Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
DOI: 10.22034/jscit.2025.540836.2157
Volume 14, Number 3, Autumn 2025, pp. 51-60
Received: 08/12/2025, Revised: 10/14/2025, Accepted: 10/15/2025

Integration of Fog Computing in NDN-Based IoT

Marzieh Sadat Zahedinia
Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
m.zahedinia@birjand.ac.ir

Corresponding author's address: Marzieh Sadat Zahedinia, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract- Fog computing provides direct and fast access to computing and storage capabilities near physical devices. This approach not only enables quicker access to services but also reduces dependence on widespread internet connectivity. The Internet of Things (IoT) establishes communication among numerous devices and objects through various protocols. Implementing this network using host-to-host communication models faces challenges due to heterogeneous and resource-constrained devices, different security domains, and the need for both local and global communication. This article examines what fog computing is and how the integration of a Named Data Networking (NDN)-based IoT architecture with fog computing technology works. It explores how this technology can enable more secure and efficient IoT implementations. Finally, a case study is reviewed on the application of fog computing to improve intra-network storage challenges in NDN-based IoT. The case study results clearly demonstrate the impact of fog computing in addressing intra-network caching challenges. The findings indicate the positive effect of using fog computing in enhancing the performance of NDN-based IoT.
Keywords- Fog computing, IoT, Named Data Network, network.

مجله علمی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
شناسه دیجیتال: 10.22034/jscit.2025.540836.2157
جلد ۱۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴ صفحه ۵۱-۶۰
دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

ادغام رایانش مه در اینترنت اشیا مبتنی بر NDN

مرضیه سادات زاهدی نیا*
استادیار گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه بیرجند
m.zahedinia@birjand.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: مرضیه سادات زاهدی نیا، بیرجند، دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

چکیده- رایانش مه، ارائه بی واسطه و سریع قابلیت‌های رایانشی و ذخیره‌سازی در نزدیکی دستگاه‌های فیزیکی فراهم می‌کند. این روش نه تنها امکان دسترسی سریع تر به خدمات را فراهم می‌آورد، بلکه وابستگی به اینترنت گسترده را نیز برطرف می‌کند. اینترنت اشیاء ارتباط بین دستگاه‌ها و اشیاء متعدد را با استفاده از پروتکل‌های مختلف برقرار می‌کنند. پیاده‌سازی این شبکه توسط مدل‌های ارتباطی میزبان میزبان به دلیل وجود دستگاه‌های ناهمگن و دارای محدودیت، ارتباط با حوزه‌های امنیتی متفاوت و همچنین نیاز به ایجاد ارتباط هم بصورت محلی و هم جهانی با چالش‌هایی روبرو است.در این مقاله بررسی می‌کنیم که رایانش مه چیست، ادغام معماری اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه داده نامگذاری شده با فناوری رایانش مه چگونه است. این فناوری چطور می‌تواند پیاده سازی اینترنت اشیا را به صورت ایمن‌تر و کاراتر فراهم کند. در انتها یک مطالعه موردی از کاربرد رایانش مه برای بهبود چالش-های مربوط به ذخیره سازی درون شبکه‌ای در اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه داده نامگذاری شده بررسی شده است. نتایج به دست آمده از مطالعه موردی، تاثیر رایانش مه را در رفع چالش های مربوط به کشینگ درون شبکه ای به خوبی نشان می‌دهد. نتایج حاصل بیانگر تاثیر مثبت استفاده از رایانش مه در بهبود کارایی اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه داده نامگذاری شده است.

واژه‌های کلیدی: رایانش مه، اینترنت اشیاء، شبکه داده نامگذاری شده، شبکه

۱- مقدمه

رایانش مه[۱] نشان دهنده یک الگو شامل منابع فیزیکی است که بین دستگاه های هوشمند کاربر نهایی (معمولاً درون سازمان ها) و رایانش ابری معمولی یا مراکز داده قرار گرفته‌اند[۱]. سازمان OpenFog ، رایانش مه را به عنوان یک معماری افقی و در سطح سیستم تعریف می‌کند که عملکردهای رایانشی، ذخیره سازی، شبکه سازی و کنترل را غیرمتمرکز می‌کند و آنها را در امتداد از ابر تا دستگاه های متصل، به کاربران نزدیک‌تر می‌کند. این پلتفرم، محاسبات، ذخیره سازی و خدمات شبکه را بین نقاط پایانی محلی و مراکز داده ابری مرکزی تسهیل می‌کند [۲].

