مجازی‌سازی در رایانش مه و رایانش لبه: یک مطالعه مروری جامع

شقایق سلطانی[۱]، علی‌اکبر صدری[۲*۳]

[۱] گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آل‌طه، تهران، ایران، shaghayegh.slt1998@gmail.com

[۲] گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، a.a.sadri@srbiau.ac.ir

[۳] گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام علی(ع)، تهران، ایران، a.a.sadri@iamu.ac.ir

چکیده

با توسعه محصولات تجاری اینترنت اشیاء[۱] اهمیت زیادی در زندگی روزمره مردم پیدا کرده است. برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیاء از طریق اینترنت برای تبادل اطلاعات، شناسایی اشیاء، به‌روزرسانی مکان و نظارت بر امنیت به یکدیگر متصل شده‌اند. منظور از اشیاء همان دستگاه‌های حسگر و محرک[۲] هستند. رایانش ابری[۳] یک روش ارائه خدمات براساس تقاضا در بستر اینترنت است که منابع پردازشی، ذخیره‌سازی و شبکه را ارائه می‌دهد. با افزایش چشمگیر داده‌ها و دستگاه‌ها رایانش ابری سنتی نمی‌تواند بسیاری از الزامات حیاتی اینترنت اشیاء از جمله محاسبات در زمان واقعی[۴] و توزیع جغرافیایی[۵] گسترده را برآورده کند، همچنین مراکز داده ابری اغلب در هسته اینترنت هستند و دستگاه‌های سرویس گیرنده برای انجام پردازش، فاصله زیادی با ابرهای راه دور در شبکه دارند که همین فاصله باعث تأخیر در شبکه می‌شود و کاربران نهایی این تأخیر را به وضوح حس می‌کنند. برای رویارویی با این چالش‌ها مفهمومی به نام رایانش مه/لبه[۶] مطرح شد. رایانش مه یک لایه محاسباتی بین دستگاه‌های اینترنت اشیاء و ابر ایجاد می‌کند و رایانش لبه، محاسبات داده‌ای است که در لبه شبکه و در نزدیکی مکان فیزیکی ایجاد داده‌ها انجام می‌شود. به عبارت دیگر رایانش مه به عنوان یک واسطه بین لبه و ابر برای اهداف مختلف مانند فیلتر کردن داده‌ها عمل می‌کند. برای ارائه خدمات با کیفیت در رایانش مه/لبه می‌توان از فناوری مجازی‌سازی[۷] استفاده کرد. مجازی‌سازی لبه مهم است زیرا مفهوم نرم‌افزاری تعریف شده از ابر را به طور جهانی گسترش می‌دهد. این رویکرد تعریف‌شده توسط نرم‌افزار، تهیه، مدیریت و نظارت از راه دور دستگاه‌های لبه را در ردپای بزرگ جغرافیایی امکان‌پذیر می‌سازد و جایگزینی امن‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر را ارائه می‌دهد. این مقاله، مروری بر راهبردهای مختلف مجازی‌سازی در مه/لبه می‌باشد. با ارائه انواع معماری سیستم مجازی‌سازی، طبقه‌بندی روش‌ها به چالش‌ها و مسائل موجود در این زمینه می‌پردازد. سایر مقالات مروری مشابه نیز در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ بررسی شده‌اند. سپس به دسته‌بندی هر کدام از پژوهش‌ها از منظر موضوع اصلی، مزایا، معایب، یافته‌های جدید، حوزه کاربرد، نتایج ارزیابی، محیط ارزیابی و معیارهای ارزیابی در قالب جدول و نیز به صورت آماری پرداخته شده است و در نهایت، نتیجه‌گیری از مقالات و پژوهش‌ها، آورده شده است.

واژه‌های کلیدی: رایانش مه، رایانش لبه، اینترنت اشیاء، مجازی‌سازی، عملکرد شبکه

[1] Internet of things
[2] Actuator
[3] Cloud computing
[4] Real time
[5] Geographical distribution
[6] Fog/edge computing
[7] Virtualization

۱. مقدمه

رایانش ابری سنتی به دلیل داشتن طراحی متمرکز نمی‌تواند الزامات اینرنت اشیاء را برآورده کند به همین دلیل رایانش مه پدیدار شد. رایانش مه یک پلتفرم توزیع شده است که نیازهای اینترنت اشیاء از جمله زمان واقعی و ماهیت توزیع شدگی اشیاء را از طریق گره هایی که در نزدیکی دستگاه کاربر نهایی با لبه شبکه قرار دارند، برطرف می‌کند. اشیاء در حسگرها و محرک‌ها قرار دارند و از طریق آن‌ها با دنیای واقعی در تعامل هستند. مه داده‌ها را در محلی نزدیک به محل تولید آن‌ها پردازش می‌کند و استفاده بیش از حد از شبکه را کاهش می‌دهد. از مزایای مه می‌توان به تاخیر کم، ناهمگنی[۸]، توزیع جغرافیایی گسترده و تحرک[۹] اشاره کرد. مه جایگزین ابر نیست بلکه گسترشی از آن است زیرا که گره های مه به ابر متصل هستند. مه می‌تواند به طور همزمان چندین برنامه‌ی کاربردی را اداره کند که باعث کاهش هزینه های استقرار[۱۰]، حذف افزونگی[۱۱] سخت افزار و بهبود مقیاس پذیری [۱۲]سیستم می‌شود. استقرار فعلی اینترنت اشیاء بر پایه‌ی اشیایی است که در یک منطقه با مجموعه‌ای از گره های خاص متصل به اینترنت هستند بنابراین هر برنامه کاربردی یک زیر سیستم درون اینترنت اشیاء است که نمی‌تواند تبادل اطلاعات با برنامه‌های کاربردی مورد نظر کاربران را داشته باشد. راه‌حل این است که هر برنامه کاربردی گره‌ها را با زیرساخت خود ادغام کند یا یک استقرار عمودی از اشیاء به ابر داشته باشد به عبارت دیگر به صورت مه عمومی مستقر شود که می‌تواند همزمان چندین برنامه کاربردی را اجرا کند. ماشبن های مجازی[۱۳] استاندارد پلتفرمی را ارائه می‌کنند که می‌تواند چندین سرویس را درون خود میزبانی کند. مجازی‌سازی عبارت است از تکرار یک دستگاه یا منابع آن به گونه‌ای که چندین فرآیند از برنامه‌های مختلف به طور همزمان اجرا می‌شود تا کارایی را افزایش داده و سربار تعمیر و نگهداری را کاهش دهد. مجازی‌سازی به عنوان راه‌حلی برای ناهمگنی، پیچیدگی، مدیریت و برنامه‌نویسی شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد. از مجازی‌سازی برای ارائه خدمات در لبه شبکه استفاده می‌شود. این خدمات به حسگرها، محرک‌ها، وسایل نقلیه، مصرف‌کنندگان، شرکت‌ها و حتی شهرهای هوشمند ارائه می‌شود. مجازی‌سازی لبه، استفاده از نسخه‌های نرم‌افزاری منابع محاسباتی فیزیکی در لبه یک شبکه، نزدیک‌ترین دستگاه‌هایی است که داده‌ها را تولید می‌کنند. دستگاه لبه جزء شبکه‌ای است که مسئول اتصال شبکه محلی شما به یک شبکه خارجی و گسترده است، جایی که می‌توانید داده‌ها را از هر محلی جمع‌آوری کنید. سه تکنیک رایج برای مجازی‌سازی وجود دارد که عبارتند از: Xen، KVM و کانتینرها[۱۴]. توابع مه جنبه‌هایی مانند تجزیه و تحلیل، قابلیت‌های حسگرها و منابع محاسباتی را در میان سایر موارد پوشش می‌دهند. از این رو، سیستم قابلیت‌های خود را از طریق این توابع بدون به خطر انداختن پیچیدگی و مقیاس‌پذیری به نمایش می‌گذارد. کانتینرها مکمل ماشین‌های مجازی استاندارد هستند. کانتینرها برای برای رایانش مه و لبه بسیار مناسب هستند. اهداف اصلی این مقاله به شرح زیر است:

- ✓ ارائه یک طبقه‌بندی فنی برای دسته‌بندی رویکردهای مختلف مجازی‌سازی در مه/لبه

[8] Heterogeneity
[9] Mobility
[10] Deployment costs
[11] Redundancy
[12] Scalability
[13] Virtual machines
[14] Containers

- ✓ بحث در مورد چالش‌های اصلی رویکردهای مجازی‌سازی در مه/لبه
- ✓ برجسته کردن چالش‌های تحقیقاتی آینده و مسائل باز مجازی‌سازی در مه/لبه

این مقاله، در ادامه بصورت زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم، کارهای مرتبط با موضوع مقاله پیشرو را معرفی می‌کند. در بخش سوم به معرفی رایانش لبه/مه می‌پردازد. در بخش چهارم، به مزایا و معایب مجازی‌سازی می‌پردازد. روش تحقیق و انتخاب مقالات را در بخش پنجم، بیان می‌کند. این مقاله سعی دارد تا مطالعات و پژوهش‌های انجام شده را در بخش ششم، بررسی و دسته‌بندی کند. در بخش هفتم، به بحث، تحلیل و مقایسه مطالعات و پژوهش‌های مورد بررسی می‌پردازد. همچنین، مسائل باز و چالش‌های موجود در این زمینه در بخش هشتم، بیان می‌شود. در بخش نهم، نتیجه‌گیری در مورد این مطالعات و پژوهش‌ها را بیان می‌شود.

۲. کارهای مرتبط

برخی مقالات مرتبط در زمینه رایانش مه/لبه وجود دارد که سعی در ارائه گزارشی از مقالات موجود در زمینه رایانش مه، رایانش لبه و مجازی سازی در رایانش مه/لبه دارند. Zeyi Tao و همکاران [۲۳]، روندهای مهندسی و تحقیقاتی دستیابی به مدیریت ماشین مجازی کارآمد در رایانش لبه را معرفی می‌کنند. همچنین به بررسی چارچوب های مجازی سازی برای رایانش لبه توسعه یافته در صنعت و دانشگاه، تکنیک های مجازی سازی متناسب با رایانش لبه، الگوریتم های مکان و زمان بندی۱۵ بهینه شده برای رایانش لبه و مشکلات تحقیق در امنیت مربوط به مجازی سازی می‌پردازند. M. Sri Raghavendra و همکاران [۲۴]، کاربرد احتمالی مجازی سازی سبک وزن۱۶ برای گره های مه۱۷ را در قالب مطالعات موردی توصیف می کنند و سربار عملکرد ماشین های مجازی و نیاز به کانتینر و همچنین مزایای آن در گره های مه و سیستم های محاسباتی با کارایی بالا را مورد بحث قرار داده اند. Sabireen H و همکاران [۲۵]، روش‌های محاسباتی مختلف، ویژگی های رایانش مه، معماری مرجع عمیق مه با سطوح مختلف آن، تجزیه و تحلیل دقیق مه با اینترنت اشیا، الگوریتم های مختلف سیستم مه و همچنین به طور سیستماتیک چالش ها در رایانش مه را که به عنوان یک لایه ی میانی بین حسگرها یا دستگاه های اینترنت اشیاء و مراکز داده ابری عمل می کند، بررسی کرده اند. Roberto Morabito و همکاران [۲۶]، روندی را به سمت استفاده از فناوری‌های مجازی‌سازی سبک در رایانش لبه اینترنت اشیاء متصور می‌شوند. راه‌حل‌های نرم‌افزاری نوظهور می‌توانند پشتیبانی مورد نیاز را از نظر انتزاع سخت‌افزاری، قابلیت برنامه‌ریزی، قابلیت همکاری و کشش فراهم کنند. یک مزیت مستقیم که از به‌کارگیری مجازی‌سازی سبک در حوزه لبه اینترنت اشیاء به دست می‌آید، اجتناب از وابستگی شدید به هر فناوری یا مورد استفاده معین است. در یک نمونه مجازی‌سازی سبک، چه یک کانتینر یا یک هسته، می‌توان به طور مؤثر برنامه‌هایی را که برای مدیریت و استفاده از فناوری‌های بسیار متفاوت طراحی شده‌اند، مستقر کرد. علاوه بر این، تجهیز عناصر لبه با سرویس‌های جدیدتر آسان‌تر می‌شود، زیرا فقط به پیکربندی و نمونه‌سازی برنامه‌های کاربردی مجازی‌سازی‌شده مستقل نیاز

[15] The placement and scheduling algorithms
[16] Lightweight virtualization
[17] Fog nodes

است. این ویژگی از برنامه‌ریزی مجدد و عملیات به‌روزرسانی پیچیده که بخشی از مدیریت چرخه عمر نرم‌افزار است جلوگیری می‌کند. از طریق مجازی‌سازی سبک، چنین پیچیدگی دور زده می‌شود، زیرا به‌روزرسانی یک سرویس خاص فقط در یک نمونه مجازی خاص نیاز به تغییرات دارد. برای تقویت یکپارچگی با ابر، مجازی‌سازی سبک همچنین می‌تواند استقرار چند پلتفرمی را فعال کند، که اجازه می‌دهد یک محیط اجرای مشترک در سراسر ابر، عناصر لبه و حتی دستگاه‌های محدود شده اینترنت اشیا ایجاد کند. در ادامه، این مقاله به بیان معیارهای کمی و تفاوت های معماری بین فناوری های کانتینرها و یونیکرنل ها می‌پردازد. چند مورد استفاده از ادغام مجازی‌سازی سبک در رایانش لبه در پلتفرم‌های خودرو، شهر هوشمند و واقعیت افزوده را بیان می‌کند. اهمیت مجازی‌سازی در سناریوهای وسایل نقلیه در گذشته به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است. رایانش ابری خودرویی[۱۸] یک مدل معماری کارآمد را در پشتیبانی از اینترنت وسایل نقلیه[۱۹] نشان می‌دهد رایانش لبه خودرویی[۲۰] می‌تواند با الزامات سخت‌گیرانه برنامه‌های V2X[۲۱] کنار بیاید و به قابلیت‌های پردازشی رو به رشدی که بازیگران مختلف در اینترنت وسایل نقلیه شامل می‌شوند، از جمله واحدهای داخلی خودرو، عناصر لبه و خدمات ابری. در محیط‌های رایانش لبه خودرویی واحدهای مختلفی می توانند نقش عناصر لبه را ایفا کنند. ایستگاه‌های پایه، دروازه‌های اینترنت اشیاء و سایر وسایل نقلیه می‌توانند با اجرای وظایف خاص، از جمله عملیات سبک‌وزن داده‌کاوی، پردازش بارگذاری عمومی، فیلتر کردن تصویر داشبورد و غیره، به‌عنوان عناصر لبه عمل کنند. هدف V2X شامل تخلیه محاسباتی، برون سپاری کار و عملیات مدیریت نرم‌افزار است. در عمل، یک واحد داخلی خودرو مجهز به مجازی‌سازی سبک می‌تواند یک وظیفه خاص صادر شده توسط وسیله نقلیه دیگر یا هر عناصر لبه دیگر را اجرا کند و بالعکس. از طریق یک ماشین مجازی معمولی، سازندگان خودرو می‌توانند به تمام حسگرهای باس شبکه کنترل از طریق واحد داخلی خودرو و دوربین داشبورد دسترسی داشته باشند. پایش آلودگی هوا با استقرار پراکنده واحدهای اندازه گیری ثابت و گران قیمت که هم حسگرها و هم واحدهای محاسباتی را تعبیه کرده اند، به دست می آید. ازدحام[۲۲] را به عنوان یک راه‌حل ملموس که ترکیبی از مجازی سازی سبک و رایانش لبه است، در نظر می‌گیرند. مجازی‌سازی اجازه می‌دهد تا بخشی از محاسبات ریاضی مورد نیاز بر روی عناصر لبه بارگذاری و توزیع و اجرا شود بدون اینکه نگران مسائل سازگاری باشند. استفاده از مجازی‌سازی در زمینه‌ی واقعیت افزوده با عوامل چند اجاره (یعنی چندین کاربر که چندین کار را انجام می دهند) و جداسازی کار برای حفظ حریم خصوصی همراه است. برای این مورد خاص، ترکیبی از Docker و Unikernel یک رویکرد بالقوه را نشان می‌دهد. یک تصویر Docker حاوی چندین یونیکرنل می‌تواند ساخته و ارسال شود که هر کدام یک وظیفه واقعیت افزوده متفاوت را نشان می‌دهند. بنابراین، تصویر Docker می‌تواند رابط برنامه کاربردی هماهنگ‌سازی و کنترل را به برنامه‌های خارجی ارائه دهد. در آخر مقاله [۲۶] چالش‌های فنی برای ادغام مجازی سازی سبک در رایانش لبه اینترنت اشیاء بیان می‌شود که عبارتند از: سازماندهی و نظارت، امنیت و حریم خصوصی،معیارها و مقررات،کشسانی در ارائه خدمات، چارچوب‌های مدیریتی و پورت کاربردی، ذخیره داده، آمادگی و چشم انداز صنعت. در هیچ کدام از مقالات مروری که ذکر شد؛ به طور خاص به

[18] Vehicular cloud computing
[19] Internet of vehicles
[20] Vehicular edge computing
[21] Vehicle to every thing
[22] Crowdsensing

موضوع مجازی‌سازی در رایانش مه/لبه نپرداخته است؛ اما گزارش مروری پیش رو به طور ویژه و خاص به بیان مجازی‌سازی در رایانش مه/لبه و روش‌ها و راه‌حل‌های پیشرفته در این موضوع که خود از مزیت‌های این گزارش می‌باشد پرداخته است.. در جدول ۱ لیست مقالات مرتبط به همراه زمینه اصلی و سال‌های تحت پوشش هر کدام بیان شده است.

