دستگاه، مهواره و ابر. داده‌های خام و پالایش‌شده از لایهٔ دستگاه به لایهٔ مهواره با محوریت SDN منتقل می‌شوند که این لایه، مسئول تحلیل بلادرنگ داده‌ها و ارائهٔ خدمات به مجموعه‌ای از دستگاه‌های محلی است (Sharma et al., 2017). تمامی کنترل‌کننده‌های SDN به روشی توزیع‌شده با استفاده از زنجیرهٔ بلوکی به هم متصل‌اند و هر کنترل‌کننده، به تابع تحلیل قانون جریان و تابع مهاجرت بسته‌ها به‌منظور امن ساختن شبکه در طول حملات و نیز به رابط برنامه‌نویسی برای مدیریت شبکه مجهز است. گره مهواره، نتایج داده‌های پردازش‌شده را به ابر توزیع‌شده و درصورت لزوم به لایه‌های دستگاه انتقال می‌دهد، برای استقرار خدمات برنامهٔ کاربردی به ابر دسترسی پیدا می‌کند و هنگامی‌که منابع محاسباتی کافی وجود نداشته باشد، بار محاسباتی را به سمت ابر منتقل می‌کند. برای تأیید بهبود در عملکرد محاسباتی و انتقال و ذخیره‌سازی داده‌ها در زنجیرهٔ بلوکی، پروتکل اجماع اثبات خدمات[2] ارائه شد. این پروتکل به‌منظور ترکیب سازوکارهای PoS و PoW از تکنیک دوپرشی[3] استفاده می‌کند (Sharma et al., 2017).

در پژوهشی دیگر، مدل چندلایه مبتنی‌بر زنجیرهٔ بلوکی برای شبکهٔ اینترنت اشیا ارائه شد (Li and Zhang, 2017). این مدل، کل اینترنت اشیا را به دو بخش تقسیم می‌کند؛ لایه‌های مرزی و لایه‌های سطح بالا. لایهٔ مرزی در قالب شبکه‌ای محلی (LAN) متشکل از تعدادی شی به همراه گره‌ای مرکزی (که آن‌ها را مدیریت می‌کند) تعریف می‌شود. با وجود این، این گره مرکزی می‌تواند به‌منزلهٔ گره‌ای از لایه بالاتر نیز در نظر گرفته شود. در اینجا به نظر می‌رسد که لایهٔ مرزی، ترکیبی از دستگاه‌ها و مهواره

1. Software-Defined Networking (SDN)

2. Proof-of-Service

3. 2-Hop

موجود در مطالعه باشد (Sharma et al., 2017)؛ درحالی‌که لایه‌های سطح بالایی، مشابه ترکیبات گره‌های مهواره، گره‌های تجمیع مهواره و ابر توزیع‌شده هستند (ibid). برخلاف تعریف انعطاف‌پذیر لایه‌های مرزی، برای انتقال دوطرفهٔ داده‌ها و مشارکت در فعالیت‌های لایهٔ سطح بالا، لازم است رابط‌هایی با لایهٔ بالاتر درحکم گره فراهم شوند. همچنین هر شی در یک لایهٔ مرزی نمی‌تواند مستقیماً با سایر لایه‌های مرزی یا لایه‌های بالاتر ارتباط برقرار کند. در لایه‌های بالاتر به‌جز برای رابط‌های مشابه و الزام به استقلال لایه‌های مرزی، اجماع توزیع‌شدهٔ زنجیرهٔ بلوکی ضروری است. غیر از مدیریت گره‌های مرکزی در لایه‌های مرزی، گره‌های لایه‌های سطح بالا مستقل از داده‌ها هستند و نسخهٔ کاملی از تبادلات با یکدیگر از راه زنجیرهٔ بلوکی را در خود دارند (Yang et al., 2019).

معماری دیگری از منابع مجازی اینترنت اشیا مبتنی‌بر زنجیرهٔ بلوکی در میزبان مرزی ارائه شده است که مهواره را به‌صورت بسط‌یافته‌ای از ابر فراهم می‌سازد (Samaniego and Deters, 2016). این معماری بیشتر به چگونگی پیکربندی دستگاه‌هایی می‌پردازد که دربردارندهٔ ارتباط P2P از راه شبکهٔ مرزی محلی هستند. مجازی‌سازی مؤلفه‌های (منابع مجازی) اینترنت اشیا SDN برای مدیریت پیکربندی مجموعه‌ای بزرگ و ناهمگون از دستگاه‌ها استفاده می‌شوند و پیکربندی منابع مجازی در قالب بلوک‌های رمزشده ذخیره می‌شود. درعین‌حال، ظرفیت تعریف و استقرار سیستم‌های مجازی و خواندن و نوشتن در بلوک‌ها، به چندین مستأجر ثبت‌شده در زنجیرهٔ بلوکی مجوزدار داده می‌شود؛ بنابراین زنجیرهٔ بلوکی مجوزدار تخصیص منابع مجازی و دسترسی چندمستأجری را به روشی امن مدیریت می‌کند (Samaniego and Deters, 2017).

شرکت IBM با شرکت سامسونگ، به‌صورت مشترک، سیستم دورسنجی نقطه‌به‌نقطهٔ نامتمرکز مستقل[1] را توسعه داد که با استقرار تکنیک‌های زنجیرهٔ بلوکی در لایه‌های مشخصِ شبکهٔ رایانش مرزی متفاوت بود (IBM, 2015; Panikkar et al., 2015) و مبنایی را برای خلق اینترنت اشیا به‌صورت نامتمرکز از دیدگاه کسب‌وکار تشکیل داد. این سیستم از تغییر قدرت در شبکه از مرکز به سمت مرزها پشتیبانی می‌کند؛ به‌گونه‌ای که دستگاه‌ها استقلال بیشتری به‌دست می‌آورند و به نقاط تراکنش در زنجیرهٔ بلوکی تبدیل می‌شوند. همچنین نسخهٔ آلفای پروتکل اتریوم برای آن انتخاب شد که سه نوع نقطه در آن وجود دارد (نقاط سبک، نقاط استاندارد و تبادلات نقاط) و توان پردازشی آن‌ها به‌تدریج افزایش می‌یابد. نقاط سبک (مانند حس‌گرها) عمل پیام‌رسانی را انجام می‌دهند، یک کیف پول سبک به همراه آدرس‌ها و تعادل زنجیرهٔ بلوکی خود را نگه می‌دارند و حداقل تسهیم فایل را به انجام می‌رسانند. نقاط استاندارد بخشی از زنجیرهٔ بلوکی را نگه می‌دارند و از نقاط سبک پشتیبانی می‌کنند. تبادلات نقاط، مخازن بالقوه‌ای برای نگه‌داری نسخهٔ کاملی از زنجیرهٔ بلوکی هستند و خدمات تحلیلی زنجیرهٔ بلوکی را فراهم می‌سازند.