یکی از مزایای اصلی مدل مه، کاهش تأخیر و افزایش آگاهی از زمینه[۲] است که با محلی بودن گره های مه امکان پذیر می شود. این گره ها برای پشتیبانی از کاربرد های حساس به تأخیر از طریق یک ساختار شبکه مقیاس پذیر، لایه‌ای، و فراگیر بسیار مناسب هستند. گره‌های مه می‌توانند خدماتی مانند خدمات مدل‌های رایانش ابری - یعنی نرم افزار به عنوان سرویس[۳]، پلتفرم به عنوان سرویس[۴] و زیرساخت به عنوان سرویس[۵] ارائه دهند. اساساً، این الگو، قابلیت های ابر را به لبه شبکه گسترش می دهد. برخلاف محیط های ابری دور و انتزاعی که به شدت به اینترنت عمومی متکی هستند و اغلب فاقد شفافیت در مکان سرویس هستند، سرویس‌های مه در نزدیکی کاربران مستقر می‌شوند، توزیع جغرافیایی متراکمی دارند و

پشتیبانی قوی‌تری برای تحرک ارائه می‌دهند[۳].

اجزای اساسی رایانش مه :یک معماری مرجع برای رایانش مه با لایه بنیادی متشکل از دستگاه‌های انتهایی مانند حسگرها و دستگاه‌های لبه آغاز می‌شود. این لایه همچنین از برنامه‌های سبکی پشتیبانی می‌کند که عملکرد این دستگاه‌ها را افزایش می‌دهند. ارتباط بین این اجزا و لایه های بالاتر، از جمله ابر، از طریق لایه شبکه انجام می‌شود که محیط لبه را به سرویس‌های متمرکز متصل می‌کند. لایه بعدی معماری، میزبان سرویس‌های ابری است که مسئول پردازش داده‌ها و مدیریت منابع هنگام تخلیه وظایف از لبه هستند. بالای این لایه، یک لایه نرم افزاری حیاتی - مدیریت منابع تعریف شده توسط نرم افزارSDRM قرار دارد که بر عملکرد زیرساخت نظارت می‌کند و تضمین می‌کند که برنامه‌های رایانش مه سطوح کیفیت خدمات[۶] مورد نیاز را برآورده می‌کنند. این لایه به عنوان یک میان افزار هوشمند عمل می‌کند و امکان تخصیص کارآمد وظایف بین گره‌های مه و سرویس‌های ابری را برای ایجاد تعادل بین هزینه و عملکرد فراهم می‌کند[۴].

در لایه SDRM، چندین سرویس به صورت مشترک کار می‌کنند. یکی از اجزای اصلی، سرویس جریان و جایگذاری وظیفه است که گره‌های بهینه را برای اجرای وظیفه بر اساس داده‌های منابع موجود ارائه شده توسط سرویس نظارت انتخاب می‌کند. هنگامی که تقاضا زیاد است، با تأمین منابع برای تخصیص منابع بیشتر کار می‌کند. پایگاه دانش داده‌های تاریخی مربوط به رفتار برنامه ها و میزان استفاده از منابع را ذخیره می‌کند و به فرآیندهای تصمیم گیری مختلف کمک می‌کند. سرویس پیش بینی عملکرد از بینش های پایگاه دانش برای پیش‌بینی عملکرد منابع ابری تحت بارهای فعلی یا پیش‌بینی شده استفاده می‌کند. این امر، تصمیمات مربوط به تأمین منابع، به ویژه در دوره‌های تقاضای بالا را اطلاع رسانی می‌کند. در تکمیل این، سرویس مدیریت داده‌های خام، نماهای داده ای لازم را برای سایر سرویس‌ها فراهم می‌کند و پیچیدگی‌های استخراج و تبدیل داده‌ها را خلاصه می‌کند. نظارت به طور مداوم وضعیت و عملکرد سیستم را ردیابی می‌کند و به‌روزرسانی ها را با همه سرویس های مربوطه به اشتراک می‌گذارد. اجزای اضافی شامل پروفایل سازی است که پروفایل های عملکرد را برای برنامه ها و زیرساخت ها ایجاد می‌کند و امنیت که احراز هویت، مجوز و حفاظت از داده‌ها را تضمین می‌کند. این عناصر به طور جمعی از اجرای پویا، کارآمد و ایمن کاربرد های مه پشتیبانی می‌کنند. توجه به این نکته مهم است که این فقط یک مدل مرجع است، استقرارهای دنیای واقعی بر اساس نیازهای خاص برنامه، اغلب شامل اجزای متفاوت یا کمتری هستند[۴].