جدول ۱: مقالات مروری مرتبط با مجازی‌سازی در رایانش مه/ لبه

مراجع	زمینه اصلی	ناشر	سال انتشار	سال‌های تحت پوشش
Zeyi Tao و همکاران	مدیریت ماشین مجازی در رایانش لبه	IEEE	۲۰۱۹	۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹
M. Sri Raghavendra و همکاران	مجازی‌سازی سبک وزن برای گره‌های مه	IEEE	۲۰۱۸	۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷
Sabireen H و همکاران	معماری مرجع و الگوریتم های سیستم مه	Elsevier	۲۰۲۱	۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸
Roberto Morabito و همکاران	کانتینرها و یونیکرنل‌ها	IEEE	۲۰۱۸	۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷

با توجه به مقالات بررسی شده و کمبودهای موجود، به این نتیجه رسیدیم که یک بررسی جامع برای رفع این نقاط ضعف به شرح زیر ارائه دهیم:

- ✓ مقالات حاضر هیچ ارزیابی تحلیلی و طبقه‌بندی برای روش‌های مجازی‌سازی در رایانش مه/لبه ارائه نمی‌دهد.
- ✓ برخی مقالات عوامل مهم ارزیابی را در رویکردهای مجازی‌سازی مه/لبه را ارزیابی نکرده‌اند.
- ✓ ساختار مقالات ارائه شده ترتیب منظمی ندارند و روش انتخاب مقاله در آن مشخص نیست.

۳. ادبیات تحقیق

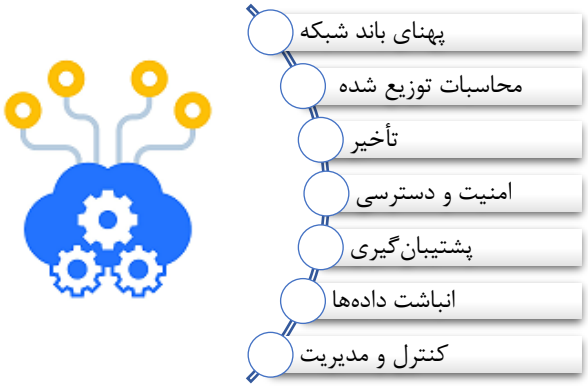
در این بخش به معرفی چالش‌ها، مزایا، معایب و ابزارهای مجازی‌سازی در رایانش مه/لبه می‌پردازیم.

۳-۱ چالش‌های مجازی‌سازی در رایانش مه/لبه

رایانش مه یک الگوی محاسباتی مبتنی بر شبکه است که به بخش‌های اساسی فرآیندهای محاسباتی اجازه می‌دهد تا به نقطه‌ای نزدیک کاربر منتقل شوند و از این رو خدمات ارائه‌شده به صورت محلی را تقلید می‌کند که کیفیت تجربه[۲۳] کاربران را در بسیاری از ابعاد مانند زمان پاسخ و در دسترس بودن بهبود می‌بخشد و باعث دستیابی به هدف کیفیت خدمات[۲۴]می‌شود. رایانش لبه شکلی از محاسبات است که در محل یا نزدیک یک منبع داده خاص انجام می‌شود و نیاز به پردازش داده‌ها در یک مرکز داده از راه دور را به حداقل می‌رساند. رایانش لبه اساساً زیر مجموعه‌ای از رایانش مه است و به داده‌هایی اشاره دارد که در نزدیکی محل ظهور پردازش می‌شوند. رایانش مه امکان پردازش مؤثرتر داده‌ها را فراهم می‌کند و در نتیجه احتمال تأخیر داده‌ها را کاهش می‌دهد. رایانش مه را به عنوان راهی برای پردازش داده‌ها از جایی که تولید می‌شود تا جایی که ذخیره می‌شود در نظر می‌گیرند. رایانش لبه فقط به پردازش داده‌ها نزدیک به محل تولید آن اشاره دارد. رایانش مه، پردازش لبه و اتصالات شبکه مورد نیاز برای انتقال داده‌ها از لبه به

[23] Quality of experience
[24] Quality of service

انتهای آن را در بر می‌گیرد. با رایانش لبه، دستگاه‌های اینترنت اشیاء به دستگاه‌هایی مانند کنترل‌کننده های اتوماسیون قابل برنامه‌ریزی متصل می‌شوند. کنترل‌کننده‌های اتوماسیون پردازش داده، ارتباطات و سایر وظایف را انجام می‌دهند. با رایانش مه، داده‌ها از نقاط پایانی به یک دروازه[۲۵] منتقل می‌شوند. سپس داده‌ها برای پردازش و برگشت به منابع منتقل می‌شوند. زیرساخت‌های توزیع شده جغرافیایی با سرویس‌های ابری هماهنگ شده است تا تجزیه و تحلیل داده‌ها را با حداقل تأخیر فعال کند. هم مه و هم رایانش لبه به تبدیل سریع‌تر داده‌ها به بینش عملی کمک می‌کنند تا کاربران بتوانند تصمیمات سریع‌تر و آگاهانه‌تری بگیرند. سپس، مه و لبه به شرکت‌ها این امکان را می‌دهند که از پهنای باند به طور مؤثرتری استفاده کنند و در عین حال امنیت را افزایش دهند و نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی را برطرف کنند. از آنجایی که گره‌های مه را می‌توان در هر جایی که اتصال شبکه وجود دارد نصب کرد. رایانش مه در کاربردهای صنعتی اینترنت اشیاء در حال افزایش است. شکل ۱ چالش‌هایی که شرکت‌ها در رایانش لبه با آن سر و کار دارند را نشان می‌دهد.

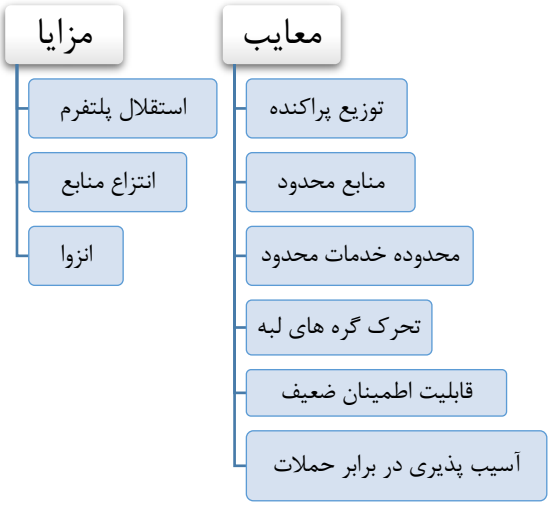


شکل ۱: چالش های موجود در رایانش لبه

۳-۲ مزایا و معایب مجازی‌سازی در مه/ لبه

رایانش ابری بر اساس چندین فناوری اساسی از جمله مجازی‌سازی، ذخیره انبوه توزیع شده و مدل‌های برنامه‌ریزی موازی ساخته شده است. در میان این فناوری‌ها، مجازی‌سازی نقش مهمی در تأمین منابع، زمان‌بندی وظایف و جعبه‌بندی محاسباتی در محیط‌های رایانش ابری دارد. اگرچه رایانش لبه بر روی سخت‌افزار با قدرت کم ساخته شده است، اما با چالش‌هایی مشابه رایانش ابری در مدیریت موثر منابع سخت‌افزاری مواجه است. بنابراین، رایانش لبه نیز از مجازی‌سازی به عنوان یکی از فناوری‌های اساسی خود استفاده می‌کند[۲۳]. در سطح بالایی، فناوری مجازی‌سازی، صرف نظر از شکل ماشین‌های مجازی یا کانتینرها، مزایا و معایبی دارد که در شکل ۲ آورده شده است. چارچوب‌های مبتنی بر مجازی‌سازی برای رایانش لبه با چندین چالش کلیدی مواجه است. در ادامه، چالش‌ها و همچنین تکنیک‌های مرتبط را که می‌توان برای ایجاد راه‌حل برای چالش‌ها استفاده کرد، در جدول ۲ خلاصه شده است.

[25] Gateway



شکل ۲: مزایا و معایب مجازی‌سازی در مه/ لبه

جدول ۲: چالش‌ها و راه‌حل‌های مجازی‌سازی در رایانش لبه

چالش	راه‌حل
ردپای بزرگ منابع ماشین‌های مجازی	روش‌های مجازی‌سازی سبک‌تر مانند هسته‌های واحد
حجم بزرگ داده ماشین‌های مجازی	کاهش حافظه و کاهش اندازه داده‌های ارسالی مانند حذف داده‌ها و فتوسنتز ماشین مجازی
مسائل امنیتی	حسابرسی محاسباتی و رمزگذاری هوموروفیک

۳-۳ ابزارهای مجازی‌سازی در رایانش مه/لبه

یکی دیگر از حوزه‌های مجازی‌سازی در رایانش لبه، مجازی‌سازی شبکه است. برنامه‌های کاربردی نوظهور در رایانش لبه، مانند برنامه‌های کمک شناختی، معمولاً به پهنای باند بالا، تأخیر کم و همچنین پیکربندی‌های شبکه پویا نیاز دارند. شبکه‌های قابل تنظیم در لبه‌ای که در آخرین مایل شبکه قرار دارد و با انواع مختلف برنامه‌های تلفن همراه مواجه است، بسیار چالش برانگیزتر می‌شود. شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده[۲۶] سیاست‌های شبکه بسیار سفارشی‌سازی شده‌ای را ارائه می‌کنند که می‌تواند الزامات پیچیدگی رو به رشد سریع گونه‌شناسی شبکه و طرح‌های مسیریابی را برآورده کند. شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده یک معماری نوظهور است که پویا، قابل مدیریت، مقرون به صرفه و قابل انطباق است و آن را برای پهنای باند بالا و ماهیت پویا برنامه‌های کاربردی امروزی عالی می‌کند. این معماری عملکردهای کنترل و ارسال شبکه را جدا می‌کند. روش‌های ماشین مجازی نیز نقش مهمی در

[26] Software definded networking

معماری شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده دارند. NetVM پلتفرم ماشین مجازی را برای مجازی‌سازی کارت رابط شبکه بازسازی می‌کند، که عملکرد بسیار بهتری نسبت به پلتفرم‌های ماشین مجازی سنتی برای میزبان تک و غیر مجازی دارد. کارت رابط شبکه را هدایت می‌کند، بسته‌ها را در داخل یک هایپروایزر سفارشی شده ارسال می‌کند و به هر ماشین مجازی اجازه می‌دهد تا منابع شبکه را از طریق یک صفحه بزرگ در هایپروایزر به اشتراک بگذارد، بنابراین هزینه سربار کپی داده‌های بسته در لایه‌های مختلف سیستم را کاهش می‌دهد. این طرح امکان تحویل صفر کپی داده از کارت رابط شبکه به ماشین مجازی را فراهم می‌کند، که به طور قابل توجهی توان عملیاتی صفحه داده را در معماری شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده بهبود می‌بخشد. یکی از محدودیت‌های راه حل‌های شبکه مبتنی بر شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده این است که به پشتیبانی سخت‌افزاری نیاز دارد. هنوز دستگاه‌های شبکه‌ای هستند که شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده در لبه شبکه‌ها فعال نیستند. این راه‌حل‌های مبتنی بر شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده را نمی‌توان در این دستگاه‌ها مستقر کرد. به‌روزرسانی دستگاه‌های شبکه می‌تواند این مشکل را حل کند، اما گاهی اوقات هزینه زیادی برای به‌روزرسانی آن دستگاه‌ها لازم است. تا به امروز، چندین پروژه پیشگام در صعنت و دانشگاه‌ها پیشنهاد شده است که هدف آن‌ها ساخت چارچوب‌های رایانش لبه همه منظوره است که لیستی از آن‌ها را در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: پروژه‌های پیشگام رایانش لبه در صنعت و دانشگاه

نام ابزار	دانشگاه	صنعت
Open stack		✓
Paradrop	✓	
Focus Stack	✓	
KubeEdge		✓
OpenEdge		✓
Airbox		✓

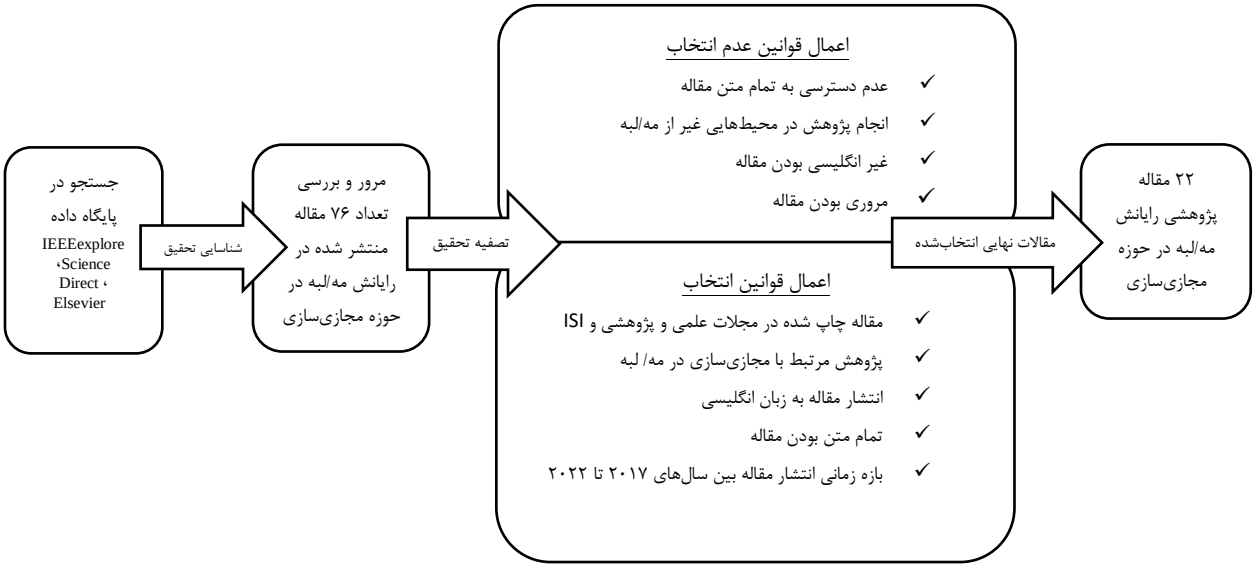
۴. روش تحقیق

در این بخش، روش تحقیق و انتخاب مقالات آورده شده است. مقالات در زمینه مجازی‌سازی مه/لبه، از پایگاه داده‌های علمی معتبر دنیا از جمله IEEExplore ، Science Direct ، Elsevier و برخی دیگر، به زبان انگلیسی چاپ شده در داخل یا خارج از کشور، در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ جمع آوری شده است تا به نتیجه‌گیری جدیدتری از پژوهش‌ها دست یابیم. مقالات مورد بررسی از طریق موتور جستجو یا جستجوی مستقیم در پایگاه داده با عبارت‌های کلیدی " computing + fog + edge + virtualization" در عنوان و چکیده مقالات جمع‌آوری شده‌است. در ادامه معیارهای انتخاب و عدم انتخاب مقالات آورده شده است:

معیارهای انتخاب مقاله: ۱- مقاله چاپ شده در مجلات علمی_پژوهشی و ISI ،۲- پژوهش مرتبط با مجازی‌سازی در مه/لبه،۳- انتشار مقاله به زبان انگلیسی،۴- تمام متن بودن مقاله، ۵- بازه زمانی انتشار مقاله بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲.

معیارهای عدم انتخاب مقاله : ۱- عدم دسترسی به تمام متن مقاله،۲- انجام پژوهش در محیط‌هایی غیر از مه/لبه، ۳- غیر انگلیسی بودن مقاله، ۴- مروری بودن مقاله.

نتایج این جستجو با عبارت‌های کلیدی مذکور، دستیابی به ۷۶ مقاله پژوهشی مرتبط با موضوع بود که، از این میان، ۲۲ مقاله، دارای معیارهای انتخاب مقالات بوده و به عنوان مقاالات پژوهشی، انتخاب گردیدند. متن کامل تمام این مقالات، مطالعه و مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۳، معیارهای انتخاب مقالات پژوهشی را نشان می‌دهد.

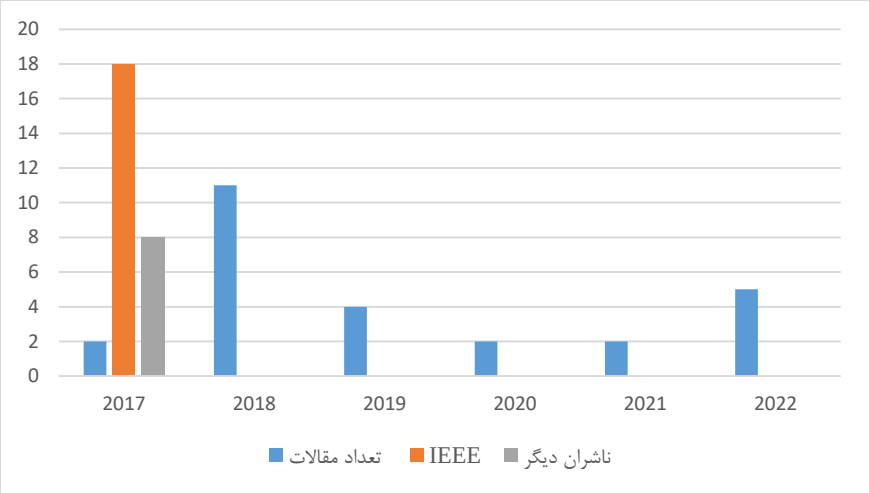


شکل۳: دیاگرام انتخاب مقالات پژوهشی

نتایج این جستجو دستیابی به ۷۶ مقاله مرتبط با موضوع بود که از این میان ۵۴ مقاله به علت فقدان معیارهای ورود، حذف و نهایتا ۲۲ مقاله در محدوده ۲۰۲۲-۲۰۱۷ وارد پژوهش شدند. پس از حذف مقالاتی که معیارهای انتخاب مطالعه را نداشتند، متن کامل تمام مقالاتی که واجد معیارهای انتخاب مطالعه بودند، تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. پاسخگویی به سوالات زیر، محور بررسی مقالات این پژوهش است.