برخی مطالعات نیز به بررسی فناوری زنجیرهٔ بلوکی به‌منزلهٔ بستری برای رایانش مرزی در کاربردهای خاص پرداخته‌اند. یک سیستم کنترل توزیع‌شدهٔ مبتنی‌بر زنجیرهٔ بلوکی برای رایانش ابری ارائه شد (Stanciu, 2017). محفظه‌های داکر[2] با مدل سه‌لایهٔ رایانش ابری (دستگاه‌ها، ترکیب گره‌های مرزی و خدمات ابری) روی گره‌های مرزی استقرار می‌یابند و قراردادهای هوشمند به‌منظور حصول اطمینان از امنیت و اعتبار تراکنش‌ها به اجرا درمی‌آیند. در پژوهشی در حوزهٔ خانه‌های هوشمند (Dorri et al., 2017)، زنجیرهٔ بلوکی خصوصی محلی با کاوشگرانی در خانه ارائه کردند که مشابه پیکربندی شبکهٔ مرزی محلی (Samaniego and Deters, 2017) است.

در حوزهٔ سیستم‌های ارتباط وسائط نقلیه، چارچوبی برای مدیریت امن کلید مبتنی‌بر زنجیرهٔ بلوکی در شبکهٔ ناهمگون ارائه شد (Lei et al., 2017) که در آن، مدیران امنیت در لایهٔ دوم و به شکلی پراکنده (از نظر جغرافیایی) قرار می‌گیرند (معادل سرورهای مرزی). مدیر امنیت در هر دامنهٔ امنیتی، مواد رمزنگاری را مدیریت می‌کند و بلوک‌های کاوش‌شده میان مدیران امنیت به اشتراک گذاشته می‌شوند تا دفتر کل عمومی از انتقال و مدیریت کلید خلق شود. در پژوهشی دیگر، ترکیبی از هوش مصنوعی و شبکهٔ یادگیری مرزی مبتنی‌بر اتریوم با نام نئورونتو[3] برای یادگیری پزشکی شخصی ارائه شد (Brouwer and Bor-da, 2017). برای سازمان‌دهی مهواره‌های محاسباتی، قرارداد هوشمند مجهز به زنجیرهٔ بلوکی و فناوری‌های ارتباطی چندعامله استفاده شدند تا مانند سیستم عاملی عمومی و توزیع‌شده رفتار کنند که قابلیت حل مشکلاتی را داشته باشند که حلشان برای عوامل منفرد دشوار است.

همچنین در پژوهشی، چارچوبی با نام فاگ‌باس[4] ارائه شد که یک‌پارچه‌سازی سرتاسری اینترنت اشیا، مهواره و ابر را تسهیل ساخت (Tuli et al., 2019). فاگ‌باس رابط‌هایی مستقل از بستر برای برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیا و نمونه‌های محاسباتی برای اجرا و تعامل پیشنهاد می‌کند. این چارچوب نه‌فقط به توسعه‌دهندگان کمک می‌کند تا برنامه‌های کاربردی را تولید کنند، بلکه به کاربران نیز کمک می‌کند تا چندین برنامهٔ

1. Autonomous Decentralized Peer-to-Peer Telemetry (ADEPT)

2. Docker Container

3. NeuRoNto

4. FogBus

کاربردی را به‌صورت همزمان اجرا کنند و ارائه‌کنندگان خدمات نیز می‌توانند منابع خود را مدیریت کنند. علاوه‌براین، فاگ‌باس از تکینک‌های زنجیرهٔ بلوکی، احراز هویت و رمزنگاری برای امن‌سازی عملیات روی داده‌های حساس بهره می‌گیرد. با توجه به سادگی و چندبستری‌بودن این سیستم، استقرار آن آسان و از مقیاس‌پذیری و مقرون‌به‌صرفه‌بودن نیز بهره‌مند است (Dorri et al., 2017).

در پژوهشی دیگر، زنجیرهٔ بلوکی جدیدی برای محافظت از حریم خصوصی با نام زنجیره اعتماد[1] پیشنهاد شد. این زنجیره توان زنجیره‌های بلوکی را با مفاهیم اعتماد ترکیب می‌کند تا مسائل مرتبط با معماری‌های سنتی زنجیرهٔ بلوکی را برطرف سازد (Jayasinghe et al., 2019). آن‌ها امکان استقرار زنجیرهٔ اعتماد در محیط رایانش مرزی را در سطوح گوناگون بررسی می‌کنند تا نگرانی‌های تأخیر و حریم خصوصی مرتبط با پردازش متمرکز را از بین ببرند و از منابع موجود در شبکه‌های اینترنت اشیا محافظت کنند. در مطالعه‌ای دیگر، به مرور معماری‌های رایانش مرزی سیار پرداخته شد و چارچوبی برای زنجیرهٔ بلوکی سیار ارائه شد که می‌تواند با رایانش مرزی سیار ترکیب شود و کاوش را تسهیل کند (Bhattacharya et al., 2019). این چارچوب نیز کاهش بار محاسباتی سیستم‌های مرزی و مدیریت اعتماد را به ارمغان می‌آورد.

خلاصه‌ای از ویژگی‌های چارچوب‌های فوق به همراه مقایسهٔ آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۵. تأثیرات امن‌سازی رایانش مرزی از طریق زنجیرهٔ بلوکی بر کسب‌وکارها

فناوری زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی امکان توسعهٔ فرصت‌های نوین کسب‌وکار را فراهم می‌سازد و یکی از مهم‌ترین ابعاد آن، امنیت داده‌ها[2] و فرایندهایی با محوریت فناوری زنجیرهٔ بلوکی و داده‌های جمع‌آوری‌شده با ریزدانگی بالاتر است که بر رشد بازار امروز تأثیر خواهند گذاشت. در ادامه، خلاصهٔ برخی پیشنهادها درمورد چگونگی فراهم‌ساختن این فرصت‌ها با فناوری‌های نوآورانه ارائه می‌شوند. مباحثی درمورد استفاده از سناریوهای اینترنت اشیا و فناوری زنجیرهٔ بلوکی در کاربردهای توزیع‌شده نیز مطرح شده‌اند (Huckle et al., 2016).