رایانش مه نقش حیاتی در بهبود کاربردهای مختلف تجاری و صنعتی، به ویژه در ارتباط با اینترنت اشیا[۷] ایفا می‌کند[۵]. این فناوری پردازش محلی و تصمیم‌گیری در زمان واقعی را امکان پذیر می سازد که برای تجزیه و تحلیل مؤثر و مدیریت کلان داده ضروری است. در ادامه برخی از کاربردهایی که رایانش مه در آنها پیاد ه‌سازی می‌شود، ذکر شده است [۱]: شبکه‌های هوشمند، خانه‌ها و شهرهای هوشمند ارتباطات ماشین به ماشین (V2V) خودروهای خودران، سیستم‌های چراغ راهنمایی هوشمند، مدیریت مراقبت های بهداشتی، اینترنت اشیا و سیستم‌های سایبری-فیزیکی (CPS)،شبکه‌های مبتنی بر داده نامگذاری شده[۸] [۲].

در این پژوهش، جنبه‌های مختلف رایانش مه، به عنوان یک فناوری پر کاربرد در شبکه‌های مختلف بررسی شده است. یکی از کاربردهای مهم رایانش مه، در پیاده سازی اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه داده نامگذاری شده می‌باشد. استفاده از رایانش مه در بهبود زمینه های مختلف شبکه داده نامگذاری شده از جمله ذخیره‌سازی درون شبکه ای، مسیریابی و.. بسیار موثر است. در ادامه به بررسی پیاده سازی اینترنت اشیاء مبتنی بر معماری شبکه داده نامگذاری شده با استفاده از رایانش مه پرداخته‌ایم. سپس یک مطالعه موردی از کاربرد رایانش مه در بهبود کشینگ درون شبکه‌ای برای اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه داده نامگذاری شده ارائه شده است. نتایج بدست آمده از ارزیابی این مطالعه موردی، اهمیت استفاده از رایانش مه در شبکه را کاملا مشخص می‌کند. در انتها نیز، جمع بندی و نتیجه‌گیری ذکر شده است.

۲- پیاده سازی اینترنت اشیاء مبتنی بر داده نامگذاری شده با استفاده از فناوری رایانش مه

طراحی اینترنت فعلی، به صورتی است که تمامی درخواست‌ها را به تولیدکننده اصلی داده هدایت می‌کند. این منجر به افزایش ترافیک شبکه، تاخیر بازیابی داده و پهنای باند مصرفی می‌شود. به این ترتیب شبکه‌های فعلی نمی‌توانند توزیع داده و بازیابی سریع آن را تامین کنند. در این بخش، ابتدا ساختار شبکه های داده محور را به صورت خلاصه بررسی می‌کنیم. سپس به معماری اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه داده محور همراه با رایانش مه می‌پردازیم. در ادامه یک مطالعه موردی را بررسی می‌کنیم، که کاربرد رایانش مه در بهبود کیفیت کشینگ درون شبکه‌ای را نشان می‌دهد.

۲-۱- شبکه‌های داده محور

معماری شبکه داده محور، یک معماری مناسب برای تامین شرایط و مقتضیات اینترنت اشیاء است[۶]. در این معماری، تمامی گره‌های شبکه به طور پیش فرض ذخیره‌سازی داده را هنگام عبور داده انجام می‌دهند. به این منظور برای تمام گره‌ها، حافظه نهان درنظر گرفته می‌شود. زمانی که یک گره مصرف‌کننده بخواهد داده‌ای را درخواست کند، یک پیام درخواست که حاوی نام داده است، ارسال می‌کند. این پیام هدایت می‌شود تا زمانی که گره‌ای (تولید کننده اصلی داده و یا گره‌ای که کپی از داده را در حافظه نهان خود دارد) به این درخواست پاسخ دهد. سپس داده از همان مسیری که درخواست ارسال شده است، به تقاضادهنده داده بازگردانده می‌شود.