۱. موضوعات اصلی در مجازی‌سازی در رایانش مه/ لبه کدامند؟
۲. معیارهای ارزیابی در مقالات در مجازی سازی در رایانش مه/ لبه کدامند؟
۳. از چه محیط های ارزیابی در موضوع " مجازی سازی رایانش مه/ لبه" استفاده شده است؟
۴. حوزه کاربرد مجازی‌سازی مه/لبه کدامند؟
۵. کدام کلمات کلیدی در پژوهش‌ها و مقالات مربوط به مجازی‌سازی در مه/لبه پرکاربرد هستند؟
۶. چالش و مسائل موجود در زمینه مجازی سازی رایانش مه/ لبه کدامند؟

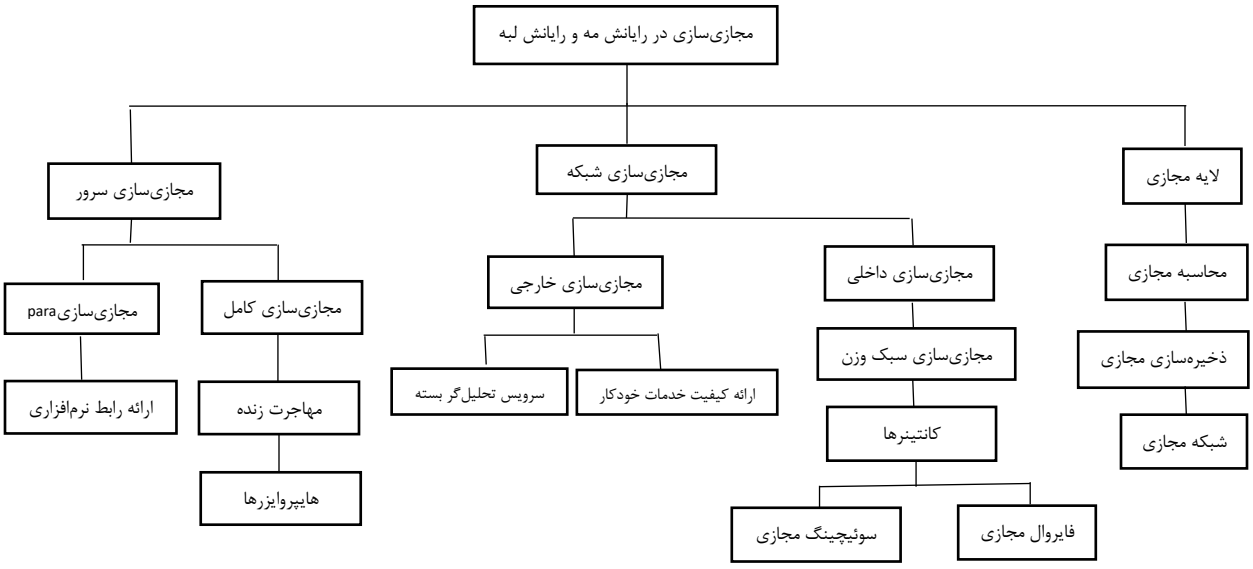
شکل ۴، توزیع مقالات و پژوهش انتخاب شده در این مقاله را که توسط ناشران برجسته علمی منتشر شده‌اند، نشان می‌دهد. در مورد تعداد مقالات منتشر شده، فقط مقالات مجله و مقالات کنفرانس را که در ISI ،نمایه شده‌اند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند و نهایتا تعداد ۲۲ مقاله را برای تجزیه، تحلیل و پاسخگویی به سؤالات تحلیلی ذکر شده که به طور مفصل در بخش ۷ ارائه شده‌اند، انتخاب کردیم.



شکل ۴: دسته بندی مقالات پژوهشی بر اساس سال انتشار و ناشر

۵. بررسی، مرور و دسته بندی مقالات پژوهشی انتخاب شده

این بخش چگونگی بررسی فنی مقالات انتخاب شده در خصوص مجازی‌سازی در رایانش مه/ لبه را ارائه می دهد. شکل ۵ طبقه‌بندی جامعی را در مورد رویکردها و روش‌های مجازی‌سازی در رایانش مه/ لبه نشان می‌دهد.



شکل ۵: طبقه‌بندی رویکردها و روش‌های مجازی‌سازی در رایانش مه/ لبه

در [۱]، روشی را برای قرار دادن واحدهای ارسال انتخابی[۲۷] مجازی در لبه‌های شبکه با استفاده از مراکز داده لبه برای بهینه‌سازی تأخیر و استفاده از منابع شبکه کلی ارائه شده است. یک معماری نیز برای مدیریت خدمات WebRTC چند جانبه در ابرهای لبه پیشنهاد می‌شود. مزیت اصلی چارچوب پیشنهادی لبه توزیع‌شده واحد ارسال انتخابی این است که هر جریان ویدیوی همتا کوتاه‌ترین مسیر را مشابه مدل اتصال مش طی می‌کند، در حالی که هر همتا یک جریان ویدیوی واحد را در لبه واحد ارسال انتخابی خود بارگزاری می‌کند. علاوه بر این، تضمین پهنای باند را می‌توان در شبکه‌های دسترسی با استفاده از برش شبکه به کمک شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده در ابرهای لبه ارائه کرد. یک معماری سرویس WebRTC توسط ارائه‌دهندگان خدمات شبکه[۲۸] و یا شخص ثالث مجاز آن‌ها بر روی برش‌های شبکه رزرو شده با منابع ارائه می‌شود. معماری پیشنهادی شامل یک سرور سیگنال اصلاح شده و یک مدیر سرویس NSP-WebRTC است. نتایج شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ نشان می‌دهد، در صورتی که همه همتایان به یک واحد ارسال انتخابی متصل شوند، آن واحد را در لبه شبکه قرار می‌دهند، جایی که حداقل یکی از همتایان در آن ساکن است، میانگین حداکثر تأخیر را در مقایسه با قرار دادن واحد ارسال انتخابی به عنوان یک سرویس ابری در هر نقطه از شبکه، با استفاده از چندین سرور واحد ارسال انتخابی، که در آن هر همتا به واحد ارسال انتخابی در دامنه لبه خود برای ارسال متصل می‌شود، محاسبه شده است و نتیجه ارزیابی به این صورت است که جریان خروجی آن تأخیر کمتری را فراهم می‌کند. علاوه بر این، استفاده از واحدهای ارسال انتخابی متعدد منجر به کمترین مصرف کلی منابع شبکه برای هر نشست[۲۹] WebRTC می‌شود. سرویس چندگانه واحد ارسال انتخابی پیشنهادی هم برای کاربران نهایی تأخیر کمتر و هم برای ارائه‌دهندگان خدمات شبکه استفاده کمتر از منابع شبکه را به همراه دارد و هیچ تفاوتی در کیفیت ویدیوی دریافتی برای پیکربندی‌های مختلف واحد ارسال انتخابی وجود ندارد. در [۲]، معماری استاندارد رایانش لبه با دسترسی چندگانه[۳۰] مجازی توسط مؤسسه استانداردهای ارتباطات از راه دور اروپا[۳۱]برای دستیابی به ایجاد مدیریت پیکربندی مطابق با تقاضای شبکه 5G نسل بعدی پلتفرم مجازی‌سازی عملکرد شبکه[۳۲]، ارائه تقویت پلت فرم برنامه اینترنت اشیاء و اجرای مکانیزم کنترل جریان پیشنهاد شده است. رایانش لبه با دسترسی چندگانه مجازی اطلاعاتی را در لبه شبکه تلفن همراه فراهم می‌کند که تأخیر را کاهش می‌دهد و ظرفیت موجود را افزایش می‌دهد. با توسعه متنوع برنامه های کاربردی شبکه، استفاده پیشنهادی رایانش لبه با دسترسی چندگانه مجازی از فناوری مجازی سازی مبتنی بر کانتینر به عنوان دروازه با دستگاه های اینترنت اشیاء برای مکانیسم کنترل جریان در روش های زمان بندی و تجزیه و تحلیل، به طور موثر کیفیت خدمات کاربردی را افزایش می دهد. [۲] اثر ترکیبی استقرار همزمان توابع شبکه مجازی[۳۳] و برنامه‌های رایانش لبه با دسترسی چندگانه مجازی بر روی یک زیرساخت شبکه واحد و به طور بحرانی در تأثیرگذاری، تأخیر کم، پهنای باند بالا و چابکی را نشان می‌دهد که قادر به اتصال دستگاه‌ها در مقیاس بزرگ خواهد بود. در [۲] از تکنیک مهندسی ترافیک مبتنی بر جریان برای مدل سازی سیستم به کار

[27] Selective forwarding units
[28] Network service providers
[29] Session
[30] Multi_access edge computing
[31] European telecommunications standards institude
[32] Network function virtualization
[33] Virtual network function

برد. بستر شبکه اینترنت اشیا که از گره‌های حسگر، دروازه اینترنت اشیا و سرور ابری به دست می‌آید، می‌تواند برنامه‌های شبکه اینترنت اشیا و تجزیه و تحلیل مکانیسم کنترل جریان را ارائه دهد. بنابریان استراتژی‌های کنترل ترافیک ارائه‌شده در این مطالعه به‌طور مؤثری تأخیر اینترنت اشیا را کاهش می‌دهد، کیفیت تجربه را بهبود می‌بخشد و ازدحام شبکه را با سرویس برنامه کاربردی اینترنت اشیا کاهش می‌دهد، در حالی که از حالت‌های تقسیم متفاوت استفاده می‌کند. در [۲] از نرم‌افزار منبع باز و یک پلت فرم سخت افزاری برای ساخت یک پلت فرم مجازی سازی شبکه استفاده شده است. ویژگی‌های استقرار آسان مرکز تماس ابری برنامه محور سپس برای بهبود پلت فرم خدمات برنامه مدیریت پیکربندی استفاده می‌شود و امکان استقرار سریع خدمات برنامه‌های کاربردی شبکه را بر روی یک پلت فرم مجازی می‌دهد. به طور کلی پلتفرم پیشنهادی به طور مؤثر از منابع رایانش لبه و رایانش ابری بهره‌برداری می‌کند و از برنامه‌های اینترنت اشیا استفاده می‌کند که با شرایط شبکه تطبیق داده شده‌اند تا به طور متوسط ۳۰ درصد از تأخیر شبکه انتها به انتها[۳۴] را کاهش دهند. در [۳]، یک معماری مرجع شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده/ مجازی سازی عملکرد شبکه[۳۵] یکپارچه با استفاده از منابع یکپارچه ابر، مه و شبکه پیشنهاد شده است. وظیفه شبکه های مه این است که هر جزء از معماری مه را به طور یکپارچه به هم متصل کنند. با این حال، مدیریت چنین شبکه پیچیده، حفظ اتصال و ارائه خدمات بر اساس تقاضا، به ویژه در برنامه های کاربردی در مقیاس بزرگ اینترنت اشیا، بسیار پیچیده است. بنابراین [۳] یک معماری جدید معرفی می‌کند که برای مقابله با پیش‌بینی و حفظ نمودار اتصال شبکه، طراحی سیستم شبکه مبتنی بر نرم افزار توزیع‌شده که الزامات رایانش مه را برآورده می‌کند، پیاده‌سازی و مدیریت کانتینرهای عملکرد شبکه مجازی از طریق شبکه، و هماهنگ‌سازی این مؤلفه‌ها با هم، مورد نیاز است. یک چالش عمده تحمیل شده توسط رایانش مه به معماری مرجع یکپارچه شبکه و هماهنگ‌سازی خدمات اشاره دارد. ارکستراسیون شامل نمونه سازی خودکار، تکثیر و مهاجرت نمونه های سرویس بر روی حجم زیادی از گره های مه و نمونه های ابری با طیف وسیعی از قابلیت‌ها است. بنابراین، یک معماری لایه‌ای از انتها به انتها برای ارائه خدمات اتصال سرتاسر ماشین‌های مجازی یا کانتینرهای واقع در مکان‌های مختلف شبکه که از طریق شبکه‌های ناهمگن چند دامنه‌ای چند لایه به هم متصل شده‌اند، پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، تصمیم طراحی کنترل‌کننده شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده سلسله مراتبی که کنترل‌کننده‌های شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده فدرال نامیده می‌شود، برای افزایش مقیاس‌پذیری، قابلیت اطمینان، حریم خصوصی و پشتیبانی از استقرار تدریجی در شبکه طراحی شده است. در واقع این مقاله از تکنیک های مجازی‌سازی شبکه و سرور برای ایجاد اجزاء یک شبکه مه مجازی پویا، چابک و منعطف استفاده می‌کند. در[۴]، سه نوآوری را برای تقویت مه پیشنهاد شده است: (۱) یک سیاست ارکستراسیون جدید، (۲) ایجاد صورت فلکی از گره‌ها، و (۳) مجازی‌سازی عملکرد مه[۳۶]. رایانش مه یک معماری برای برآورده کردن برخی از عوامل حیاتی اینترنت اشیاء مانند ماهیت بلادرنگ و توزیع شدگی اشیاء است و این کار را از طریق گره هایی که از نزدیک اشیاء تا لبه قرار دارند انجام می‌دهد. مشکل، ادغام گره های مه در زیرساخت های فعلی است. این فرآیند مستلزم توسعه راه حل های نرم افزاری پیچیده است و از رشد مه جلوگیری می‌کند. سه نوآوری که این مقاله ارائه می‌دهد مه را برای دستیابی به

[34] End_to_end network
[35] Network function virtualization
[36] Fog function virtualization

پتانسیل واقعی خود به عنوان یک پلتفرم مقیاس پذیر عمومی که چندین برنامه اینترنت اشیا را به طور همزمان اجرا می‌کند، تکمیل می‌کند. استقرار یک سرویس جدید به توسعه کد برنامه کاهش می یابد و سهولت استقرار و کاهش هزینه در رایانش مه را به ارمغان می‌آورد. نوآوری اول یک ارکستراتور توزیع شده است که پیشنهاد می‌کند که برنامه‌ها را در راحت ترین لایه بدون تصمیم از پیش تعیین شده اجرا کنید. اگر لایه‌های مه برای اجرای بارهای کاری انتخاب شوند، ارکستراتور پارامترهای مختلفی را در نظر می‌گیرد تا تصمیم بگیرد کدام گره‌های مه مسئول هر کار هستند. این پارامترها شامل نزدیکی جغرافیایی، ازدحام، قابلیت‌های گره و الزامات کاربردی است. دو پارامتر آخر تصمیم را هدایت می کنند. اگر یک گره منابع مورد نیاز را نداشته باشد، به طور خودکار کنار گذاشته می‌شود. هنگامی که این فرآیند تطبیق حل شد، توزیع عادلانه بین گره های مختلف اساسی می شود. سیستم برای تخصیص برنامه‌های پویا اینترنت اشیاء در حالی که اجرای سرویس‌های استاتیک ادامه دارد به منابع رایگان نیاز دارد. به موازات آن، می تواند از دید گره به نفع خود سوء استفاده کند. اگر برنامه ای تحت یک گره مه منحصر به فرد اجرا شود، نیازی به انتقال آن به گره های بالاتر نیست.. اکنون داده ها نزدیک به جایی که تولید و مصرف می شوند پردازش می‌شوند. در نتیجه، تجمع در لایه‌های پایین‌تر سلسله مراتب صورت می‌گیرد و ترافیک غیرضروری را حذف می‌کند و پهنای باند را کاهش می‌دهد، زیرا فقط داده‌های ضروری به لایه‌های بالاتر ارسال می‌شوند ولی انتقال داده از میلیاردها "شیء" به ابر ممکن است مشکلات ساختاری را برای زیرساخت‌های اساسی ایجاد کند. اصلاح ارکستراتور به مشکل دیگری منجر شد، منابع موجود در سطح مه مانند ابر نیست. گره‌های مه مجموعه‌ای از دستگاه‌های ناهمگن هستند که از نظر جغرافیایی توزیع شده اند. برخی از این گره‌ها دستگاه‌های پیچیده با قابلیت‌های زیاد هستند (سرور) در حالی که برخی دیگر بسیار ساده هستند (دروازه) از این رو، زیرساخت ممکن است قابلیت های لازم را در مکان مورد نظر برای اجرای یک سرویس نداشته باشد. برای جلوگیری از ارسال این بارهای کاری به ابر یا استقرار غیرضروری دستگاه های بیشتر، پیشنهاد ایجاد صورت فلکی از گره های مه است. تجمیع قابلیت‌های گره‌ها، درک منابع بزرگ‌تری را به کاربران نهایی می‌دهد، اگرچه هنوز از منابع ابر فاصله دارند. این مجموعه‌های بزرگ‌تر از منابع هزینه تأخیر دارند زیرا به گره‌های توزیع شده متکی هستند. در اینجا یک مبادله بین تأخیر صورت فلکی و ابر وجود دارد. اگر گره‌های مه از محل خود برای ایجاد این گروه‌بندی‌ها سوء استفاده کنند، تأخیر آنها باید کمتر از ابر باشد. با این حال، در شرایط خاصی که گره‌های بیشتری مورد نیاز است، ابر ممکن است به عنوان یک راه حل عملی ظاهر شود. ایده به اشتراک گذاری منابع در محیط‌های دیگری مانند موبایل نیز ارائه شد. آن‌ها قابلیت‌های دستگاه‌های کاربر را بدون گنجاندن گره‌های سیستم در ابرهای محلی خود ترکیب می‌کنند و مزایای آن را کاهش می‌دهند. در مقابل، صورت‌های فلکی بر گره‌های مه از لایه‌های مختلف تمرکز می‌کنند و مجازی‌سازی راهی برای ایجاد و ارائه آن‌ها می‌شود. از طریق مجازی‌سازی، صورت های فلکی نیز دید مالکان متعدد را از بین می‌برند. برنامه‌ها قابلیت‌ها را بر اساس هر صورت فلکی و نه برای هر گره به صورت جداگانه مشاهده می‌کنند. این گروه‌بندی‌های مجازی همچنین امنیت را افزایش داده و از ایزوله شدن بین برنامه‌هایی که در همان گره‌های مه اجرا می‌شوند اطمینان می‌دهند. معیار تشکیل گروه بندی‌ها می‌تواند مجاورت یا افزودن یک قابلیت خاص مانند شتاب‌دهنده‌های سخت افزاری باشد. پس از تشکیل گروه‌بندی‌ها، صورت‌های فلکی می‌توانند خواسته های تعیین شده کاربر را بر اساس بحرانی بودن برنامه اولویت بندی کنند. علاوه بر این، گره های مه که یک صورت فلکی را تشکیل می دهند، به دلیل تحرک