تبادل انرژی اولین حوزهٔ کاربردی است؛ زیرا می‌تواند به‌صورت الکترونیکی و خودکار منتقل شود و اینترنت اشیا امکان تبادل مستقل و ماشین به ماشین (M2M) میان ماشین‌های صنعتی را فراهم می‌سازد. این تبادل به شکل‌های گوناگونی ازجمله شبکه‌های جمع‌آوری انرژی، تبادل برق و شبکه‌های V2G[3] صورت می‌گیرد. در پژوهشی، زنجیرهٔ بلوکی کنسرسیوم به‌منظور امن‌سازی تبادل توزیع‌شدهٔ انرژی در اینترنت اشیاء صنعتی (IIoT) ارائه شد (Li et al., 2017). آن‌ها برای رسیدگی به تأخیرهای تصدیق تراکنش‌ها، طرح پرداختی مبتنی‌بر اعتبار طراحی کردند که از تبادل سریع پشتیبانی می‌کند و درنتیجه، امکان تبادل مکرر انرژی را به شکل P2P و از راه وام‌های انرژی ـ سکه[4] فراهم می‌سازد. با وجود این، تأخیر زمانی هنوز مانعی بزرگ است؛ زیرا این طرح برای عنوان اجماع، وابسته به PoW است. در مطالعه‌ای دیگر، راهکاری ارائه شد که زنجیرهٔ بلوکی مختص تبادل برق شود. فناوری زنجیرهٔ بلوکی تعاملات M2M را به‌منظور تبادل خودکار اطلاعات برقی و هزینهٔ ارائهٔ خدمات تسهیل می‌کند (Sikorski et al., 2017).

دستگاه‌های اینترنت اشیا در سطح بی‌سابقه‌ای از ریزدانگی، قادر به جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها هستند. این داده‌ها ارزشمندند و برای پرداخت پاداش استفاده می‌شوند. امروزه تبادل اطلاعات پرداختی نمی‌تواند به دور از دخالت اشخاص ثالث باشد. این موضوع به هزینهٔ اضافی، مشکلات امنیتی و حریم خصوصی و فقدان کارایی و مانع گسترش کاربردهای اینترنت اشیا منجر می‌شود. بر همین اساس، چین‌انچر[5] معماری‌ای است مبتنی‌بر زنجیرهٔ بلوکی به‌منظور راه‌اندازی دستگاه‌های اینترنت اشیا در زیست‌بوم‌های ابری. این معماری از اینکه مالکان دستگاه‌ها در ازای فروش داده‌های حس‌گر دستگاه به ارائه‌کنندگان خدمات (با حفظ گمنامی مالک) پاداش دریافت کنند پشتیبانی می‌کند. بااین‌حال، عملی‌کردن این رویکرد دشوار است؛ زیرا بخش‌های این پروتکل مستلزم مدیریت پیچیدهٔ کلید نامتقارن است که برای اکثر دستگاه‌های مرزی، که منابع محدودی دارند، مناسب نیست. همچنین اعتماد داده‌های دستگاه‌های مرزی به واسط‌هایی وابسته است که مسائل مرتبط با تمرکز در آن‌ها رفع نمی‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، قلمرو کار با توسعه معماری‌ای برای مدل کسب‌وکار الکترونیکی مبتنی‌بر اینترنت اشیا، با استفاده از بیت‌کوین و IoT–کوین گسترش یافت (Zhang and Wen, 2017). IoT–کوین زنجیرهٔ بلوکی مخصوصی است که امکان تبادل کالا (داده‌های اینترنت اشیا و هرگونه دارایی هوشمندی که می‌تواند دیجیتالی شود) را فراهم می‌کند. بااین‌حال، جزئیات ارتباطات امن صحت و تراکنش‌های میان این دو سیستم به‌خوبی فراهم نمی‌شود. برای جادادن نرم‌افزارهای اجتناب‌ناپذیر، رابط برنامه‌نویسی به‌منزلهٔ کانالی ارتباطی و شخص ثالث استفاده می‌شوند.