در شبکه‌های داده محور ارتباطات از طریق مبادله دو بسته علاقه[۹] و داده انجام می‌شود (شکل۱). منظور از بسته علاقه همان بسته درخواست برای یک داده است. گره مصرف کننده با ارسال یک پیام علاقه، داده‌ی مشخص شده در پیام را از شبکه درخواست می‌کند، بدون اینکه آدرسی از خود ذکر کند. مصرف‌کننده، نام داده را در بسته علاقه قرار می‌دهد و بسته را به شبکه ارسال می‌کند. در داخل شبکه، بسته براساس نام داده وساختارهای تعریف شده در هر گره، هدایت می‌شود. بستهٔ داده، علاوه بر اینکه حاوی داده است، نام دادهٔ درخواستی را نیز ذخیره می‌کند. یک امضای دیجیتال که توسط تولیدکننده داده ایجادشده است، ممکن است به انتهای بسته اضافه شود تا اعتبار داده، تضمین گردد. بستهٔ داده، برای رسیدن به مصرف کننده، عکس همان مسیری را که بستهٔ علاقه طی کرده است تا به تولیدکنندهٔ داده برسد، طی خواهد کرد [۷].

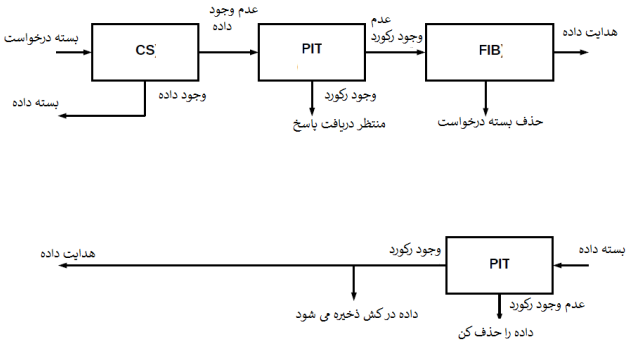


شکل ۱: بسته داده و علاقه

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، هرگره در شبکه داده محور دارای سه ساختار است، که عملکرد شبکه و مسیریابی بسته‌ها براساس این ساختارها انجام می‌گردد [۸]. در ادامه، به طور خلاصه هریک از این ساختارها بررسی می‌گردد.

جدول مسیریابی برای انتشار بسته‌ها (FIB[۱۰]):

اولین ساختار مهم در گره‌های شبکه داده محور، جدول FIB است. این ساختار به منظور هدایت بسته‌های درخواست به سمت تولیدکننده اصلی داده یا گره‌هایی که قبلاً داده را ذخیره کرده‌اند، استفاده می‌شود. درواقع، وظیفه این جدول نگهداری اطلاعات لازم برای هدایت بسته‌های درخواست در جهت مناسب برای رسیدن به میزبان داده مدنظر است. محتویات جدول FIB توسط پروتکل‌های مسیریابی مخصوص شبکه داده محور پر می‌شود. برای هدایت بسته درخواست مربوط به هر پیشوند نام[۱۱]، مشخصاتی از قبیل شناسه واسط خروجی[۱۲]، اولویت مسیریابی[۱۳]، زمان تخمینی تا رسیدن به منبع و محدودیت نرخ ارسال در جدول FIB نگهداری می‌شود[۹]. مشابه این جدول، جدولی هم در معماری مبتنی بر IP وجود دارد. البته در معماری شبکه داده محور، FIB فهرستی از واسط‌های خروجی ممکن را نگه می‌دارد و در معماری مبتنی بر IP فقط یک واسط خروجی در جدول مسیریابی نگهداری می‌شود. این ویژگی براساس این واقعیت است که در معماری اطلاعات محور، یک داده مشخص می‌تواند از چندین گره میانی قابل دستیابی باشد. در FIB نام داده و واسط‌های خروجی ممکن برای آن ثبت شده است[۱۰].