دستگاه‌ها به صورت پویا تغییر می‌کنند. این مقاله بر اساس مفهوم مجازی‌سازی عملکرد شبکه، آن را از طریق تعریف مفهوم مجازی‌سازی عملکرد مه برای محاسبات اینترنت اشیاء و مه اعمال کرده است. با این توابع، یک معماری مبتنی بر مه قابلیت‌های آن‌ها را به‌عنوان ویژگی‌های سطح بالا، بدون توجه به اهداف هر برنامه، به نمایش می‌گذارد. محاسبات و ذخیره‌سازی را می‌توان به‌عنوان توابع، و همچنین عملکردها و تحلیل‌های «اشیاء» کنترل کرد. مجازی‌سازی عملکرد مه نیازهای برنامه‌ها را در قابلیت‌های گره‌های مه و «اشیاء» ترسیم می‌کند. در نتیجه، توسعه برنامه برای انتخاب مجازی سازی عملکرد مه که سرویس مورد نظر را تولید می‌کند کاهش می‌یابد. برای دستیابی به عملکردهای پیچیده، توسعه دهندگان ممکن است زنجیره ای از توابع را انتخاب کنند. به منظور افزایش قابلیت استفاده مجدد توابع، مجازی‌سازی عملکرد مه‌های از قبل موجود، می‌توانند از طریق کتابخانه‌ها در دسترس باشند. هر یک از این توابع دارای مجموعه‌ای از ورودی‌ها هستند (یعنی اندازه‌گیری‌های حسگر)، پردازشی را انجام می‌دهند و یک خروجی (یعنی مقدار متوسط آن‌ها) تولید می‌کنند تا برای لایه‌های دیگر برنامه‌ها استفاده شود. از آنجایی که گره‌های مه بسیار ناهمگن هستند، مجازی‌سازی عملکرد مه ها به دلیل قابلیت‌های گره‌ها قادر به اجرا در همه گره‌های مه نیستند. در صورتی که یک تابع نتواند در گره تعیین شده اجرا شود، گزینه های مختلفی وجود دارد. یکی از این گزینه ها این است که به توسعه دهندگان اطلاع دهد که گره مورد نظر فقط می‌تواند زیر مجموعه ای از زنجیره مجازی سازی عملکرد مه خود را اجرا کند. این تکنیک به گزینه دوم منتهی می‌شود، یعنی انتقال آن واقعیت و همچنین افشای گره‌های دیگری که می‌توانند آن را به صورت یکپارچه با هزینه تأخیر بالاتر اجرا کنند. گزینه سوم از تعریف خود توابع ناشی می‌شود. اگر این توابع به طور کلی تعریف شوند، گره‌ها فقط زیرمجموعه‌ای از تابعی را اجرا می‌کنند که قابلیت‌های گره می‌توانند از عهده آن برآیند. گزینه دیگر شامل توسعه‌دهندگان است که یک تابع از قبل موجود را برای انجام وظیفه مورد نظر در گره های موجود تطبیق می دهند. در نتیجه، مجازی سازی عملکرد مه ها قابلیت همکاری بین بازیکنان مختلف یک سیستم اینترنت اشیا را در حالی که تمام پیچیدگی های خود را برای کاربران پنهان می کنند، امکان پذیر می کند. مجازی سازی عملکرد مه یک معماری پویا ایجاد می‌کند که می‌تواند از مؤلفه ها مجدداً استفاده کند و بنابراین مدل های تجاری جدید را برای سیستم های مبتنی بر مه فعال می‌کند. سپس زمان عرضه به بازار کاهش می‌یابد و موانع برای استقرار جدید حذف می‌شوند، زیرا فقط باید عملکردهای موجود را اجرا کرد. در [۴] نیز مطالعه‌ی موردی در مورد میزان مصرف برق و کنترل دستگاه در خانه‌های خودکار و نقشه آلودگی بلادرنگ انجام شده است. در [۵]، یک معماری جدید پیشنهاد شده است که از ویژگی‌های زنجیره بلوک[۳۷]، رایانش مه و رایانش ابری برای مدیریت داده‌های اینترنت اشیا استفاده می‌کند. زنجیره بلوک اجازه می دهد تا یک شبکه همتا به همتا توزیع شده داشته باشیم که در آن شرکت‌کنندگان غیر قابل اعتماد می توانند بدون واسطه یا شخص ثالث با یکدیگر تعامل داشته باشند. این مقاله ارزیابی می کند که چگونه این مکانیسم برای رویارویی با چالش های اینترنت اشیا با توجه به دسترسی چندگانه به دستگاه های اینترنت اشیا کار می‌کند و یک معماری بلاک چین را در حضور لایه رایانش لبه در نظر می‌گیرد. با رایانش مه، داده‌های حساس را می‌توان به‌جای ارسال به ابر برای تجزیه و تحلیل، به صورت محلی تجزیه و تحلیل کرد. گره‌های لبه همچنین می‌توانند دستگاه‌های اینترنت اشیاء را که داده‌ها را جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و ذخیره می‌کنند، ردیابی

[37] Blockchain

و کنترل کنند. [۵] نشان می‌دهد که وقتی شبکه مبتنی بر نرم‌افزار و مجازی‌سازی عملکرد شبکه برای مدیریت بهینه منابع در فرآیند ادغام می‌شوند، این کنترل می‌تواند بهتر اجرا شود. این مقاله نشان می‌دهد که ادغام زنجیره بلوک، اینترنت اشیاء و رایانش لبه در کنار زیرساخت‌های ابری مجهز به شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده و مجازی سازی عملکرد شبکه می‌تواند به پلتفرم برتر و کارآمدتری برای دسترسی، مدیریت و پردازش هجوم عظیم داده‌های اینترنت اشیا منجر شود. [۵] از دو الگوریتم برای فرآیند دروازه در لایه شبکه رایانش مه استفاده می‌کند. از الگوریتم مرتب‌سازی درج برای مراحل پذیرش تعدادی درخواست از دستگاه‌ها استفاده می‌کند و برای ارزیابی این درخواست ها و اختصاص منابع مناسب برای هر درخواست الگوریتم دیگری درنظر می‌گیرد. معماری پیشنهادی مزایای متعددی مانند پشتیبانی از در دسترس بودن بالا، تحویل بلادرنگ داده، امنیت، مقیاس پذیری بالا، کشش و تاخیر کم را ارائه می دهد. برای سهولت استفاده از سرویس‌های اینترنت اشیا، معماری پیشنهادی می‌تواند تأخیر ارتباط بین دستگاه‌های اینترنت اشیا، توزیع منابع و بارگیری ترافیک در شبکه را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در [۶]، چالش‌های مربوط به ادغام سیستم‌های ابر، لبه و مه در یک پلت فرم یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است. ضمن پرداختن به این چالش‌ها، طراحی اولیه یک معماری پلت فرم یکپارچه که می‌تواند مه و لبه را یکپارچه و متحد کند، پیشنهاد شده است. این مقاله به منظور ارائه نمای کلی از طراحی معماری، موارد استفاده و بسترهای آزمایشی در چارچوب پروژه فاز دوم 5G-PPP با عنوان 5G-CORAL (یک شبکه دسترسی مجازی 5G در لبه) در نظر گرفته شده است. برای پشتیبانی از برنامه‌های 5G (مانند واقعیت افزوده، وسایل نقلیه متصل، عملیات از راه دور و روباتیک) و برآوردن الزامات فنی بسیار چالش‌برانگیز آن‌ها مانند تأخیر سرتاسر زیر ۱ میلی‌ثانیه و قابلیت اطمینان انتقال بسیار نزدیک به یک الگوی شبکه معماری جدید مورد نیاز است. انتظار می‌رود که سیستم 5G طیف وسیعی از خدمات را با نیازهای پهنای باند فشرده و یا حساس به تأخیر ارائه دهد، بنابراین به پهنای باند تلفن همراه محدود نمی‌شود. این خدمات نیازمند قابلیت‌های شبکه، محاسبات و ذخیره‌سازی هستند که نزدیک‌تر به کاربران نهایی، یعنی در لبه شبکه تلفن همراه، ارائه شوند. از اینجاست که داده‌های کاربران منشأ می‌گیرد و باید جمع‌آوری، پردازش و احتمالاً برای سایر کاربران نزدیک ارسال شود، بنابراین به مفهوم لبه هوشمند منجر می‌شود. با استفاده از مجازی سازی عملکرد شبکه، هم عملکردهای شبکه ثابت و هم شبکه تلفن همراه را می‌توان به صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی کرد، از این رو به توابع شبکه مجازی[۳۸] تبدیل می‌شوند تا با بهره‌برداری از فناوری‌های مجازی‌سازی، توسط اپراتور در سرورهای خارج از قفسه کالا[۳۹] نمونه‌سازی شوند. هدف 5G-CORAL، شناسایی و تأیید آزمایشی نوآوری‌های کلیدی فناوری است که امکان توسعه یک فناوری دسترسی چندگانه رادیویی 5G همگرا[۴۰] را بر اساس معماری لبه و مه مجازی شده، مقیاس پذیر، انعطاف پذیر و قابل همکاری با سایر حوزه ها از جمله حمل و نقل، شبکه اصلی و ابرهای دوردست فراهم می‌کند. [۶] به بیان مجموعه‌ای از موارد استفاده مانند ماشین متصل، مرکز خرید و سکوهای قطار پرسرعت نیز پرداخته است. [۷] چارچوبی را برای شبیه‌سازی عملکردهای مجازی سازی عملکرد شبکه در محیط‌های رایانش لبه و ابری پیشنهاد می‌کند. چارچوب شبیه‌سازی خود را با مقیاس‌گذاری خودکار و سیاست‌های قرار دادن زنجیره عملکرد سرویس [۴۱] در محیط‌های یکپارچه لبه و رایانش ابری ارزیابی

[38] Virtual network functions
[39] commodity off-the-shelf
[40] Converged multiple 5G radio access
[41] Service function chaining

می‌کند. نتایج اثربخشی آن را در اندازه‌گیری و ارزیابی تاخیر سرتاسر، زمان پاسخ، استفاده از منابع، ترافیک شبکه و مصرف انرژی با الگوریتم‌های مختلف در هر سناریو نشان می‌دهد و از محیط شبیه سازی Cloud-Sim استفاده می‌کند. [۸] معرفی مختصری از کانتینرها، تعریف ویژگی های آن و موارد استفاده در زمینه این ویژگی ها را ارائه می‌دهد. همچنین به مهاجرت زنده[۴۲] برنامه‌های دولتی از طریق کانتینرها می‌پردازد. کانتینرها مجازی‌سازی را تقریباً در هر سطحی از سلسله‌مراتب ابر و مه ارائه می‌دهند و بنابراین برای استفاده در لبه بسیار مناسب هستند. در مورد مهاجرت، یکی از مسائل فنی که مانع از پذیرش کانتینرها در برنامه های کاربردی فعال می شود، مهاجرت زنده است. راه حل هایی برای جلوگیری از مهاجرت در وهله اول وجود دارد، یعنی تقسیم بهینه حجم کار از ابتدا، اما این همیشه ممکن نیست. همچنین، در مورد رایانش مه، جایی که ممکن است یک دستگاه یا یک گره مه خراب شود، لازم است محتویات آن گره منتقل شوند. در آزمایش‌های این مقاله، مهاجرت ۲ برابر در زمان اجرای کلی افزایش یافت. مهمتر از آن، مهاجرت یک برنامه حالت دار نیز منجر به خطاهای غیرمنتظره یعنی خطاهای ارسال مجدد، پردازش مجدد و خطاهای ترتیب اشتباه می‌شود. در [۹]، یک معماری رایانش لبه برای اینترنت اشیاء براساس معماری λ-CoAP ارائه شده است که کل محدوده استقرار رایانش لبه را پوشش می دهد و بر روی طراحی یک دروازه هوشمند لبه تمرکز کرده است. در این معماری یک فناوری مجازی‌سازی سبک وزن برای کنترل و جداسازی بهتر فرآیندهای در حال اجرا به کار گرفته شده است. نیاز به فعال کردن چارچوبی برای پردازش توابع دلخواه در زمان واقعی بر روی داده های دلخواه و محافظت از مقادیر زیادی داده در برابر خطاهای انسانی، باعث شکل‌گیری معماری Lambda (LA) شد. LA یک معماری رایانش ابری است که عملکرد پردازش، تجزیه و تحلیل و مصرف مقادیر زیادی از داده های دلخواه را فراهم می‌کند. مفهوم کلیدی LA نمای از پیش محاسبه شده است که نتایج از پیش محاسبه شده را محدود می کند که می‌توان از آنها برای کاهش زمان پردازش استفاده کرد. LA جریان داده را به سه لایه بی‌درنگ، دسته‌ای و سرویس تقسیم می کند. این سه لایه وظیفه ویژه کاهش تأخیر در هنگام پردازش مقادیر زیادی از داده های تغییرناپذیر را دارند. در تکنیک های یادگیری عمیق[۴۳] که در آن از مجموعه داده های بزرگی از داده ها برای استخراج الگوهای سطح بالا استفاده می شود، LA به طور قابل توجهی زمان پردازش را کاهش می دهد. کار این مقاله بر روی معماری λ-CoAP یک معماری اینترنت اشیا و رایانش ابری است و پروتکل برنامه محدود[۴۴] و LA را اتخاذ می‌کند. از یک طرف، ناهمگونی اینترنت اشیا در داخل زیرساخت فیزیکی، همزمان با فعال شدن سرویس های وب سبک وزن برای دسترسی به آن‌ها از طریق پروتکل برنامه محدود انتزاع می شود. حسگرها و محرک‌ها همچنین می‌توانند در زمان اجرا در دستگاه‌های اینترنت اشیاء بدون پیکربندی مجدد و فرآیند راه‌اندازی مجدد ایجاد شوند. از سوی دیگر، LA تجزیه و تحلیل و فعال سازی را بر اساس مقادیر زیادی از داده های تولید شده توسط اینترنت اشیا امکان پذیر می‌کند، بنابراین تأخیر پردازش را کاهش می‌دهد. معماری λ-CoAP با یک دروازه هوشمند برای اتصال LA با دستگاه های زیرین و یک پروکسی برای فعال کردن تعاملات HTTP تکمیل می شود. در نهایت، یک رابط کاربری[۴۵] وب مدیریت و تجسم داده ها و دستگاه های اینترنت اشیا را امکان پذیر می‌کند. تا کنون، این معماری دستگاه‌ها را قادر می‌سازد تا به طور مستقل کار کنند،

[42] Live migration
[43] Deep learning
[44] Constrained application protocol (CoAP)
[45] User interface