1. TrustChain
2. Data Security
3. Vehicle-to-Grid
4. Energy-Coin Loan
5. ChainAnchor

جدول ۱: مقایسهٔ چارچوب‌های یک‌پارچه‌سازی رایانش مرزی و زنجیرهٔ بلوکی

نویسنده	سال	زمینه	روش امن‌سازی	مزایا
Sharma et al.	2017	رایانش مرزی با محوریت SDN	اتصال کنترل‌کننده‌های SDN با استفاده از تکنیک زنجیرهٔ بلوکی	۱) شبکهٔ امن در طول حملات ۲) رابط برنامه‌نویسی برای مدیریت شبکه ۳) پروتکل اجماع اثبات خدمات (ترکیبی از PoS و PoW) ۴) بهبود عملکرد محاسباتی و انتقال و ذخیره داده‌ها در زنجیرهٔ بلوکی
Li and Zhang	2017	شبکهٔ چند لایهٔ اینترنت اشیاء	۱) فقدان امکان ارتباط مستقیم اشیا در لایهٔ مرزی با سایر لایه‌های مرزی یا لایه‌های سطح بالا ۲) اجماع توزیع‌شدهٔ زنجیرهٔ بلوکی در لایه‌های سطح بالا	گره‌های لایه‌های سطح بالا، مستقل از داده‌ها هستند و نسخهٔ کاملی از تبادلات با یکدیگر از راه زنجیرهٔ بلوکی دارند.
Samaniego and Deters	2017	منابع مجازی اینترنت اشیا	زنجیرهٔ بلوکی مجوزدار برای تعریف و استقرار منابع مجازی	۱) مجازی‌سازی مؤلفه‌های اینترنت اشیا برای مدیریت پیکربندی مجموعهٔ بزرگ و ناهمگونی از دستگاه‌ها ۲) مدیریت تخصیص منابع مجازی و دسترسی چندمستأجری به روشی امن
IBM	2015	اینترنت اشیا به‌صورت نامتمرکز از دیدگاه کسب‌وکار	نسخهٔ آلفای پروتکل اتریوم	انتقال قدرت شبکه از مرکز به مرزها، به‌گونه‌ای که دستگاه استقلال بیشتری دارند و به نقاط تراکنش‌ها روی زنجیرهٔ بلوکی تبدیل می‌شوند
Stanciu	2017	سیستم کنترل توزیع‌شده	محفظه‌های داکر مستقر در گره‌های مرزی در کنار گره‌های اعتبارسنجی که قراردادهای هوشمند را اجرا می‌کنند	تراکنش‌ها امن و معتبر خواهند بود
Dorri et al.	2017	خانهٔ هوشمند	زنجیرهٔ بلوکی خصوصی محلی	-
Lei et al.	2017	سیستم‌های ارتباطی وسائط نقلیه	مدیران امنیت در لایهٔ دوم برای خلق دفتر کل عمومی از انتقال و مدیریت کلید	مدیریت کلید امن و مبتنی‌بر زنجیرهٔ بلوکی
Brouwer and Borda	2017	پزشکی شخصی	نئورونتو مبتنی‌بر اتریوم در کنار هوش مصنوعی	زنجیرهٔ بلوکی مجهز به قرارداد هوشمند و فناوری ارتباطی چندعاملی به‌منظور سازمان‌دهی مهواره‌های محاسباتی استفاده می‌شوند تا مانند سیستم عاملی عمومی عمل کنند و مشکلات دشوار را هموار سازند.
Tuli et al.	2019	یک‌پارچه‌سازی سراسری اینترنت اشیاء، مهواره و ابر	تکنیک‌های زنجیرهٔ بلوکی، احراز هویت و رمزنگاری	۱) کمک به توسعه‌دهندگان در ساخت برنامه‌ها ۲) کمک به کاربران در اجرای همزمان چند برنامه ۳) کمک به ارائه‌کنندگان خدمات در مدیریت منابع خود ۴) سیستم‌های نرم‌افزاری ساده و چندبستری ۵) استقرار آسان ۶) مقیاس‌پذیری ۷) مقرون‌به‌صرفه

نویسنده	سال	زمینه	روش امن‌سازی	مزایا
Jayasinghe	2019	محافظت از حریم خصوصی	ترکیب توان زنجیره‌های بلوکی با مفاهیم اعتماد و خلق زنجیرهٔ اعتماد	۱) برطرف‌کردن مسائل مرتبط با معماری‌های سنتی زنجیرهٔ بلوکی ۲) بررسی امکان استقرار زنجیرهٔ اعتماد در رایانش مرزی و برطرف‌کردن نگرانی‌های تأخیر و حریم خصوصی مرتبط با پردازش متمرکز و محافظت از منابع در شبکهٔ اینترنت اشیا
Bhattacharya .et al	2019	کاوش درحکم خدمت[1]	ترکیب رایانش مرزی سیار و زنجیرهٔ بلوکی با مفاهیم مدیریت اعتماد	۱) کاهش بار محاسباتی سیستم‌های مرزی ۲) طراحی کارای سازوکارهای قیمت‌گذاری ۳) مصرف کمتر انرژی ۴) مدیریت اعتماد در رایانش مرزی

نتیجه‌گیری

تمرکز این پژوهش بر یک‌پارچه‌سازی زنجیرهٔ بلوکی و رایانش ابری است. این موضوع درحال تبدیل‌شدن به مفهوم مهمی است که حداکثر استفاده را از مدیریت نامتمرکز و زیرساخت توزیع‌شدهٔ خود برای برآورده‌ساختن الزامات امنیتی، مقیاس‌پذیری و عملکردی در شبکه‌ها و سیستم‌های آتی به‌عمل می‌آورد. بحث ما با خلاصه‌ای از زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی آغاز و معماری، خصوصیات و کاربردهای هریک بیان شد. سپس چارچوب‌ها و مزایای یک‌پارچه‌سازی زنجیرهٔ بلوکی و رایانش ابری به بحث گذاشته شد. درنهایت نیز تأثیرات یک‌پارچه‌سازی این دو فناوری بررسی شد. بحث و پژوهش درمورد یک‌پارچه‌سازی و ترکیب زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی بسیار گسترده است و برخی چالش‌ها باقی می‌مانند. پرداختن به این چالش‌ها مدنظر جامعهٔ متخصصان شبکه است. هدف از این پژوهش بررسی چارچوب‌های مرتبط با یک‌پارچه‌سازی زنجیرهٔ بلوکی و رایانش ابری و تأثیرات آن در کسب‌وکار به‌صورت کلی است و مسیر جدیدی را برای توسعهٔ سیستم‌های یک‌پارچه می‌گشاید.

چالش‌ها و جهت‌گیری پژوهش‌های آتی: فناوری زنجیرهٔ بلوکی در کنار رایانش مرزی، خودکارشدن کامل خدمات مشترک (مهم‌ترین ویژگی روابط خدماتی میان افراد، سازمان‌ها و برنامه‌های کاربردی) را ممکن می‌سازد. کارایی و مقرون‌به‌صرفه‌بودن از راه ایجاد اعتماد بدون اشخاص ثالث معتمد توجه بسیاری را در حوزهٔ پژوهشی و صنعتی برای توسعهٔ مدل‌های نوین کسب‌وکار به خود جلب کرده است. هنوز کسب‌وکارها باید برخی چالش‌ها و فرصت‌های این کار را واکاوی کنند:

۱. امنیت و حریم خصوصی: برخلاف فراهم‌سازی امنیت و حریم خصوصی در ماهیت زنجیرهٔ بلوکی (Conti et al., 2018)، برون‌سپاری خدمات در مرزهای سیستم‌های مرکب از زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی، چالش‌های امنیتی و حریم خصوصی جدیدی به همراه خواهد داشت. راهکارهای خارج از زنجیره، که اغلب در روش‌های کنونی استفاده می‌شوند، به علت ازدست‌دادن تراکنش‌ها (ناشی از تصادم گره‌ها) روی یک کانال، هنوز جای بحث دارند (Eyal et al., 2016)؛ البته برای حل این چالش راهبردهایی مانند بازی تأیید[2] در تروبیت[3] و PoC در iEx.ec در دست توسعه است.