شکل ۲: نحوه عملکرد گره‌ها در شبکه داده محور با استفاده از سه ساختار اصلی

جدول درخواست‌های معلق یا پاسخ دهی نشده (PIT[۱۴]):

این ساختار سابقه بسته‌های درخواستی که براساس FIB به سمت داده هدایت شده‌اند، اما هنوز پاسخی بازگردانده نشده است، را نگه می‌دارد. درواقع مسیریاب با کمک اطلاعات ذخیره شده در این جدول تشخیص می‌دهد که بسته‌های داده دریافتی قبلاً توسط چه گره‌هایی درخواست شده است[11]. در این جدول علاوه بر نام داده، واسط‌های ورودی بسته درخواست نیز ثبت می‌گردد. براساس این جدول، گره می‌تواند بسته داده‌ای را که دریافت می‌کند، در جهت عکس به سمت مصرف‌کننده هدایت کند. به این ترتیب نیازی به

مسیریابی بسته داده نیست و تنها مسیریابی برای بسته درخواست انجام می‌شود. بسته داده، مسیر معکوس بسته درخواست را برای رسیدن به مصرف کننده دنبال می‌کند. برای هریک از وارده‌های جدول PIT، زمان مشخصی در نظر گرفته می‌شود، که پس از گذشت آن مدت زمان از جدول حذف می‌شوند. در این صورت، مصرف‌کننده می‌تواند با ارسال مجدد درخواست، بسته داده را دریافت کند. هدف از قراردادن این زمان‌ها، محدود کردن مدت زمان انتظار برای دریافت بسته داده است.

مخزن محتوا (CS[۱۵]):

مجهز بودن گره‌های شبکه داده محور به یک مخزن محتوا برای ذخیره‌سازی برخی یا همه بسته‌های داده عبوری، یکی از ویژگی‌های اصلی معماری شبکه داده محور است[۱۲]. شبکه داده محور به منظور توزیع داده‌ها در شبکه از این ساختار استفاده می‌کند. مخزن محتوا به منزله یک حافظه نهان است که داده‌ها را به طور موقت در گره نگه می‌دارد[13].

با استفاده از سه ساختار ذکر شده، عملکرد اصلی یک گره در شبکه داده محور شکل می‌گیرد [۱۴], [۱۵].

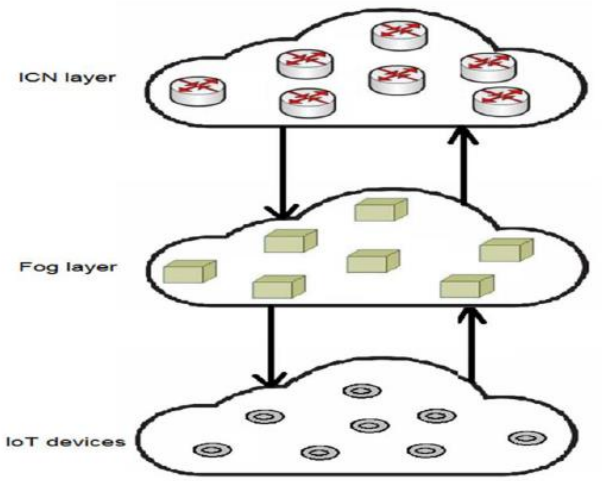
شبکه اطلاعات محور به عنوان معماری برای اینترنت آینده ارائه شده است،که می‌تواند با فناوری‌های جدید دیگر نیز ترکیب شود. چون گره‌های اینترنت اشیاء دستگاه‌هایی با منابع محدود هستند، می‌توان پردازش داده‌های خام را با استفاده از فناوری رایانش ابری انجام داد. رایانش ابری روشی برای پردازش داده‌های خام و ذخیره‌سازی آن‌ها فراهم می‌کند، به عبارت دیگر، مدیریت و پردازش داده‌ها و تولید سرویس توسط ابر انجام می‌گیرد. یولاه[۱۶] و همکارانش مرور جامع و کاملی در زمینه اینترنت اشیاء با زیرساخت شبکه اطلاعات محور و نیز استفاده از فناوری رایانش مه و لبه ارائه کرده‌اند[۱۶]. رایانش ابری برای برنامه‌هایی که به حساسیت بالایی نسبت به تاخیر نیاز دارند، مناسب نیست. به همین منظور رایانش مه ارائه شده است[۱۷],[۱۸]. علاوه بر تاخیر، حجم زیاد داده‌ها ناشی از اتصال میلیون‌ها شی، منجر به ایجاد مشکلات در پهنای باند مصرفی می‌گردد. به عبارت دیگر ارسال تمام داده‌ها به ابر نیازمند پهنای باند بالایی است. از طرف دیگر دستگاه‌های اینترنت اشیاء با منابع محدود، نمی‌توانند تمام نیازهای پردازشی خود را تامین کنند، بنابراین استفاده از رایانش ابری در سیستم‌های اینترنت اشیاء ضروری است [۱۹].