اما کل قدرت پردازش، که منجر به اقداماتی بر روی زیرساخت‌های زیربنایی اینترنت اشیا و استخراج دانش می‌شود، در ابر از طریق LA ارائه می‌شود. در [۹] یک معماری مجازی سازی سبک وزن برای دروازه هوشمند اعمال شده است. به دروازه هوشمند یک رابط مدیریت وب برای مدیریت دستگاه ها و کانتینرها و یک چارچوب رایانش لبه برای توسعه منطق لبه اضافه کرده‌اند. این معماری مدیریت فرآیندها در زمان اجرا و استفاده مجدد و پشتیبان گیری از کانتینرها را امکان‌پذیر می‌کند. در [۱۰]، از یک پیاده‌سازی سبک وزن Kubernetes، برای هماهنگ کردن خدمات محاسباتی بر روی دستگاه‌های لبه با دسترسی کم برای تبدیل این دستگاه‌ها به منابع رایانش لبه استفاده شده است. این پیاده‌سازی می‌تواند دستگاه‌های لبه در دسترس پایین را به عنوان یک منبع محاسباتی لبه در یک سیستم اینترنت اشیاء خانه هوشمند فعال کند. این سیستم دو مزیت دارد. می‌تواند خدمات محاسباتی را از ابر یا یک سرور محلی اختصاصی به یک دستگاه لبه با دسترسی کم گسترش دهد. . پس از راه‌اندازی اولیه، سیستم می‌تواند به‌طور خودکار وضعیت در حال اجرا دستگاه‌های در دسترس پایین را کنترل کند و به Kubernetes دستور دهد تا کانتینرها را در این دستگاه‌ها مستقر، مقیاس‌بندی یا حذف کند. وقتی سیستم آنلاین است، ترافیک شبکه حاوی درخواست‌های محاسباتی را می‌توان به درستی به دستگاهی با دسترسی کم هدایت کرد. در این مقاله یک سیستم نمونه اولیه با دستگاه های Raspberry Pi ساخته و ارزیابی شده است. هنگامی که یک سرویس محاسباتی را از ابر به یک دستگاه با دسترسی کم محلی گسترش می‌دهد، سیستم می‌تواند درخواست‌های خدمات محاسباتی را به دستگاه محلی هدایت کند، که به طور قابل‌توجهی زمان پاسخ شبکه بین دستگاه‌های اینترنت اشیاء و سرویس محاسباتی را کاهش می‌دهد. هنگام گسترش یک سرویس محاسباتی از یک سرور محلی اختصاصی به یک دستگاه لبه با دسترسی کم، سیستم می‌تواند حداکثر بار کاری را که سرویس محاسباتی می‌تواند پردازش کند، افزایش دهد. در [۱۱]، LW-CoEdge، یک مدل مجازی سازی سبک جدید و فرآیند همکاری نظیر به نظیر[۴۶] برای رایانش لبه ارائه شده است. پیشنهاد این مقاله معماری سه لایه با استفاده از رایانش لبه است و توسط دو رویکرد اصلی پشتیبانی می‌شود: کانتینری‌سازی و میکروسرویس. کانتینری‌سازی مکانیزم ساده‌ای برای پیکربندی، بسته‌بندی و نمونه‌سازی اجزای ما و مقابله با ناهمگونی گره‌های لبه برای ساخت گره‌های مجازی فراهم می‌کند. علاوه بر این، امکان پنهان کردن جزئیات فیزیکی زیرساخت را فراهم می کند و بنابراین از وابستگی به هر فناوری، مصرف کمتر منابع و زمان پردازش اجتناب می کند. میکروسرویس ها برای توسعه گره های مجازی و اجزای پشتیبانی عملیاتی ما مورد سوء استفاده قرار می گیرند. آن‌ها به عنوان اجزای سبک وزن، یعنی کوچک، بسیار جدا شده و انجام یک مسئولیت واحد طراحی شده اند. بنابراین، کانتینری‌سازی و میکروسرویس، علاوه بر تسهیل توزیع و مدیریت اجزای ما در گره‌های لبه، هدف فعال کردن مدل مجازی‌سازی سبک ما را برآورده می‌کنند. در رابطه با همکاری، یک فرآیند نظیر به نظیر مسطح را برای ایجاد و مدیریت همسایگی گره‌های لبه طراحی کرده‌اند که به اشتراک گذاری داده‌ها و مدیریت منابع توزیع‌شده اجازه می‌دهد. اشتراک گذاری داده به یک گره مجازی اجازه می دهد تا داده های تازه خود را به طور فعال با گره های مجاور به اشتراک بگذارد. همچنین، اشتراک گذاری داده ها این قابلیت را برای گره های مجازی فراهم می کند تا نیازهای داده سایر گره های مجازی را در طول فرآیند همکاری شناسایی کنند و در نتیجه انتقال داده ها بین گره های مجازی را کاهش دهند. علاوه بر این، مدیریت منابع، تصمیم‌گیری

[46] Peer-to-peer

را در لبه شبکه توزیع می‌کند، به عنوان مثال، هر گره لبه دارای توانایی درگیر کردن گره‌های لبه همسایه برای تخصیص یا ارائه گره مجازی در صورت نیاز است، در نتیجه امکان پاسخگویی به درخواست‌های بیشتری را فراهم می‌کند. در این مقاله یک نمونه اولیه با تمام ویژگی های پیشنهادی در یک محیط واقعی پیاده سازی شده است. این نمونه اولیه به عنوان اثبات مفهوم مورد استفاده قرار گرفته است و داده هایی را تولید کرد که به عنوان ورودی برای آزمایش های انجام شده به منظور ارزیابی فرآیند و الگوریتم های پیشنهادی استفاده شد. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان داد که الگوریتم های انتخابی برای تخصیص توزیع‌شده منابع و تأمین منابع، بهبود یافته با همکاری نظیر به نظیر مسطح و اشتراک‌گذاری داده‌ها، سیستم ابر اشیاء[۴۷] را قادر می‌سازد تا درخواست‌های برنامه‌های کاربردی بیشتری را با تأخیر کمتر برآورده کند، در حالی که در انرژی دستگاه‌های نهایی صرفه‌جویی می‌کند. [۱۲] مجموعه کاملی از معماری‌های رایانش لبه را بر اساس کانتینری‌سازی در محیط اینترنت اشیا پیاده‌سازی می‌کند. در این مورد، مجازی‌سازی مبتنی بر کانتینر را پیاده‌سازی کرده‌اند که Kubernetes Minion را در سرویس کانتینر Docker به‌طور مستقل برای هر سرویس در سمت لبه می‌سازد. از داده های حسی رطوبت و دما به عنوان مطالعه موردی استفاده می‌کند. در این مقاله Raspberry Pi را در دروازه لبه و Kubernetes Minion را در Raspberry Pi راه‌اندازی کردند تا برنامه سرویس را ارائه دهند که شامل Grafana، پلتفرم باز برای تجزیه و تحلیل و نظارت است. برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت داده، از InfluxDB به‌عنوان یک ذخیره‌سازی داده برای مقادیر زیادی از داده‌های سری زمانی استفاده می‌کند. به طور خلاصه، پیاده سازی معماری رایانش لبه با استفاده از مجازی سازی مبتنی بر کانتینر برای پردازش جریان داده در زمان واقعی، بهبود قابل توجهی در عملکرد برنامه ارائه می‌دهد. با استفاده از این معماری، می‌توان به سطوح تاخیر کمتری در لبه برخلاف ابر یا مرکز داده دور، دست یافت. [۱۳] یک معماری مجازی سازی دوربین اینترنت اشیاء لبه را پیشنهاد می‌کند. برای این کار از یک مدل توصیف برنامه مبتنی بر هستی‌شناسی[۴۸] استفاده می‌کند و دوربین اینترنت اشیا را با فناوری کانتینری مجازی می‌کند که دوربین فیزیکی را جدا و از چندین برنامه کاربردی پشتیبانی می‌کند. همچنین یک طرح پیکربندی مجدد دوربین اینترنت اشیا را توسعه می‌دهد که به دوربین‌های اینترنت اشیا اجازه می‌دهد تا به صورت پویا پیکربندی خود را با تغییرات زمینه محیطی بدون کاهش کیفیت سرویس کاربردی تنظیم کنند. نتایج تجربی بر اساس اجرای نمونه اولیه نشان می‌دهد که پاسخ‌دهی سیستم ۲،۸ برابر سریع‌تر از رویکردهای موجود در پیکربندی مجدد تغییرات محیطی است. در [۱۴]، با توجه به خدمات ارائه شده توسط گره های لبه، یک استراتژی پارتیشن گره لبه پیشنهاد شده است که از فناوری برش برای طبقه بندی گره های لبه و ایجاد یک شبکه مجازی استفاده می‌کند. هر شبکه مجازی بین گره لبه و سرور ابری قرار دارد و مسئولیت انواع درخواست های داده و پردازش تراکنش ها را بر عهده دارد. یک مکانیسم امنیتی مبتنی بر اندازه‌گیری سطح امنیت پیشنهاد شده است که در آن شبکه مجازی و گره‌های لبه انتزاع می‌شوند و یک مدل نقشه‌برداری شبکه مجازی ایجاد می‌کنند، این مدل می‌تواند انواع مختلفی از خدمات را توزیع کند. این می تواند به طور مؤثر همه انواع مشاغل را مدیریت کند و از سردرگمی ناشی از اجرای متقابل توسط شرکت های مختلف جلوگیری کند. یک مدل نقشه برداری شبکه مجازی با در نظر گرفتن الزامات امنیتی برای مقابله با مسئله توزیع داده ها و خدمات از ابر به گره های لبه معرفی شده است. این مدل از مرحله نگاشت گره و مرحله نگاشت

[47] Cloud of things(CoT)
[48] Ontology

پیوند تشکیل شده است. در طول مرحله نگاشت گره، یک الگوریتم نگاشت گره جامع چند ویژگی پیشنهاد شده است، که می تواند گره های مجازی را به گره های لبه ای که الزامات امنیتی مختلف را برآورده می کنند، نگاشت کند. در طول مرحله نگاشت پیوند، پیوندهای بین گره‌های مجازی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به پیوندهایی که گره‌های لبه را به هم متصل می‌کنند، تعبیه می‌شوند. مدل ارائه شده در این مقاله در بین مطالعات موجود منحصر به فرد است. از طریق یک سری آزمایش های شبیه سازی، سه الگوریتم موجود با در نظر گرفتن امنیت فرآیند نقشه برداری با هم مقایسه می شوند. نتایج تجربی ماهیت پیشرفته مدل پیشنهادی را در بهبود امنیت رایانش لبه تأیید می‌کند و مشکل امنیتی رایانش لبه را حل می‌کند. در [۱۵]، به چالش تخصیص پویا برش‌های شبکه‌های نوری غیرفعال[۴۹] مجازی بر روی معماری‌های mesh-PON برای پشتیبانی از گره‌های ابر و لبه می‌پردازد. از یک مدل تکراری تحلیلی ترکیبی برای محاسبه تخصیص بهینه برش شبکه نوری غیرفعال مجازی استفاده می‌کند، با هدف به حداقل رساندن استفاده از منابع گره لبه، در حالی که آستانه تأخیر هدف را برآورده می‌کند (۱۰۰ میکرو ثانیه). این روش در کاهش زمان محاسبات مؤثر است و تخصیص برش شبکه نوری غیرفعال مجازی را در مقیاس‌های زمانی سازگار با عملیات بی‌درنگ یا زمان واقعی امکان‌پذیر می‌سازد. بر اساس معماری فیزیکی با استفاده از بازتاب انتخابی طول موج در مکان‌های تقسیم‌کننده، یک تحلیل بودجه توان ارائه شده است تا نشان دهد که چگونه می‌توان معماری پیشنهادی را با تعداد محدود تقویت‌کننده‌های نوری به دست آورد. در این مقاله یک فرمول تحلیلی برای تأخیر در برش شبکه نوری غیرفعال مجازی ایجاد کرده‌اند که می‌تواند جایگزین شبیه‌سازی‌های طولانی شود و در نتیجه زمان محاسبه را تقریباً دو مرتبه کاهش دهد. بسته به بار ترافیکی، روش پیشنهادی می‌تواند راه‌حل خوبی در چند ثانیه یا ده‌ها ثانیه پیدا کند. [۱۶] یک معماری شبکه دانش محور[۵۰] با ارتباطات دستگاه به دستگاه[۵۱] را پیشنهاد می کند. ابتدا یک معماری شبکه سلولی لبه مجازی به کمک دستگاه به دستگاه طراحی می کند که از یک لایه فیزیکی، یک لایه دانش و یک لایه مدیریت مجازی تشکیل شده است. در ادامه چالش‌ها و راه‌حل‌های بالقوه را در سیستم پیشنهادی، از جمله استخراج دانش، آگاهی اجتماعی، طرح‌های تشویقی، مکانیسم‌های مدیریت اعتماد، و تخصیص بهینه منابع در تجهیزات کاربر[۵۲] توصیف می‌کند. به این ترتیب، توابع مختلف هدف بهینه سازی برای برآوردن نیازهای کیفیت خدمات انواع مختلف خدمات طراحی شده اند. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که معماری پیشنهادی می‌تواند تا حد زیادی عملکرد شبکه را از نظر مصرف بک‌هول کمتر و کاهش تأخیر انتقال بهبود بخشد. در [۱۷]، به بررسی چالش‌هایی می‌پردازد که برای اینترنت آینده اطلاعات محور وجود دارد. برای رسیدگی به این چالش‌ها، رایانش مه که فناوری‌های مجازی‌سازی حافظه پنهان و توابع شبکه را قادر می‌سازد، به‌طور یکسان یکپارچه شده‌اند. یک چارچوب جدید مجهز به مه با استفاده از رایانش مه پیشنهاد شده است تا هم منابع ذخیره‌سازی و هم منابع محاسباتی را برای حافظه پنهان شبکه و مجازی‌سازی کنترل فراهم کند. در معماری پیشنهادی، گره‌های مه مانند پایگاه داده‌های کوچکی برای روترها عمل می‌کنند و به‌عنوان یک نظارت بر فعالیت و شبکه برای ارسال اطلاعات کنترل و پیکربندی به شبکه برای عملکرد کارآمدتر در انتقال داده، ذخیره‌سازی حافظه پنهان و امنیت عمل می‌کنند. بر اساس معماری مجازی سازی توابع شبکه فعال با رایانش مه، یک

[49] Passive optical networks
[50] Knowledge centric
[51] Device-to-device
[52] User equipment

رویکرد پیکربندی منبع شناختی پیشنهاد شده است. این کار برای بهینه سازی عملکرد و انعطاف پذیری اینترنت آینده بسیار مهم است. در [۱۸] الگوریتمی برای استقرار سرورهای لبه با در نظر گرفتن منابع محاسباتی و بار ترافیک پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر مفهوم جریان سرویس مجازی[۵۳] است که یک شبکه مجازی متشکل از مشتریان، منابع داده، نمونه سرور و دروازه ای برای یک سرویس خاص است. جریان سرویس مجازی طرح‌ها را با توجه به موقعیت سرور مورد انتظار سازماندهی می‌کند و آن‌ها بر اساس هر بار ترافیک تخمینی مرتب می‌شوند. سپس، استقرار سرور لبه جریان های سرویس مجازی انجام می‌شود. استقرار سرور بر اساس یک تکنیک کسب و کار حرفه ای مجازی وزنی عمل می کند که در آن پوشش جریان سرویس مجازی در نظر گرفته می شود، و عملیات انتخاب طرح بعدی یا پیکربندی مجدد برای جریان سرویس مجازی رد شده تا تکمیل فرآیند انجام می شود. پیکربندی مجدد جریان سرویس مجازی با استفاده از الگوریتم بسته بندی bin vector وزنی که پوشش گره مشتری جریان سرویس مجازی را در نظر می‌گیرد، انجام می‌شود. الگوریتم پیشنهادی با شبیه‌سازی در جنبه‌های مختلف با دیگر طرح‌هایی که مکان سرور را به ترتیبی خاص بر اساس منابع محاسباتی مورد نیاز و موجود تعیین می‌کنند، مقایسه شده است. الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به طور قابل‌توجهی بار ترافیک را در شبکه بدون توجه به تعداد سرویس‌ها یا تعداد مشتریان کاهش دهد. این بدان معنی است که تحت شرایط مختلف شبکه، بار ترافیک را می توان به طور مؤثر در مقایسه با تکنیک های استقرار موجود کاهش داده است و می‌تواند به خدماتی با ترافیک بالا بین مشتری و سرور لبه پاسخ مؤثری بدهد. در [۱۹]، مجازی‌سازی شیء برای غلبه بر موانع ناشی از محدودیت‌های منابع در گره‌های سطح حسی بررسی می‌شود، در حالی که مجازی‌سازی سرویس برای ایجاد آسان برنامه‌های کاربردی مناسب برای کاربران نهایی بررسی می‌شود. علاوه بر این، مجازی سازی عملکرد شبکه برای انجام انعطاف پذیری ارائه خدمات شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. مبتنی بر مجازی‌سازی شی، مجازی‌سازی عملکرد شبکه و مجازی‌سازی سرویس، یک چارچوب لایه‌ای است که اشیاء هوشمند، مه و ابر را در بر می‌گیرد و برای نشان دادن تحقق مه مجازی در امتداد پیوستار اینترنت اشیا ارائه شده است. این چارچوب مه مجازی پیشنهادی برای تأیید به یک مورد زندگی هوشمند اعمال می‌شود، سپس تجزیه و تحلیل کمی برای نشان دادن تأخیر کم، هزینه عملیاتی کم، چند مستاجری بالا و مقیاس‌پذیری انجام می‌شود و پس از آن یک ارزیابی تجربی برای تأیید بیشتر تأخیر و لرزش انجام می‌شود که از طریق مجازی سازی قابل کاهش است. در [۲۰]، چالش‌ها و فرصت‌ها را در دسترسی به شتاب‌دهنده‌ها[۵۴] در لبه شناسایی می‌کند. دیدگاه کل نگر از معماری مه کلیدی برای پیگیری تحقیقات معنادار در این زمینه است. شتاب‌دهنده‌های سخت‌افزاری در فضای ابری برای تجزیه و تحلیل پیشرفته در دسترس هستند. هدف ابرهای نسل بعدی این است که تجزیه و تحلیل پیشرفته را با استفاده از شتاب‌دهنده‌ها به دستگاه‌های کاربر در لبه شبکه برای بهبود کیفیت خدمات با به حداقل رساندن تأخیرها و زمان‌های پاسخ انتها به انتها نزدیک‌تر کند. در [۲۱]، به طور مشترک تخصیص کانتینر و ترتیب دریافت لایه تعیین شده است تا کل تأخیر راه‌اندازی کاهش یابد. مسئله تخصیص کانتینر و توالی لایه[۵۵] و اثبات NP-hard آن فرموله شده است. یک الگوریتم زمان‌بندی آگاه از لایه[۵۶] پیشنهاد شده است که به طور کامل به اشتراک‌گذاری لایه بین تصاویر را در نظر می‌گیرد.