۲. خودسازمان‌دهی: با افزایش گره‌های رایانش مرزی، مدیریت شبکه و برنامه‌ها به چالشی عظیم تبدیل خواهد شد. برای تسهیل در استقرار رایانش مرزی، مفهوم خودسازمان‌دهی مطرح می‌شود تا سازوکارهای خودمختاری را اضافه کند و پیچیدگی فناوری را از اپراتورها و کاربران دور کند. خودسازمان‌دهی طرح‌ریزی، پیکربندی، مدیریت، بهینه‌سازی و بهبود شبکه‌های رادیویی را در شبکهٔ خودسازمان‌ده (SON) تعریف می‌کند. در محیط اینترنت اشیا، مهوارهٔ اشیا (FoT)، که دارای خودسازمان‌دهی است، شامل پایش خودسازمان‌ده، خدمات بازیابی خرابی و مدیریت و متعادل‌سازی پروفایل می‌شود (Prazeres and Serrano, 2016). همچنین ویژگی‌های خودسازمان‌دهی دیگری مانند خودنگه‌داری (Fernandez-Carames and Fraga-Lamas, 2018) و خودآگاهی (Preden et al., 2015) در مطالعات دیگر معرفی شده‌اند. درحال حاضر به‌نظر می‌رسد که یک‌پارچه‌سازی زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی بهترین روش برای تحقق سازوکار خودسازمان‌دهی با بهره‌گیری از قراردادهای هوشمند است. بااین‌حال و فارغ از مشکلات امنیتی کلی، خودسازمان‌دهی ممکن است باعث حملهٔ همکارانه[4] شود. برای مثال، برخی

1. . Mining as a Service (Maas)
2. Verification Game
3. Truebit
4. Cooperative Attack

مهاجمان می‌توانند عملکرد سیستم را کند کنند و تعداد اتصالات شبکه و سرعت انتقال داده‌ها را کاهش دهند یا مدعی حجم بالایی از داده‌ها شوند، درحالی‌که داده‌ها کوچک‌ترند.

۳. مدیریت منابع: مدیریت منابع، درحکم روشی مؤثر، به‌صورت گسترده در شبکه‌ها استفاده شده است. مجموعه‌ای از مسائل، چالش‌ها و جهت‌گیری‌های پژوهشی در حوزهٔ مدیریت منابع رایانش مرزی مطرح بوده‌اند، اما این موارد با یک‌پارچه‌سازی زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی جدی‌تر می‌شوند؛ زیرا مشارکت سرورها در روش مبتنی بر زنجیرهٔ بلوکی بسیار بیشتر است و مستلزم ملاحظات بیشتری است (Yang et al., 2019). به‌منظور توزیع صحیح وظایف و ادارهٔ مجموعه‌ای از منابع محاسباتی، زمان‌بندی‌ای چندمعیاری لازم است که منابع محاسباتی را تجمیع و وظایف را زمان‌بندی کند. چالش مطرح در این حوزه طراحی چنین زمان‌بندی چندمعیاری روی زنجیرهٔ بلوکی با هدف بهینه‌سازی محاسبات، ذخیره‌سازی و شبکه است. البته مدیریت منابع رایانش مرزی برای PoW در برخی مطالعات بررسی شده است (Loung et al., 2017; Jiao et al., 2017)، اما تحلیل منابع لازم برای سایر پروتکل‌های اجماع نیز در آینده توصیه می‌شود.

همچنین، انجام محاسبات در مرز شبکه امکان توزیع محاسبات در سرتاسر شبکه را فراهم می‌سازد. در آینده ممکن است وابستگی بیشتری به رایانش مرزی وجود داشته باشد و از ابر صرفاً برای پیچیده‌ترین تحلیل‌ها استفاده شود. انتظار می‌رود که همگرایی بیشتری میان رایانش مرزی و سایر فناوری‌ها ازجمله زنجیرهٔ بلوکی و هوش مصنوعی برقرار شود. رایانش مرزی و هوش مصنوعی در مواردی مانند پیش‌بینی‌های بلادرنگ باید به‌صورت هماهنگ کار کنند، درحالی‌که یک‌پارچگی با زنجیرهٔ بلوکی در لایه‌های داده‌های هوش مصنوعی ضروری خواهد بود (به‌ویژه در جایی که قابلیت اطمینان و پیگیری داده‌هایی که هوش مصنوعی را تغذیه می‌کنند حائز اهمیت است).

ترکیب رایانش مرزی، زنجیرهٔ بلوکی و هوش مصنوعی در حوزهٔ سلامت بسیار سودمند است. دستگاه‌های مرزی داده‌های مرتبط با بیمار را جمع‌آوری و آن‌ها را به بیمارستان ارسال می‌کنند. چالش اصلی در این مسیر، امنیت و حریم خصوصی داده‌ها در طول انتقال آن‌هاست. از زنجیرهٔ بلوکی برای امن‌سازی داده‌ها و محافظت از آن‌ها دربرابر دسترسی غیرمجاز استفاده می‌شود. به‌علاوه، می‌توان از هوش مصنوعی برای پاسخ به داده‌های دریافتی، تجویز نسخه برای بیماران و خرید و ارسال داروها به بیماران (درصورت لزوم) بهره گرفت.

ایدهٔ مناسب دیگر در حوزهٔ کشاورزی نیز به‌کارگیری جدیدترین فناوری‌ها در حوزهٔ هوش مصنوعی، زنجیرهٔ بلوکی و رایانش مرزی برای خلق زیست‌بومی است که مازاد غذا را در مناطق دچار سوءتغذیه توزیع کند و زنجیرهٔ غذایی را از تولید تا مصرف به شکلی اثربخش مدیریت کند. این کار نه‌تنها مسئلهٔ سوءتغذیه و گرسنگی جهانی را حل می‌کند، بلکه صنعت نوینی برای کارآفرینان خلق خواهد کرد.

منابع

Ahmed, E., Ahmed, A., Yaqoob, I., Shuja, J., Gani, A., Imran, M., and Shoaib, M. (2017a). "Bringing computation closer toward the user network: Is edge computing the solution?". *IEEE Communications Magazine*, 55(11), pp. 138–144.

Ahmed, E., Yaqoob, I., Hashem, I. A. T., Khan, I., Ahmed, A. I. A., Imran, M. and Vasilakos, A. V. (2017b). "The role of big data analytics in internet of things". *Computer Networks*, 129(2), pp. 459–471.

Al-Qamash, A., Soliman, I., Abulibdeh, R. and Saleh, M. (2018). "Cloud, Fog, and edge Computing: A Software Engineering Perspective". International Conference on Computer and Applications (ICCA).