رایانش مه از طریق توزیع منابع پردازشی، کنترلی و ذخیره‌سازی در نزدیکی کاربران انتهایی، ایرادات رایانش ابری را برطرف می‌کند. از طریق مجازی‌سازی[۱۷] ایجاد شده در ابر، شبکه از نظر منابع غنی می‌شود، اما فاصله اهمیت خود را ازدست می‌دهد. مشخص است که فاصله فیزیکی باعث تاخیر می‌شود، هرچند که متمرکز بودن ابر مدیریت نیازهای کاربران را راحت‌تر می‌کند. در رایانش مه، زیرساخت‌های محاسباتی عموماً در نزدیکی تولیدکننده داده قرار می‌گیرند. بنابراین معماری رایانش مه، به صورت متمرکز نیست و این باعث کاهش تاخیر می‌گردد [۲۰]. در برخی از کاربردهای اینترنت اشیاء مانند ترافیک هوشمند و یا سیستم‌های مرتبط با سلامت، حساسیت بالایی نسبت به تاخیر وجود دارد و تحمل پذیری تاخیر در آن‌ها بسیار کم است. با ترکیب رایانش مه و شبکه اطلاعات محور می‌توان سرورهای مه را بهتر مدیریت کرد و کارایی نهایی سیستم را افزایش داد. بسیاری از محققان براین باورند که شبکه اطلاعات محور و رایانش مه دو عنصر مهم در اینترنت آینده خواهد بود [۲۱]. در مرجع [۱۶] نیز تمرکز نویسندگان روی شبکه‌های داده نامگذاری شده و رایانش لبه است. البته ترکیب این دو فرصت‌ها و نیز چالش‌هایی را به وجود می‌آورد. نویسندگان در [۱۶] طرح‌های مختلف ارائه شده برای رایانش مه و لبه و چالش‌های موجود برای این فناوری را بررسی کرده‌اند. به طورخلاصه مزایای استفاده از رایانش مه در شبکه های داده محور را می‌توان در چندین مورد بیان کرد [۱۶]: تراکم جغرافیایی بالا و مدیریت مؤثر تحرک، تأخیر بسیار کم، هوش مکانی و کیفیت خدمات بهبود یافته، افزایش انعطاف پذیری سازمانی و...

۲-۲- مدل معماری اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه های داده محوربا استفاده از رایانش مه

گره‌های مه به دلیل نزدیکی با دستگاه‌های انتهایی، می‌توانند به خوبی با تولیدکننده‌گان داده ارتباط داشته و داده‌های خام را از حسگرها گرفته و برخی کارهای محاسباتی مانند پردازش، دسته-بندی و یا فیلتر داده‌ها را انجام دهند [۲۲]. بنابراین می‌توان از رایانش مه به عنوان یک لایه میانی بین دستگاه‌های اینترنت اشیاء و شبکه اطلاعات محور استفاده نمود [۵۳، ۵۴]. به عبارت دیگر معماری ارائه شده برای رایانش مه در اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه اطلاعات محور شامل سه بخش است. بخش اول، شامل دستگاه‌های اینترنت اشیاء است که می‌توانند تولیدکننده داده (حسگرهای مختلف) ویا مصرف‌کننده داده (برنامه‌های کاربردی مختلف) باشند. در بخش بعدی گره‌های مه هستند، که به عنوان یک دروازه عمل می‌کنند. بخش سوم معماری ارائه شده، شبکه اطلاعات محور است. به این ترتیب، می‌توان ساختاری را بکاربرد که در آن ابتدا داده‌ها از حسگرها به گره‌های مه منتقل شده و قبل از ورود به شبکه اطلاعات محور پردازش و براساس مشخصات داده اولویت‌گذاری شوند (شکل

۳). درواقع از قابلیت پردازشی رایانش مه استفاده گردد تا داده پردازش شود. در این ساختار، رایانش مه به عنوان یک لایه میانی عمل می‌کند.