[53] Virtual service flow
[54] Accelerators
[55] Container Assignment and Layer Sequencing
[56] Layer-Aware Scheduling Algorithm

ابتدا، لایه‌هایی که توسط مجموعه‌ای از تصاویر به اشتراک گذاشته می‌شوند، گروه‌بندی می‌شوند تا مقیاس مسئله تخصیص کانتینر و توالی لایه را بدون تأثیر بر نتیجه بهینه کاهش دهند. سپس، با توجه به اشتراک‌گذاری لایه و اندازه لایه موجود در گره‌های لبه، یک الگوریتم زمان‌بندی آگاه از لایه طراحی شده است تا کانتینرها را به گره های لبه مناسب اختصاص دهد. در نهایت، برای تعیین ترتیب دریافت لایه در هر گره لبه، یک الگوریتم تقریبی پیشنهاد شده است. آزمایش‌های گسترده بر اساس داده‌های دنیای واقعی، اثربخشی الگوریتم زمان‌بندی آگاه از لایه را نشان می‌دهد که کل تأخیر راه‌اندازی را بین ۴۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. در [۲۲]، یک رویکرد بازی بالقوه برای قرار دادن عملکرد شبکه مجازی در رایانش لبه ماهواره‌ای پیشنهاد شده است. هدف به حداقل رساندن هزینه استقرار برای هر درخواست کاربر است. در نظر گرفته شده است که یک شبکه ماهواره ای باید خدمات محاسباتی را برای بیشتر درخواست های کاربر ارائه دهد. در واقع این مقاله مسئله استقرار عملکرد شبکه مجازی را به عنوان یک بازی بالقوه برای به حداکثر رساندن بازده کلی شبکه و تجزیه و تحلیل مسئله با رویکرد تئوریک بازی را فرموله می‌کند. یک الگوریتم تخصیص منابع غیرمتمرکز را بر اساس یک بازی بالقوه[۵۷]پیاده‌سازی شده است تا با یافتن یک تعادل نش[۵۸]، مقاله مسئله استقرار عملکرد شبکه مجازی را حل کنند. در نهایت، آزمایش‌ها را برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به طور مؤثر مسئله استقرار عملکرد شبکه مجازی را در رایانش لبه‌های ماهواره‌ای برطرف کند.

۵-۱. دسته‌بندی مقالات و پژوهش‌های بررسی شده از جنبه‌های مختلف

همانطورکه در جدول ۴ نیز قابل مشاهده است، به طبقه‌بندی و دسته‌بندی مقالات و پژوهش‌های انجام شده از منظر موضوع اصلی، یافته‌های جدید هر مقاله، حوزه کاربرد هر مقاله، مزایا و معایب هر الگوریتم یا طرح و یا پروتکل پیشنهادی و همچنین محیط مورد ارزیابی و نتایج ارزیابی در هر مقاله می‌پردازیم.

[57] Potential game

[۵۸] تعادل نش نمایانگر یک کنش برای همه بازیکنان در یک بازی است و برای پیش‌بینی نتیجه تعامل تصمیم‌گیری آنها استفاده می‌شود. این یک حالت ثابت (یعنی ترکیبی از استراتژی‌های همه بازیکنان) را مدل می‌کند که در آن هیچ بازیکنی نمی‌تواند با تغییر یک‌جانبه استراتژی خود از آن بهره‌مند شود.

جدول۴: دسته بندی مقالات و پژوهش‌های بررسی‌شده

مقاله	موضوع اصلی	کلمات کلیدی	یافته های جدید	ابزار پیاده سازی/ شبیه سازی	حوزه کاربرد	مطالعه موردی	نتایج ارزیابی	مزایا	معایب
[۱]	استقرار واحدهای ارسال انتخابی مجازی در لبه شبکه	multi-party WebRTC, selective forwarding unit (SFU), scalable video coding, multi-access edge datacenters, distributed virtual SFU, managed video service	سرویس NSP-webRTC	الگوریتم	صنعت	کنفرانس ویدیوئی	سرویس چندگانه واحد ارسال انتخابی پیشنهادی در مقایسه با ارتباطات تک واحدی امروزی تأخیر و استفاده از منابع کمتری دارد.	انتخاب کوتاه ترین مسیر، تمین پهنای باند،بارگزاری سریع، حفظ کیفیت ویدیو	-
[۲]	استقرار همزمان توابع شبکه مجازی و برنامه‌های رایانش لبه چند دسترسی مجازی	Virtualized Multi-access Edge Computing (vMEC) , Network Function Virtualization (NFV), Container-based Virtualization Technology (CVT), Software Defined Networking (SDN), Internet of Things (IoT), Virtual Network Function (VNF)	-	فرمول ریاضی	صنعت	رابط های مدیریت استاندارد	پلتفرم پیشنهادی به طور متوسط ۳۰ درصد از تأخیر شبکه انتها به انتها را کاهش می‌دهد.	کاهش تأخیر، بهبود خدمات	-
[۳]	یک معماری مرجع شبکه‌های نرم‌افزاری تعریف‌شده/ مجازی سازی عملکرد شبکه	Fog computing; Software-defined Networks (SDN); Network Function Virtualization (NFV); next generation computer network architectur	طراحی یک معماری مرجع جدید برای رایانش مه مبتنی بر مجازی سازی تابع شبکه	الگوریتم	سازمان‌های آموزشی	کنترل‌کننده‌ها در معماری رایانش مه	معماری پیشنهادی حفظ حریم خصوصی، کاهش ترافیک شبکه، مدیریت یکپارچه شبکه، بهبود کیفیت خدمات را به دنبال دارد.	کاهش زمان پاسخ	پچیدگی آگاهی از موقعیت مکانی با دانه‌بندی پایین
[۴]	تقویت مه	Cloud computing, Edge computing, Computer architecture, Real-time systems, Technological innovation,Sensors	یک سیاست ارکستراسیون جدید، ایجاد صورت فلکی از گره ها، مجازی سازی تابع مه	یادگیری ماشین	شهر هوشمند	خانه‌های خودکار، نقشه آلودگی بی‌درنگ	قابلیت‌های زیرساخت مانند «اشیاء» را می‌توان به‌عنوان توابع ارائه کرد و بنابراین برای سایر برنامه‌ها مجدداً استفاده کرد	بهبود کیفیت	مقدار نرم افزار مورد نیاز برای ادغام گره‌های مه
[۵]	زنجیره بلوک در رایانش لبه	Fog computing, Edge Computing, Internet of Things, Blockchain, Smart Contracts, NFV, SDN	ادغام زنجیره بلوک در زیرساخت های توابع شبکه مجازی	الگوریتم	صنعت	اینترنت اشیا	برای سهولت استفاده از سرویس‌های اینترنت اشیا، معماری پیشنهادی می‌تواند تأخیر ارتباط بین دستگاه‌های اینترنت اشیا، توزیع منابع و بارگیری ترافیک در شبکه را به میزان قابل توجهی کاهش دهد	بهبود امنیت	پچیدگی زیاد
[۶]	شبکه دسترسی مجازی 5G در لبه	Cloud, Edge, Fog, RAN, MEC, NFV, multi-RAT, 5G	پروژه فاز دوم 5G-PPP	ماشین مجازی	حمل و نقل	سکوهای قطار پرسرعت، مرکز خرید، خودرو	طراحی اولیه این پروژه می‌تواند مه و لبه را یکپارچه و متحد کند.	افزایش سرعت در خدمات	-
[۷]	شبیه‌سازی عملکردهای مجازی‌سازی توابع شبکه	cloud computing, edge computing, network function virtualization (NFV), service function chaining (SFC), simulation software, software-defined clouds, software-defined networking (SDN)	تخصیص توابع شبکه مجازی، مهاجرت و مقیاس بندی خودکار	CloudSim	صنعت	-	چارچوب پیشنهادی می‌تواند به طور موثر برای ارزیابی سریع رویکردهای مختلف در شبیه‌سازی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.	ارزیابی و اندازه‌گیری دقیق و سریع عملکرد شبکه	توابع شبکه مجازی پراکنده باعث افزایش حجم ترافیک شبکه و مصرف انرژی بیشتر در سوئیچ‌ها می‌شوند.
[۸]	کانتینرها و مهاجرت زنده	Fog Computing, Edge Computing, Virtualization, Containers, Docker, Live Migration.	CRIU، ابزار مهاجرت کانتینر	ماشین مجازی	دانشگاه و صنعت	-	در مقایسه با راه‌حل‌هایی مانند KVM و XEN، کانتینرها مجازی‌سازی را تقریباً در هر سطحی از سلسله‌مراتب ابر مه ارائه می‌دهند و بنابراین برای استفاده در لبه بسیار مناسب هستند	مهاجرت دستگاه ها بدون قطعی، سبک وزن	مهاجرت یک برنامه حالت دار منجر به خطاهای غیرمنتظره می‌شود.
[۹]	مجازی‌سازی سبک	Cloud computing,Logic gates,Containers,Edge computing,Virtualization,Real-time systems	دروازه هوشمند	معماری λ- CoAP	شهر هوشمند	-	منطق لبه را می توان از طریق یک چارچوب بصری با استفاده از جریان داده تعریف کرد که متداول‌ترین اپراتورها را برای فیلتر کردن و جمع‌آوری داده‌ها، علاوه بر کشف زیرساخت‌های اینترنت اشیاء، در خود جای می‌دهد.	کاهش تأخیر و پهنای باند	پیچیدگی

مقاله	موضوع اصلی	کلمات کلیدی	یافته های جدید	ابزار پیاده سازی/ شبیه سازی	حوزه کاربرد	مطالعه موردی	نتایج ارزیابی	مزایا	معایب
[۱۰]	پیاده‌سازی سبک وزن kubernetes در دستگاه‌هایی با دسترسی کم	Edge computing. IoT system,kubernetes, low availability	-	Raspberry Pi	خانه هوشمند	-	خدمات محاسباتی از ابر و یا سرور محلی اختصاصی را به دستگاه های لبه با دسترسی کم گسترش می‌دهد.	کاهش زمان پاسخ	پیکربندی جداگانه هر دستگاه لبه که زمانبر و تکراری است.
[۱۱]	رویکرد نظیر به نظیر مسطح برای اشتراک گذاری داده ها بین گره های مجازی به طور فعال و توزیع مدیریت منابع در لبه	collaboration . data sharing . edge computing . lightweight virtualization . P2P. resource management	طراحی یک مدل مجازی سازی سبک وزن بهبود یافته با یک فرآیند همکاری بین گره های مجازی	VMware	شهر هوشمند	ساختمان هوشمند	طرح پیشنهادی، سیستم ابر اشیاء را قادر می‌سازد تا درخواست‌های برنامه‌های کاربردی را با تأخیر کمتر و صرفه جویی انرژی در دستگاه‌های نهایی برآورده کند.	صرفه جویی در انرژی و پهنای باند، افزایش طول عمر حسگر، کاهش تأخیر و زمان پاسخ	محدودیت تعداد گره های مورد استفاده در آزمایشات، ارسال تنها یک نوع داده در هر درخواست
[۱۲]	یکپارچه سازی نرم افزار های منبع باز در محیط اینترنت اشیاء	Edge computing · Container-based virtualization Kubernetes · Docker · Internet of Things (IoT)	پیاده سازی مجموعه کاملی از معماری های رایانش لبه با استفاده از مجازی سازی سبک	Raspberry Pi	دانشگاه	حسگر دما و رطوبت	با استفاده از این معماری، می‌توان به سطوح تأخیر کمتری در لبه برخلاف ابر یا مرکز داده دور دست یافت.	بهبود عملکرد برنامه	-
[۱۳]	پیکربندی مجازی دوربین اینترنت اشیاء	Cameras, Streaming media, Containers, Computer architecture, Quality of service, Cloud computing, Ontologies	یک معماری مجازی سازی دوربین اینترنت اشیاء برای تجزیه و تحلیل ویدئویی در لبه	Raspberry Pi	دانشگاه	دوربین هوشمند	سازگاری مؤثر دوربین هوشمند با تغییرات محیطی از نظر کیفیت برنامه و محاسبات و سربار شبکه و پاسخ‌دهی این سیستم ۲٫۸ برابر سریع‌تر از رویکردهای موجود در پیکربندی مجدد تغییرات محیطی است.	پشتیبانی از چندین برنامه کاربردی، بهبود عملکرد و سازگاری برنامه در حضور تغییرات محیطی پویا، افزایش دقت تشخیص شیء، کاهش هزینه محاسباتی و زمان پاسخ	عدم پشتیبانی از روابط پیچیده بین پارامترها برای پیکربندی مجدد دقیق تر در دوربین های اینترنت اشیاء
[۱۴]	ایمن سازی رایانش لبه همراه با مجازی سازی گره های لبه	Security Tactic, Internet of Things, Edge Computing, Network Virtualization, Virtual Network Embedding	یک استراتژی تقسیم بندی گره لبه و یک سازوکار امنیتی میتنی بر اندازه گیری سطح امنیت و یک مدل نقشه برداری شبکه مجازی برای مدل سازی انتقال داده	Eclipse	صنعت	-	مدل پیشنهادی در این مقاله پیشرفت قطعی در افزایش امنیت رایانش لبه دارد.	افزایش میزان پذیرش درخواست شبکه مجازی و افزایش درآمد شبکه فیزیکی، کاهش هزینه نقشه برداری شبکه مجازی	-
[۱۵]	تخصیص پویا برش‌های شبکه‌های نوری غیرفعال مجازی	PON, MEC, Cloud-RAN, Low-Latency, Virtual PON, Slicing	ارائه یک فرمول تحلیلی برای تأخیر در برش	فرمول ریاضی	صنعت	-	استفاده از توپولوژی مش با برش پویا شبکه نوری غیر فعال مجازی باعث به حداقل رساندن تأخیر انتها به انتها شده است.	به حداقل رساندن استفاده از منابع، تأخیر کم، کاهش زمان محاسبات و بهینه‌سازی زمان واقعی	-
[۱۶]	یک معماری شبکه سلولی دانش محور با ارتباطات دستگاه به دستگاه	Device-to-device communication, Servers, Computer architecture, Physical layer, Quality of service, Knowledge engineering, Resource management, Energy efficiency, Edge computing	ارتباطات دستگاه به دستگاه هوشمند	تلفن همراه	صنعت	کنترل‌کننده‌ها و رابط‌ها	قابلیت اطمینان بین دستگاه‌ها می‌تواند برای تسهیل ارتباطات بین دستگاه‌های IoT و برای تحقق انتقال داده‌های قابل اعتماد استفاده شود.	شناسایی پویا ساختار شبکه و مدیریت منابع ارتباطی	-
[۱۷]	اینترنت آینده اطلاعات محور	Internet,Virtualization, Edge computing, Computer architecture, Dynamic scheduling, Routing	پیکربندی منبع شناختی	ndnSim	دستگاه‌های هوشمند	-	گره‌های مه مانند پایگاه داده‌های کوچکی برای روترها عمل می‌کنند و به‌عنوان یک نظارت بر فعالیت و شبکه برای ارسال اطلاعات کنترل و پیکربندی به شبکه برای عملکرد کارآمدتر در انتقال داده، ذخیره‌سازی حافظه پنهان و امنیت عمل می‌کنند.	بهینه سازی عمکرد و انعطاف پذیری اینترنت اشیاء	-