Asharaf, S. and Adarsh, S. (2017). *Decentralized Computing Using Blockchain Technologies and Smart Contracts: Emerging Research and Opportunities*. IGI Global.

Back, A., Corallo, M., Dashjr, L., Friedenbach M. and Maxwell, G. (2014). "Enabling blockchain innovations with pegged sidechains". Available: https://blockstream.com/sidechains.pdf.

Bartoletti, M. and Pompianu, L. (2017). "An empirical analysis of smart contracts: platforms, applications, and design patterns". Brenner M. et al. (eds) Financial Cryptography and Data Security, Lecture Notes in *Computer Science*, 10323, PP. 494-509, Springer, Cham.

Bhattacharya, P., Tanwar, S., Shah, R. and Ladha, A. (2019). "Mobile edge computing-enabled blockchain framework-A survey". In Proceedings of ICRIC 2019, *Springer International Publishing*, Cham, 2020, pp. 797–809.

Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J. and Addepalli, S. (2012). "Fog computing and its role in the internet of things". The first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing, *ACM*, pp. 13–16.

Brouwer, W. D. and Borda, M. (2017). "NeuRoN: Decentralized artificial intelligence, distributing deep learning to the edge of the network". Available: https://s3-us-west-1.amazonaws.com/ai.doc.static/pdf/whitepaper.pdf.

Buterin, V. (2014). "A next generation smart contract and decentralized application platform". Available: https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper.

Cachin, C. (2016). "Architecture of the hyperledger blockchain fabric". Available: pdfs.semanticscholar.org.

Chen, W., Xu, Z., Shi, S., Zhao, Y. and Zhao, J. (2018). "A Survey of Blockchain Applications in Different Domains". *International Conference on Blockchain technology and Applications* (ICBTA) 2018, December 10–12, Xi'an, China.

Cisco. (2015). "Cisco fog computing solutions: Unleash the power of the internet of things". Available at: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/trends/iot/docs/computing-solutions.pdf (Accessed on 23 July 2018).

Conti, M., Kumar, S., Lal, C. and Ruj, S. (2018). "A survey on security and privacy issues of bitcoin". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(4), pp. 3416-3452.

Correia, M., Veronese, G. S., Neves, N. F. and Verissimo, P. (2011). "Byzantine consensus in asynchronous message-passing systems: a survey". *International Journal of Critical Computer-Based Systems*, 2(2), pp. 141–161.

Croman, K., Decker, C., Eyal, I., Gencer, A. E., and Juels E. A. A., (2016). "On scaling decentralized blockchains". ICFCDS'16, *Christ Church, Barbados*, pp. 106–125.

Dai, H., Zheng, Z. and Zhang, Y. (2019). "Blockchain for Internet of Things: A Survey". *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), pp. 8076–8094.

Dimbean-Creta, O. (2017). "Fintech - already new fashion in finance, but what about the future?". Qual. *Access Success*, 18(S3), pp. 25–29.

Dinh, T. T. A., Wang, J., Chen, G., Liu, R., Ooi, B. C. and Tan, K.-L. (2017). "Blockbench: A framework for analyzing private blockchains". In Proc. of the ACM International Conf. on *Management of Data*, pp. 1085–1100.

Dorri, A., Kanhere, S. S., Jurdak, R. and Gauravaram, P. (2017). "Blockchain for IoT security and privacy: The case study of a smart home". In 2017 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (PerCom workshops) (pp. 618-623). IEEE.

Dubovitskaya, A., Xu, Z., Ryu, S., Schumacher, M. and Wang, F. (2017). "How blockchain could empower ehealth: an application for radiation oncology: (Extended abstract)". Lecture Notes in *Computer Science* (including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 10494, pp. 3–6.

Dütsch, G. and Steinecke, N. (2017). "Use cases for blockchain technology in energy and commodity trading". *Snapshot of current developments of blockchain in the energy and commodity sector*, pwc.

Eyal, I., Gencer, A. E., Sirer, E. G. and Renesse, R. V. (2016). "Bitcoin-NG: A scalable blockchain protocol". in Proc. Usenix Conference on NSDI'16, Santa Clara, CA, Mar. 2016, pp. 45–59.

Ferdowsi, A., Challita, U. and Saad, W. (2019). "Deep learning for reliable mobile edge analytics in intelligent transportation systems: An overview". *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(1), pp. 62–70.

Fernandez-Carames, T. M. and Fraga-Lamas, P. (2018). "A review on the use of blockchain for the internet of things". *IEEE Access*, 6, pp. 32979-33001.

Florian, T. and Bjorn, S. (2016). "Bitcoin and beyond: a technical survey on decentralized digital currencies". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 18(3), pp. 2084–2123.

Fuentes, D., Laza, R. and Pereira, A. (2013). "Intelligent devices in rural wireless networks". *Advanced Distributed Computing Artificial Intelligence Journal*, 2(4), pp. 23–30.

Gazafroudi, A. S., Rodríguez, J. M. C., Keane, A. and Soroudi, A. (2019). "Decentralised flexibility management for EVs". IET Renewable Power Generation, 13(6), p. 952.

Geranio, M. (2017). "Fintech in the exchange industry: potential for disruption?" Masaryk Univ.

J. Law Technol., 11(2), pp. 245–266.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. and Palaniswami, M. (2013). "Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions". *Future Generation Computer Systems*, 29(7), pp. 1645–1660.

Guo, Y. and Liang, C. (2016). "Blockchain application and outlook in the banking industry". *Financial Innovation*, 2(1), p. 24.

Ha, K., Chen, Z., Hu, W., Richter, W., Pillai, P. and Satyanarayanan, M. (2014). "Towards wearable cognitive assistance". In Proc. 12th Annual. International Conference Mobile System Application Services, Bretton Woods, NH, USA, pp. 68-81.

Hadžic, I., Abe, Y. and Woithe, H. (2017). "Edge computing in the ePC". Proceedings of the Second ACM/IEEE Symposium on edge computing - SEC '17, 13, pp. 1-10.

Hammerschmidt, C. (2018). "Consensus in Blockchain Systems". Available on: https://medium.com/@chrshmmmr/consensus-in-blockchain-systems-in-short-691fc7d1fefe (Accessed on 5th of February, 2018).

Han, B., Wong, S., Mannweiler, C., Crippa, M. R. and Schotten, H. D. (2019). "Context-awareness enhances 5g multi-access edge computing reliability". In press, *IEEE Access*, 7, pp. 21290-21299.

Huckle, S., Bhattacharya, R., White, M. and Beloff, N. (2016). "Internet of things, blockchain and shared economy applications". *Procedia Computer Science*, 98(c), pp. 461–466.

Huawei. (2018). "Huawei's Blockchain Whitepaper". https://static.huaweicloud.com/upload/files/pdf/20180411/ 20180411144924_27164.pdf (Accessed on 28 December 2019).

IBM. (2015). "Empowering the edge: Practical insights on a decentralized Internet of Things". Available: https://www01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?htmlfid=GBE03662USEN.

Jayasinghe, U., Lee, G. M., MacDermott, Á. and Rhee, W. S. (2019). "TrustChain: A Privacy Preserving Blockchain with Edge". *Wireless Communications and Mobile Computing*.

Jiao, Y., Wang, P., Niyato, D. and Xiong, Z. (2017). "Social welfare maximization auction in edge computing resource allocation for mobile blockchain". Available on: https://arxiv.org/abs/1711.02844.

Jo˚A¡ilo, S. and DA¡n, G. (2019). "Selfish decentralized computation offloading for mobile cloud computing in dense wireless networks". *IEEE Transactions on Mobile computing*, 18(1), pp. 207–220.

Khan, W. Z., Ahmed, E., Hakak, S., Yaqoob, I. and Ahmed, A. (2019). "Edge Computing: A Survey". *Future Generation Computer Systems*, 97, pp. 219-235.

Khelifi, H., Luo, S., Nour, B., Sellami, A., Moungla, H., Ahmed, S. H. and Guizani, M. (2019). "Bringing deep learning at the edge of information-centric internet of things". *IEEE Communications Letters*, 23(1), pp. 52–55.

King, S., and Nadal, S. (2012). "Ppcoin: peer-to-peer crypto-currency with proof-of-stake". Available: http://peercoin:net/assets/paper/peercoin-paper.pdf.

Lei, A., Cruickshank, H., Cao, Y., Asuquo, P., Ogah, C. P. A. and Sun, Z. (2017). "Blockchain-based dynamic key management for heterogeneous intelligent transportation systems". *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6), pp. 1832–1843.

Lemieux, V. L., (2016). "Trusting records: is Blockchain technology the answer?". *Account. Audit. Account. Journal*, 2(2), pp. 72–92.

Li, C. and Zhang, L. (2017). "A blockchain based new secure multi-layer network model for Internet of Things". Proc. *IEEE ICIOT'17*, pp. 33–41, Honolulu, USA.

Li, Z., Kang, J., Yu, R., Ye, D., Deng, Q. and Zhang, Y. (2017). "Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things". *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 14(8), pp. 3690-3700.

Liu, B., Yu, X., Chen, S., Xu, X., and Zhu, L. (2017). "Blockchain based data integrity service framework for IoT data". *IEEE ICWS'17*, Honolulu, USA.

Luong, N. C., Xiong, Z., Wang, P., and Niyato, D. (2017). "Optimal auction for edge computing

resource management in mobile blockchain networks: A deep learning approach". Available on: https://arxiv.org/abs/1711.02844.

Merz, M. (2016). "Potential of the blockchain technology in energy trading. Burgwinkel, Daniel, Blockchain technology Introduction for Business and IT Managers". de Gruyter.

Nakamoto, S. (2008). "Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system". Available: https://bitcoin.org.

Ning, Z., Kong, X., Xia, F., Hou, W., and Wang, X. (2019). "Green and sustainable cloud of things: Enabling collaborative edge computing". *IEEE Communications Magazine*, 57(1), pp. 72–78.

Novo, O. (2018). "Blockchain meets IoT: An architecture for scalable access management in IoT". *IEEE Internet of Things Journal*, 5, pp. 1184–1195.

Pahl, C., EL Ioini, N. and Helmer S. (2018). "A Decision Framework for Blockchain Platforms for IoT and Edge Computing". Proceedings of the 3rd International Conference on Internet of Things, Big Data and Security, 1: IoTBDS, pp. 105-113.

Panikkar, S., Nair, S., Brody, P. and Pureswaran, V. (2015). IBM Adept: An IoT practitioner perspective. Draft copy for *Advance Review*.

Patel, M., Hu, Y. and Hédé, P. (2010). "Mobile edge computing". Available at: https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/MEC/Docs/Mobile-edge_Computing_-_Introductory_Technical_ White_Paper_V1%2018-09-14.pdf (Accessed on 23 July 2018).

Poon, J. and Buterin, V. (2017). "Plasma: Scalable autonomous smart contracts". Available: https://plasma.io/plasma.pdf.

Poon, J. and Dryja, T. (2016). "The bitcoin lightning network: Scalable off-chain instant payments". Available: https://lightning.network/lightning-network-paper.pdf.

Prazeres, C. and Serrano, M. (2016). "SOFT-IoT: Self-organizing fog of things". In Proc. WAINA' 16, Crans-Montana, Switzerland, pp. 803–808.

Preden, J. S., Tammemae, K., Jantsch, A., Leier, M., Riid, A. and Calis, E. (2015). "The benefits of self-awareness and attention in fog and mist computing". *Computer*, 48(7), pp. 37–45.

Ren, J., He, Y., Huang, G., Yu, G., Cai, Y. and Zhang, Z. (2019). "An edge-computing based architecture for mobile augmented reality". press, *IEEE Network*, 33(4), pp. 162-169.

Romano, D. and Schmid, G. (2017). "Beyond Bitcoin: A Critical Look at blockchain-Based Systems". *Cryptography*, 1(2), pp. 15.

Sahni, Y., Cao, J. and Yang, L. (2019). "Data-aware task allocation for achieving low latency in collaborative edge computing". press, *IEEE Internet of Things Journal*. 6(2), pp. 3512-3524.

Samaniego, M., and Deters, R. (2017). "Virtual resources and blockchain for configuration management in IoT". *Journal of Ubiquitous Systems and Pervasive Networks*, 9(2), pp. 1–13.

Samaniego, M. and Deters, R. (2016). "Hosting virtual IoT resources on edge hosts with blockchain". In 2016 IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT) (pp. 116-119). IEEE. Satyanarayanan, M. (2017). "The emergence of edge computing". *Computer*, 50(1), pp. 30–39.

Satyanarayanan, M. (2019). "How we created edge computing". *Nature Electronics*, 2(1), p. 42.