مقاله	موضوع اصلی	کلمات کلیدی	یافته های جدید	ابزار پیاده سازی/ شبیه سازی	حوزه کاربرد	مطالعه موردی	نتایج ارزیابی	مزایا	معایب
[۱۸]	مدیریت کنترل ترافیک مبتنی بر جریان سرویس مجازی	Cloud computing, edge computing, fog computing, heuristic algorithm, Internet of Things, network architecture, network management, software defined networking	استقرار سرور های لبه با روش کسب و کار مجازی حرفه ای	الگوریتم	صنعت	-	تضمین کارایی مدیریت منابع محاسباتی و کاهش بار ترافیک شبکه	تأخیر کم، قابلیت اطمینان	چالش برانگیز بودن مدیریت منابع ناهمگن در لبه
[۱۹]	مجازی سازی شیء، عملکرد شبکه، سرویس	Fog computing, object virtualization, network function virtualization, service virtualization, Internet of Things	معرفی یک چارچوب مه فعال مجازی برای اینترنت اشیاء	GNS32	شهر هوشمند	جامعه هوشمند	فناوری مجازی سازی با مقابله با ناهمگونی، مجاورت و ناسازگاری پروتکل، تأخیر انتها به انتها را کاهش می دهد.	هزینه عملیاتی کم، چند مستأجری، مقیاس پذیری، تأخیر کم	چالش برانگیز بودن تهیه و بهره برداری از منابع ناهمگن و فراگیر مه
[۲۰]	مجازی سازی شتاب‌دهنده‌ها در لبه	Cloud computing, Edge computing, Data centers, Virtualization, Data analytics, Hardware, Accelerators	مقیاس عمودی، جداسازی حافظه و اجزای شتاب دهنده	OPENSTACK EDGE	پردازنده‌های گرافیکی	-	مجازی سازی شتاب دهنده یک فناوری توانمند برای تسهیل یک لبه سرویس گرا است.	بهینه سازی، انعطاف پذیری، تأخیر کم، توزیع برنامه در زمان اجرا، سرویس دهی همزمان چندین برنامه	عدم وجود بستر آزمایشی فیزیکی واقعی
[۲۱]	تخصیص کانتینر و ترتیب دریافت لایه	Containers, Edge computing, Image edge detection, Task analysis, Sequential analysis, Scheduling, Approximation algorithms	-	الگوریتم	صنعت	-	استفاده از الگوریتم زمان‌بندی آگاه از لایه کل تأخیر راه اندازی را کاهش می‌دهد.	مقیاس پذیری بالا و تأخیر کم	-
[۲۲]	استقرار عملکرد شبکه مجازی در رایانش لبه ماهواره‌ای	Satellites, Edge computing, Resource management, Costs, Low earth orbit satellites, Games, Delays	طراحی الگوریتم آگاه از لایه	الگوریتم	هوانوردی	تصاویر به اشتراک گذاشته شده	طراحی اولیه یک معماری پلت فرم یکپارچه که می‌تواند مه و لبه را یکپارچه و متحد کند	به حداقل رساندن هزینه استقرار و بهبود عملکرد شبکه	-

۲-۵. مقایسه مقالات و پژوهش‌های بررسی شده بر اساس معیارهای ارزیابی

همانطور که در جدول ۵ نیز نشان داده شده است، یکی از معیارهای مورد مقایسه در مقالات [۱ تا ۲۲ به جزء مقالات ۱۴ و ۱۷] زمان پاسخ است. در [۱]، سرویس چندگانه واحد ارسال انتخابی پیشنهادی در مقایسه با ارتباطات تک واحدی امروزی تأخیر کم و با انتخاب کوتاه‌ترین مسیر زمان پاسخ کمتری دارد. در [۲]، پلتفرم پیشنهادی به طور متوسط ۳۰ درصد از تأخیر شبکه انتها به انتها را کاهش می‌دهد. در [۳]، معماری مرجع شبکه‌های تعریف‌شده/ مجازی‌سازی عملکرد شبکه پیشنهادی میانگین زمان پاسخ را کاهش می‌دهد. در [۴]، یک سیاست ارکستراسیون جدید، ایجاد صورت فلکی از گره ها، مجازی‌سازی تابع مه باعث بهبود پاسخ‌گویی سیستم می‌شود. با توجه به این نکته زمان پاسخ کوتاه بوده و تاخیر وجود ندارد. در [۵] مجازی‌سازی مبتنی برکانتینر است که نسبت به حالتی که مبتنی بر داکر است تاخیر کمتری دارد و زمان کوتاهی برای پاسخ وجود دارد. در [۳] داده‌ها در زمان واقعی و به فرم مطلوب منتقل شده‌اند. پس تاخیر زمانی وجود ندارد و باعث ایجاد سرعت در زمان پاسخ شده است. در [۱۷] سرعت انتقال داده‌ها زیاد می‌باشد، از دیگر معیارهای مورد مقایسه معیار سبک وزن بودن است که در مقاله و پژوهش [۷] به عنوان معیار مورد مقایسه مطرح شد. از دیگر معیارهای مورد مقایسه، معیار هزینه پیاده‌سازی و نگهداری است که در مقلات [۱۸،۱۶،۱۵،۱۳،۱۲،۶،۵] به عنوان معیار مورد مقایسه مطرح شد .در [۵] به دلیل ذخیره سازی داده‌ها در ابر مشکل زیرساخت و ارتقا و نگهداری سیستم حل شد. در [۶] باتوجه به هزینه‌های زیادی که در سیستم‌های آموزشی وجود دارد زمانی که از بستر اینترنت اشیاء استفاده می‌شود باعث بهبود و کاهش مصرف انرژی شده و در نهایت باعث کاهش هزینه شد. در [۱۲] با پلتفرم ابری ارائه شده توسط سیستم اینترنت اشیاء باعث توان مصرف پایین و کاهش هزینه‌ها شد. در [۱۳] با توسعه سیستم‌های مجازی هزینه‌های نگهداری کاهش پیدا می‌کند. در [۱۵] ارزیابی توسعه سریع و کم هزینه مبتنی بر میکرو کنترولرها مطرح است. در [۱۶] الگوریتم LASA از سایر الگوریتم ها عملکرد بهتری دارد و باعث کاهش هزینه‌ها شد. در [۱۸] یک سخت افزار نمونه اولیه با هزینه پایین است که برای پیاده‌سازی اینترنت اشیاء بسیار مناسب شد. با هزینه کم آرایه‌ای از حسگرها برای ردیابی زمان واقعی وسیله نقلیه ایجاد شد. در [۱۳] فناوری‌های مجازی‌سازی هوشمند اساس مدیریت علمی را برای شبکه فراهم کرد که باعث افزایش بهره‌وری مدیریت و کاهش هزینه‌های تولید شد. مشکلات هزینه‌های نگهداری سیستم و نیروی انسانی برطرف شد. شبکه ارتباطی ایجاد شده بی‌سیم است لذا هزینه نگهداری پایین است. در [۲۱]، به طور مشترک تخصیص کانتینر و ترتیب دریافت لایه تعیین شده است تا کل تأخیر راه‌اندازی کاهش یابد. مسئله تخصیص کانتینر و توالی لایه و اثبات NP-hard آن فرموله شده است. یک الگوریتم زمان‌بندی آگاه از لایه پیشنهاد شده است که به طور کامل به اشتراک‌گذاری لایه بین تصاویر را در نظر می‌گیرد. ابتدا، لایه‌هایی که توسط مجموعه‌ای از تصاویر به اشتراک گذاشته می‌شوند، گروه‌بندی می‌شوند تا مقیاس مسئله تخصیص کانتینر و توالی لایه را بدون تأثیر بر نتیجه بهینه کاهش دهند. سپس، با توجه به اشتراک‌گذاری لایه و اندازه لایه موجود در گره‌های لبه، یک الگوریتم زمان‌بندی آگاه از لایه طراحی شده است تا کانتینرها را به گره های لبه مناسب اختصاص دهد. در نهایت، برای تعیین ترتیب دریافت لایه در هر گره لبه، یک الگوریتم تقریبی پیشنهاد شده است. آزمایش‌های گسترده بر اساس داده‌های دنیای واقعی، اثربخشی الگوریتم زمان‌بندی آگاه از لایه را نشان می‌دهد که کل تأخیر راه‌اندازی را بین ۴۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. در [۲۲]، یک رویکرد بازی بالقوه برای قرار دادن عملکرد شبکه مجازی در رایانش لبه ماهواره‌ای پیشنهاد شده است. هدف به حداقل رساندن هزینه استقرار برای هر درخواست کاربر است. در نظر گرفته شده است که یک شبکه ماهواره ای باید خدمات محاسباتی را برای بیشتر درخواست های کاربر ارائه دهد. در واقع این مقاله مسئله استقرار عملکرد شبکه مجازی را به عنوان یک بازی بالقوه برای به حداکثر رساندن بازده کلی شبکه و تجزیه و تحلیل مسئله با رویکرد تئوریک

بازی را فرموله می‌کند نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به طور مؤثر مسئله استقرار عملکرد شبکه مجازی را در رایانش لبه‌های ماهواره‌ای برطرف کند.

جدول ۵: مقایسه مقالات و پژوهش‌های بررسی‌شده بر اساس معیارهای ارزیابی

مقاله	معیارهای مورد مقایسه							
	زمان پاسخ	مقیاس پذیری	پهنای باند	سبک وزن	مصرف انرژی	هزینه عملیاتی	قابلیت اطمینان	استفاده از منابع
[۱]	✓	✓	✓					✓
[۲]	✓		✓					
[۳]	✓	✓	✓				✓	
[۴]	✓	✓			✓	✓		✓
[۵]	✓		✓				✓	✓
[۶]	✓	✓	✓					
[۷]	✓		✓		✓			✓
[۸]	✓	✓		✓				
[۹]	✓		✓	✓				
[۱۰]	✓		✓	✓				
[۱۱]	✓		✓	✓	✓			✓
[۱۲]	✓			✓				
[۱۳]	✓		✓	✓		✓		
[۱۴]						✓	✓	
[۱۵]	✓		✓					✓
[۱۶]	✓						✓	✓
[۱۷]		✓			✓	✓	✓	✓
[۱۸]	✓		✓				✓	✓
[۱۹]	✓	✓				✓		✓
[۲۰]	✓	✓						✓
[۲۱]	✓	✓						
[۲۲]	✓					✓		✓

۵-۳. مقایسه مقالات و پژوهش‌های بررسی شده بر اساس محیط‌های ارزیابی

در جدول ۶ محیط‌های ارزیابی به ۴ گروه دسته‌بندی شده‌اند. محیط واقعی، نمونه اولیه، شبیه‌سازی و مدل ریاضی. مقالات [۴، ۱۲، ۱۳، ۱۶] در محیط واقعی طرح را ارزیابی کرده‌اند. ارزیابی پژوهش‌های [۹، ۱۱، ۱۳] بر مبنای نمونه اولیه بوده است. مقالات [۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۷، ۱۹، ۲۰] بر مبنای شبیه‌سازی ارزیابی شده‌اند که ارزیابی [۷] با استفاده از ابزار cloudsim است. و همچنین نمایش عملی[۱۰] به کمک شبیه ساز Raspberry Pi بوده است. در[۱۱] از Vmware برای مجازی‌سازی استفاده کرده است و

مقالات [۴، ۱۲، ۱۳، ۱۶] نیز توسط محیط واقعی انجام شد. در [۱۶] برای ارزیابی، از یک پردازنده ۲ گیگابایتی استفاده کرده است تا به عنوان کاربر عمل کند و از یک رایانه شخصی برای عمل به عنوان گره مه و مرکز ابر استفاده شده است. در [۱۲] آزمایش شبیه‌سازی‌شده برای بررسی کارکردهای طرح پیشنهادی در رایانه شخصی انجام شده است و در [۴] برای اطمینان از صحت و امکان سنجی آزمایش و شبیه‌سازی، پارامترها براساس داده های واقعی است. در [۱، ۲، ۳، ۵، ۱۱، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۲] مدل ریاضی به کارگرفته شده است. ارزیابی [۱۷] با استفاده از ابزار ndnsim است و در [۱۴] برای ارزیابی، محیط Eclipse استفاده کرده است. نمایش عملی[۱۹] به کمک شبیه‌ساز GNS32 بوده است. در [۲۰] آزمایش شبیه‌سازی‌شده برای بررسی کارکردهای طرح پیشنهادی در OPENSTACKEDGE انجام شده است.

جدول ۶ :مقایسه مقالات و پژوهش‌های بررسی‌شده بر اساس محیط‌های ارزیابی

مقاله	انواع محیط ارزیابی			
	محیط واقعی	نمونه اولیه	شبیه سازی	مدل ریاضی
R. Arda Kırmızıoğlu و همکاران [۱]				✓
Han-Chuan Hsieh و همکاران [۲]				✓
Pooyan Habibi وهمکاران [۳]				✓
Damian Roca و همکاران [۴]	✓			
Said El Kafhali و همکاران [۵]				✓
Damiano Rapon و همکاران [۶]			✓	
Jungmin Son و همکاران [۷]			✓	
Syed Rameez Ullah Kakakhel و همکاران [۸]			✓	
Cristian Mart´ın و همکاران [۹]		✓		
Yingzhi Hao و همکاران [۱۰]			✓	
Marcelo Pitanga Alves و همکاران [۱۱]		✓	✓	✓
Endah Kristiani و همکاران [۱۲]	✓			
Si Young Jang و همکاران [۱۳]	✓	✓		✓
Peiying Zhang و همکاران [۱۴]			✓	✓
Sandip Das و همکاران [۱۵]				✓
Ruyan Wang و همکاران [۱۶]	✓			
Jun Wu و همکاران [۱۷]			✓	
WON-SUK KIM و همکاران [۱۸]				✓
Jianhua Li و همکاران [۱۹]			✓	
Blesson Varghese و همکاران [۲۰]			✓	
Jiong lou و همکاران [۲۱]				✓
Xiangqiang Gao و همکاران [۲۲]				✓

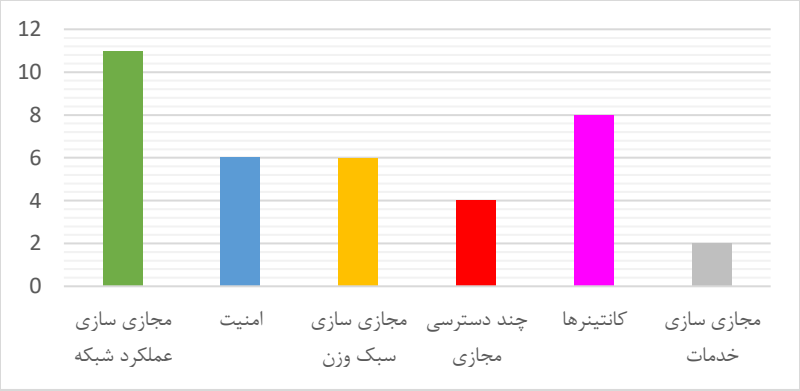
۶. بحث تحلیل و مقایسه

در بخش قبل که مربوط به دسته‌بندی مقالات و پژوهش‌های بررسی‌شده از جنبه های مختلفی از جمله موضوع اصلی، کلمات کلیدی در هر مقاله ، یافته‌های جدید در هر پژوهش، محیط ارزیابی، مجموعه داده‌ای که هرکدام از مقالات مورد استفاده قرار داده بودند، حوزه کاربرد هرکدام از پژوهش‌های مورد بررسی و نتایج ارزیابی آن‌ها پرداختیم و به شرح تحلیل مفصلی برای هرکدام از این موارد

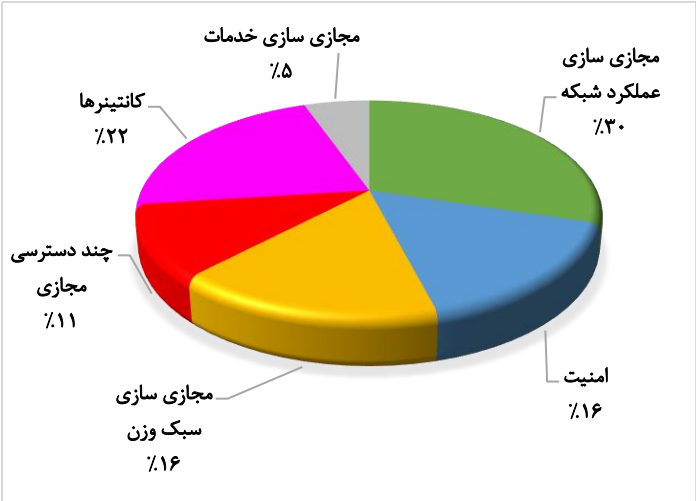
پرداختیم و به بیان موردی مزایا و معایب هرکدام از مقالات و پژوهش‌های مورد بررسی پرداختیم؛ در این بخش هرکدام از مقالات و پژوهش‌های مورد بررسی را به صورت آماری از جنبه‌های موضوع اصلی، معیارهای ارزیابی و محیط‌های ارزیابی بررسی می‌کنیم

"سوال ۱: موضوعات اصلی در مجازی‌سازی مه/لبه کدامند؟"

در شکل ۶ به سوال یک پاسخ داده شده است. به دسته‌بندی مقالات بر اساس فاکتور موضوع اصلی پرداخته شده است. از میان بیست و دو مقاله پژوهشی؛ یازده مقاله با موضوع "مجازی سازی عملکرد شبکه" و هشت مقاله با موضوع "کانتینرها" و شش مقاله با موضوع"مجازی‌سازی سبک وزن" و شش مقاله با موضوع "امنیت" و چهار مقاله با چند دسترسی مجازی مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق با شکل ۷ می‌توان بیان کرد که موضوع اصلی ۳۰٪ از مقالات و پژوهش های انجام شده، مجازی سازی عملکرد شبکه است. ۱۶٪ از مقالات، مربوط به مجازی‌سازی سبک وزن، ۱۱٪ از مقالات مربوط به چند دسترسی مجازی و ۲٪ از مقالات و پژوهش‌های انجام شده، مجازی سازی خدمات و ۱۶٪ دیگر مربوط به امنیت است. موضوع اصلی ۲۲٪ از مقالات و پژوهش‌های انجام شده مربوط به کانتینرها می‌باشد.