Satyanarayanan, M., Bahl, P., Caceres R. and Davies, N. (2009). "The case for VM-based cloudlets in mobile computing". *IEEE Pervasive computing*, 8(4), pp. 14–23. Doi: 10.1109/mprv.2009.82.

Seijas, P. L., Thompson, S. and McAdams, D. (2016). "Scripting smart contracts for distributed ledger technology". Available: http://eprint.iacr.org/2016/1156.

Sharma, P. K., Chen, M.-Y. and Park, J. H. (2017). "A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT". *IEEE Access*, (99), pp. 2169–3536.

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y. and Xu, L. (2016). "Edge Computing: Vision and Challenges". *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), pp. 637-646.

Sikorski, J. J., Haughton, J. and Kraft, M. (2017). "Blockchain technology in the chemical industry: machine-to-machine electricity market". *Applied Energy*, 195, pp. 234–246.

Sittón, I., and Rodríguez, S. (2017). "Pattern

Extraction for the Design of Predictive Models in Industry 4.0". International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS) (pp. 258–261). *Springer*, Cham.

Stanciu, A. (2017). "Blockchain based distributed control system for edge computing". Proc. *IEEE CSCS'17*, Bucharest, Romania, pp. 29–31.

Stojmenovic, I. and Wen, S. (2014). "The fog computing paradigm: Scenarios and security issues". *Computer Science and Information Systems* (FedCSIS), 2014 Federated Conference on IEEE, 2, pp. 1–8.

Teutsch, J. and Reitwießner, C. (2019). "A scalable verification solution for blockchains". ArXiv: 1908.04756v1.

Tomaso, A., Paolo, T. and Matteo, T. D. (2017). "Blockchain technologies: the foreseeable impact on society and industry". *Computer*, 50(9), pp. 18–28.

Tuli, S., Mahmud, R., Tuli, S. and Buyya, R. (2019). "FogBus: A Blockchain-based Lightweight Framework for Edge and Fog Computing". *The Journal of Systems and Software*, 154, pp. 22-36.

Vaquero, L. M. and Rodero-Merino, L. (2014). "Finding your way in the fog: Towards a comprehensive definition of fog computing". *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 44(5), pp. 27–32.

Viriyasitavata, W. and Hoonsopon, D. (2018). "Blockchain Characteristics and Consensus in Modern Business Processes". *Journal of Industrial Information Integration*, 13, pp. 32-39.

Vukolic, M. (2015). "The quest for scalable blockchain fabric: Proof-of-work vs. BFT replication". International Workshop on Open Problems in Network Security, Zurich, Switzerland.

Wang, P., Yao, C., Zheng, Z., Sun, G. and Song, L. (2019). "Joint task assignment, transmission and computing resource allocation in multi-layer mobile edge computing systems". *press*, *IEEE Internet of Things Journal*.

Yang, R., Yu, F. R., Si, P., Yang, Z. and Zhang, Y. (2019). "Integrated blockchain and edge computing Systems: A Survey, Some Research Issues and Challenges". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 21(2), pp. 1508–1532.

Yeow, K., Gani, A., Ahmad, R. W., Rodrigues, J. J. P. C. and Ko, K. (2018). "Decentralized Consensus for Edge-Centric Internet of Things: A Review, Taxonomy, and Research Issues". *IEEE Access*, 6, pp. 1513-1524.

Yi, S., Li, C. and Li, Q. (2015). "A survey of fog computing: concepts, applications and issues". 2015 workshop on mobile big data, *ACM*, pp. 37–42.

Yousefpour, A., Fung, C., Nguyen, T., Kadiyala, K., Jalali, F., Niakanlahiji, A., Kong, J. and Jue, J. P. (2019). "All One Needs to Know about Fog computing and related edge computing Paradigms". *Journal of Systems Architecture*, 98, pp. 289-330.

Yu, F. R. (2019). "A service-oriented blockchain system with virtualization". *Transactions on blockchain technology and Applications*, 1(1), pp. 1–10.

Yu, F. R., Liu, J., He, Y., Si, P. and Zhang, Y. (2018). "Virtualization for distributed ledger technology (vdlt)". *IEEE Access*, 6, pp. 25019–25028.

Yu, W., Liang, F., He, X., Hatcher, G. W., Lu, C., Lin, J. and Yang, X. (2017). "A survey on the edge computing for the Internet of Things". *IEEE Access*, 99, pp. 1–18.

Zhang, Y. and Wen, J. (2017). "The IoT electric business model: using blockchain technology for the internet of things". *Peer-to-Peer Network Applications*, 10(4), pp. 983–994.

Zhang, Z., Zhang, W. and Tseng, F. (2019). "Satellite mobile edge computing: Improving qos of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques". *IEEE Network*, 33(1), pp. 70–76.

Securing Edge Computing via Blockchain

Saeed Kazem Pourian[1]
Mohammad Shahbazi[2]
Mohammad Reza Taghva[3]

Abstract

Distributed ledger technologies have attracted significant attention recently and blockchain, as the underlying technology of cryptocurrencies, is the focal point of this attention. Blockchain has been used in various domains, such as cloud, fog, and edge computing and Internet of Things (IoT). However, it faces some limitations and lacks the capability to support frequent transactions. On the other side, after cloud and fog computing, edge computing serves as a key enabler for many future technologies like 5G, IoT, and vehicle-to-vehicle communications by connecting cloud computing resources and services to the end users and extends them at the edge of the network, but it currently confronts with challenges in decentralized management and security. Incorporating of blockchain and edge computing in one system can provide reliable access and control of the network, storage and computation distributed at the edges, thus providing a large scale of network servers, data storage and validity computation near the end in a secure manner. Notwithstanding the benefits of integrated blockchain and edge computing systems, their scalability enhancement, self-organization, resource management, functions integration and security issues need to be addressed before widespread implementation. This paper reviews some of the studies about enabling the integrated blockchain and edge computing system. Several critical aspects of the integration of blockchain and edge computing are identified. Finally, some of the effects of this integration on the business are discussed.

Keywords: Edge Computing, Blockchain, Fog computing, Internet of Things, Data security

---

1. Ph.D. Candidate in IT Management, Faculty of Management & Accounting, Allameh Tabataba'i University; saeed.kazem.313@gmail.com.

2. Ph.D. Candidate in IT Management, Faculty of Management & Accounting, Allameh Tabataba'i University.

3. Associate Professor, Faculty of Management & Accounting, Allameh Tabataba'i University.