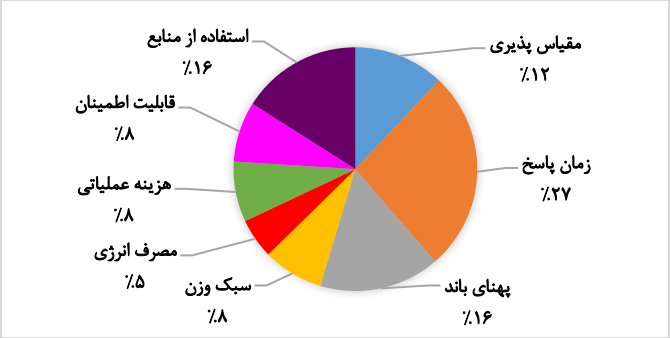
شکل ۶: دسته‌بندی مقالات پژوهشی بر اساس موضوع اصلی



شکل ۷: تحلیل آماری مقالات و پژوهش‌های بررسی شده بر اساس موضوع اصلی

"سوال ۲: معیارهای ارزیابی در مقالات مجازی سازی در رایانش مه/لبه کدامند؟"

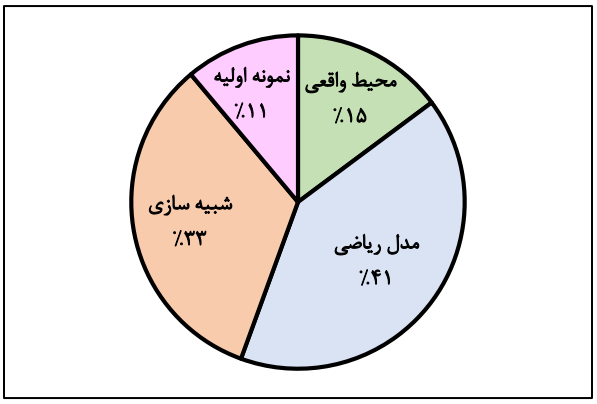
در شکل ۸ معیارهای ارزیابی مقالات مورد نظر به صورت آماری بررسی شده است و به سوال دو پاسخ داده شده است. می‌توان بیان کرد که زمان پاسخ، معیار ارزیابی ۲۷٪ از مقالات است. پهنای باند، معیار ارزیابی ۱۶٪ از مقالات است. مقیاس پذیری، معیار ۱۲٪ و سبک وزن، معیار ۸٪ از مقالات مورد مطالعه است. معیار ارزیابی ۱۶٪ از مقالات استفاده از منابع و ۸٪ از آن‌ها قابلیت اطمینان و ۸٪ دیگر مربوط به هزینه عملیاتی می‌باشد. معیار ارزیابی ۵٪ از مقالات و پژوهش‌های انجام شده مربوط به مصرف انرژی است.



شکل ۸: تحلیل آماری مقالات و پژوهش‌های بررسی شده بر اساس معیارهای ارزیابی

"سوال ۳: از چه محیط های ارزیابی در موضوع مجازی سازی در رایانش مه/لبه استفاده شده است؟ "

در شکل ۹ به سوال سه پاسخ داده شده است. می‌توان بیان کرد که ۱۵٪ از مقالات در محیط واقعی طرح خود را ارزیابی کرده‌اند، ۳۳٪ از مقالات شبیه سازی بوده است، همچنین محیط ارزیابی ۱۱٪ از مقالات به صورت نمونه اولیه بوده است و ۴۱٪ دیگر از مقالات طرح خود را به صورت مدل ریاضی ارزیابی کرده‌اند.

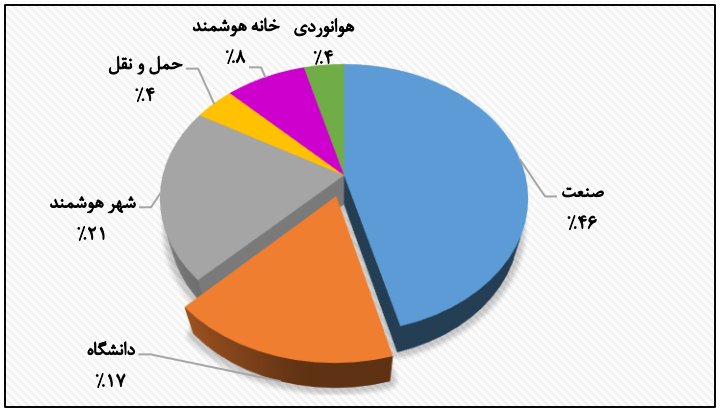


شکل ۹: تحلیل آماری مقالات و پژوهش‌های بررسی شده براساس محیط‌های ارزیابی

"سوال ۴: حوزه کاربرد مجازی‌سازی مه/لبه کدامند؟"

مطابق با شکل ۱۰ به سوال چهار پاسخ داده شده است. می‌توان بیان کرد که حوزه کاربرد ۴۶ ٪ از مقالات مورد بررسی مربوط به صنعت و ۸٪ مربوط به خانه هوشمند است. حوزه کاربرد ۱۷٪ از پژوهش‌های بررسی شده مربوط به دانشگاه و ۲۱٪ دیگر مربوط به

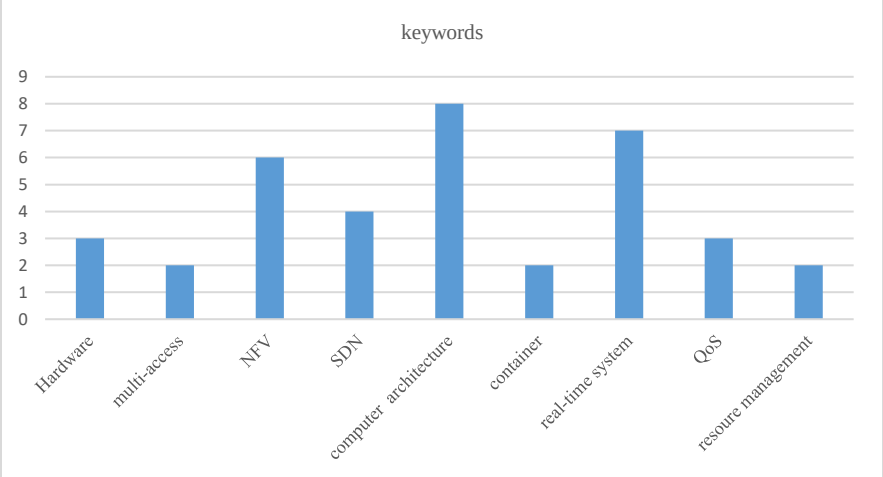
شهر هوشمند می‌باشد، حوزه کاربرد ۴٪ از پژوهش‌های بررسی شده مربوط به حمل و نقل و حوزه کاربرد ۴٪ از مقالات مورد بررسی مربوط به هوانوردی است.



شکل ۱۰: تحلیل آماری مقالات و پژوهش‌های بررسی‌شده براساس حوزه کاربرد

"سوال ۵: کدام کلمات کلیدی در پژوهش‌ها و مطالعات مربوط به مجازی سازی در مه/لبه پرکاربرد هستند؟ "

مطابق با شکل ۱۱ به سوال پنج پاسخ داده شده است.



شکل ۱۱: دسته‌بندی مقالات و پژوهش‌های بررسی‌شده بر اساس کلمات کلیدی پرکاربرد

۷. مسائل باز، چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده

در این بخش در جدول ۷ به سوال شش: "چالش ها و مسائل موجود در زمینه مجازی سازی مه و لبه کدامند؟ "پاسخ داده شده است. تصور می شود که رایانش مه/لبه در آینده به تکامل خود ادامه می‌دهد و فرصت‌های بیشتری را به ارمغان می‌آورد و چالش‌های بیشتری را بر مدیریت ماشین مجازی/کانتینر تحمیل می‌کند. تلاش بیشتری از سوی صنعت و دانشگاه باید در این موضوع پژوهشی

امیدوارکننده در آینده انجام شود. رایانش لبه به عنوان یک توسعه رایانش ابری، برای ارائه خدمات خود به مجازی‌سازی متکی است. با این وجود، ویژگی‌های متمایز رایانش لبه، آن را با داستان رایانش ابری در ایجاد مکانیسم‌های مجازی‌سازی برای کل سیستم متفاوت می‌سازد. اگرچه چارچوب مجازی مه در مقایسه با پلتفرم‌های ابر یا مه معمولی عملکرد برتری دارد، اما هنوز برخی از مسائل باز وجود دارد که ارزش بررسی آینده را دارند، به‌ویژه چالش‌های تهیه و استفاده از منابع. در امتداد اینترنت اشیا، منابع مه اغلب از نظر فضایی در مکان‌های مختلف جدا شده و متعلق به مالکان توزیع شده است. به منظور مکان یابی، ایمن‌سازی و سازماندهی چنین منابعی قبل از استقرار برنامه های کاربردی آن‌ها، ارائه‌دهندگان باید یک پلتفرم واحد برای بازیکنان مختلف مه ایجاد کنند تا زیرساخت های مشترک را به اشتراک بگذارند. مه مجازی قادر است نظارت پویا و ادغام منابع بدون کاربرد را از طریق کشف و ثبت مستقل انجام دهد، با این حال، این منابع ناهمگن و فراگیر هستند. بنابراین، خرید کارآمد محاسباتی در مقیاس بزرگ منابع توزیع شده هنوز مورد نیاز است. گره های مه می‌توانند از فناوری‌هایی مانند کانتینر نرم‌افزاری برای اجرای چندین میکرو سرویس بر روی گره‌های مناسب استفاده کنند. با این وجود، نحوه تطبیق انواع برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیاء با منابع ناهمگن، یک کار بی‌اهمیت است. علاوه بر این، زمان‌بندی و همگام‌سازی این سرویس‌ها در دستگاه‌های محدود به منابع با سربار کم، چالش کلیدی دیگری است.

جدول ۷: چالش‌ها و مسائل باز موجود در مجازی‌سازی مه/لبه

مسائل باز	چالش‌ها	جهت‌گیری‌های آینده
تهیه منابع	مکان‌یابی	ایجاد یک پلتفرم واحد
بهره‌برداری از منابع	زمان‌بندی و همگام‌سازی	تطبیق برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیاء
مدیریت ماشین مجازی و کانتینرها	ایمن‌سازی	ایمن‌سازی هسته میزبان

۸. نتیجه‌گیری

یک فناوری مجازی‌سازی سبک وزن برای کنترل و جداسازی بهتر فرآیندهای در حال اجرا به کار گرفته شده است. منطق لبه را می‌توان از طریق یک چارچوب بصری با استفاده از جریان داده تعریف کرد. این چارچوب متداول‌ترین اپراتورها را برای فیلتر کردن و جمع‌آوری داده‌ها، علاوه بر کشف زیرساخت‌های زیربنایی اینترنت اشیاء، در خود جای می‌دهد، به طوری که برنامه‌ها فقط نیاز به تمرکز روی منطق برنامه دارند. در نهایت، یک رابط کاربری وب مدیریت نمونه‌های مجازی و دستگاه‌های اینترنت اشیا را امکان پذیر می‌کند. برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیا می‌توانند از این معماری برای کاهش تأخیر آن‌ها و کاهش پهنای باند به ابر استفاده کنند. این مقاله موضوعات اصلی در مجازی‌سازی مه/ لبه را مورد مطالعه قرار داده است .معیارهای ارزیابی را به دست آورده و محیط‌های ارزیابی، حوزه کاربرد و چالش‌ها و مسائل موجود در پژوهش‌ها را مورد بررسی قرار داده است. به دسته‌بندی مقالات از نقطه نظر: موضوع اصلی، یافته های جدید، شبیه سازی، مزایا و معایب و مجموعه داده پرداخته است.

منابع

[1] ..Kirmizioglu, Riza Arda, A. Murat Tekalp, and Burak Görkemli. "Distributed Virtual Selective-Forwarding Units and Sdn-Assisted Edge Computing for Optimization of Multi-Party Webrtc Videoconferencing." *Available at SSRN 4045902*.

[2] ..Hsieh, Han-Chuan, Jiann-Liang Chen, and Abderrahim Benslimane. "5G virtualized multi-access edge computing platform for IoT applications." *Journal of Network and Computer Applications* 115 (2018): 94-102.

[3] Habibi, Pooyan, Soroush Baharlooei, Mohammd Farhoudi, Sepehr Kazemian, and Siavash Khorsandi. "Virtualized SDN-based end-to-end reference architecture for fog networking." In *2018 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, pp. 61-66. IEEE, 2018.

[4] Roca, Damian, Josue V. Quiroga, Mateo Valero, and Mario Nemirovsky. "Fog function virtualization: A flexible solution for iot applications." In *2017 Second International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, pp. 74-80. IEEE, 2017.

[5] El Kafhali, Said, Chorouk Chahir, Mohamed Hanini, and Khaled Salah. "Architecture to manage internet of things data using blockchain and fog computing." In *Proceedings of the 4th international conference on big data and internet of things*, pp. 1-8. 2019.

[6] Rapone, Damiano, Roberto Quasso, Shahzoob Bilal Chundrigar, Samer T. Talat, Luca Cominardi, Antonio De la Oliva, Ping-Heng Kuo et al. "An integrated, virtualized joint edge and fog computing system with multi-rat convergence." In *2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pp. 1-5. IEEE, 2018.

[7] Son, Jungmin, TianZhang He, and Rajkumar Buyya. "CloudSimSDN-NFV: Modeling and simulation of network function virtualization and service function chaining in edge computing environments." *Software: Practice and Experience* 49, no. 12 (2019): 1748-1764.

[8] .Kakakhel, Syed Rameez Ullah, Lauri Mukkala, Tomi Westerlund, and Juha Plosila. "Virtualization at the network edge: A technology perspective." In *2018 Third International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, pp. 87-92. IEEE, 2018.

[9] Fernández, Cristian Martín, Manuel Díaz Rodríguez, and Bartolomé Rubio Muñoz. "An edge computing architecture in the Internet of Things." In *2018 IEEE 21st International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, pp. 99-102. IEEE, 2018.

[10] Hao, Yingzhi. "Edge Computing on Low Availability Devices with K3S in a Smart Home IoT System." PhD diss., The Cooper Union for the Advancement of Science and Art, 2022.

[11] Alves, Marcelo Pitanga, Flavia C. Delicato, Igor L. Santos, and Paulo F. Pires. "LW-CoEdge: a lightweight virtualization model and collaboration process for edge computing." *World Wide Web* 23, no. 2 (2020): 1127-1175.

[12] Kristiani, Endah, Chao-Tung Yang, Yuan-Ting Wang, Chin-Yin Huang, and Po-Cheng Ko."Container-based virtualization for real-time data streaming processing on the edge computing architecture." In International Wireless Internet Conference, pp. 203-211. Springer, Cham, 2018.

[13] Jang, Si Young, Yoonhyung Lee, Byoungheon Shin, and Dongman Lee. "Application-aware IoT camera virtualization for video analytics edge computing." In *2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC)*, pp. 132-144. IEEE, 2018.

[14] Zhang, Peiying, Chunxiao Jiang, Xue Pang, and Yi Qian. "STEC-IoT: A security tactic by virtualizing edge computing on IoT." *IEEE Internet of Things Journal* 8, no. 4 (2020): 2459-2467.

[15] Das, Sandip, Frank Slyne, and Marco Ruffini. "Optimal Slicing of Virtualized Passive Optical Networks to Support Dense Deployment of Cloud-RAN and Multi-Access Edge Computing." *IEEE Network* 36, no. 2 (2022): 131-138.

[16] Wang, Ruyan, Junjie Yan, Dapeng Wu, Honggang Wang, and Qing Yang. "Knowledge-centric edge computing based on virtualized D2D communication systems." *IEEE Communications Magazine* 56, no. 5 (2018): 32-38.

[17] Wu, Jun, Mianxiong Dong, Kaoru Ota, Jianhua Li, Wu Yang, and Meng Wang. "Fog-computing-enabled cognitive network function virtualization for an information-centric future Internet." *IEEE Communications Magazine* 57, no. 7 (2019): 48-54.

[18] Kim, Won-Suk, Sang-Hwa Chung, and Chang-Woo Ahn. "Joint Resource Allocation Based on Traffic Flow Virtualization for Edge Computing." *IEEE Access* 9 (2021): 57989-58008.

[19] Li, Jianhua, Jiong Jin, Dong Yuan, and Hongke Zhang. "Virtual fog: A virtualization enabled fog computing framework for Internet of Things." *IEEE Internet of Things Journal* 5, no. 1 (2017): 121-131.

[20] Varghese, Blesson, Carlos Reano, and Federico Silla. "Accelerator virtualization in fog computing: Moving from the cloud to the edge." *IEEE Cloud Computing* 5, no. 6 (2018): 28-37.

[21] Lou, Jiong, Hao Luo, Zhiqing Tang, Weijia Jia, and Wei Zhao. "Efficient Container Assignment and Layer Sequencing in Edge Computing." *IEEE Transactions on Services Computing* (2022).

[22] Gao, Xiangqiang, Rongke Liu, and Aryan Kaushik. "Virtual Network Function Placement in Satellite Edge Computing with a Potential Game Approach." *IEEE Transactions on Network and Service Management* (2022).

[23] Tao, Zeyi, Qi Xia, Zijiang Hao, Cheng Li, Lele Ma, Shanhe Yi, and Qun Li. "A survey of virtual machine management in edge computing." *Proceedings of the IEEE* 107, no. 8 (2019): 1482-1499.

[24] Raghavendra, M. Sri, and Priyanka Chawla. "A review on container-based lightweight virtualization for fog computing." In *2018 7th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO)*, pp. 378-384. IEEE, 2018.

[25] Sabireen, H., and V. Neelanarayanan. "A review on fog computing: architecture, fog with IoT, algorithms and research challenges." *Ict Express* 7, no. 2 (2021): 162-176.

[26] Morabito, Roberto, Vittorio Cozzolino, Aaron Yi Ding, Nicklas Beijar, and Jorg Ott. "Consolidate IoT edge computing with lightweight virtualization." *IEEE network* 32, no. 1 (2018): 102-111.