شکل ۳ : معماری اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه اطلاعات محور با استفاده از رایانش مه

۳- مطالعه موردی

در این بخش، برای مشخص شدن اهمیت رایانش مه، نمونه ای از کاربرد آن در اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه داده نامگذاری شده به منظور بهبود کارایی کش درون شبکه ای را بررسی می‌کنیم.

از آنجا که، در شبکه‌های اینترنت اشیاء غالباً مبادله داده زیادی انجام می‌شود و در برخی از کاربردهای حساس به تاخیر IoT ، دریافت داده‌های تازه با تاخیر کم اهمیت زیادی دارد، همچنین غالبا ظرفیت کش موجود در روترها محدود است، بنابراین لازم است تصمیم‌گیری درستی برای تعیین داده‌های مناسب بمنظور کشینگ درون شبکه ای انجام شود. از طرف دیگر، استراتژی تصمیم گیری برای جایگذاری داده باید با پیچیدگی کم و بسرعت انجام شود، زیرا هم توان پردازشی روترها محدود است و هم تصمیم گیری و جایگذاری داده در کش نودها همزمان با فورواردینگ داده در شبکه انجام می شود.

به عبارت دیگر، می‌توان از رایانش مه به عنوان یک لایه میانی بین دستگاه‌های اینترنت اشیاء و شبکه اطلاعات محور استفاده نمود. همانطور که قبلا گفته شد ، معماری اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه اطلاعات محور با استفاده از رایانش مه، شامل سه بخش است. بخش اول، شامل دستگاه‌های اینترنت اشیاء است که می‌تواند تولیدکننده داده (حسگرهای مختلف) ویا مصرف‌کننده داده (برنامه های کاربردی مختلف) باشد. در بخش بعدی، گره‌های مه هستند، که به عنوان یک دروازه عمل می‌کنند. بخش سوم، شبکه اطلاعات محور است. به این ترتیب، می‌توان ساختاری را استفاده کرد که در آن ابتدا داده‌ها از حسگرها به گره‌های مه منتقل شده و قبل از ورود به شبکه اطلاعات محور پردازش وبراساس مشخصات داده اولویت-گذاری شوند. درواقع از قابلیت پردازشی رایانش مه استفاده می‌گردد تا داده پردازش و در لایه مه تصمیم‌گیری برای کشینگ آن انجام شود. یک بیت خاص به بسته داده اضافه می‌گردد، که مشخص‌کننده مناسب بودن داده برای ذخیره‌سازی در حافظه نهان گره‌های شبکه-های اطلاعات محور یا عدم مناسب بودن آن است. به این منظور درنظر گرفتن حداقل یک بیت برای برچسب ضروری است، هرچند که می‌توان تعداد بیت بیشتری در نظر گرفت و براساس آن داده‌ها را اولویت‌بندی کرد. با این ساختار، تصمیم‌گیری برای جایگذاری داده در گره‌های شبکه اطلاعات محور، در محیط مه انجام می‌شود. به این ترتیب، چالش‌ها و محدودیت‌های ذکرشده برای مساله جایگذاری داده در اینترنت اشیاء با زیرساخت شبکه اطلاعات محور برطرف می‌گردد. همچنین، با این ساختار بخشی از داده‌ها به عنوان داده نامناسب برچسب‌گذاری شده و از ذخیره‌سازی درون شبکه اطلاعات محور حذف می‌شوند. به همین دلیل تعداد کل داده‌های ذخیره شده درگره‌های شبکه اطلاعات محور کاهش می‌یابد و این منجر به افزایش کارایی حافظه نهان و کاهش تاخیر دستیابی به داده می‌گردد. در این ساختار، رایانش مه به عنوان یک لایه میانی عمل می‌کند.

بنابراین باتوجه به مطالب بیان شده، در این مطالعه موردی ، هدف استفاده از رایانش مه برای بهبود کارایی مکانیزم جایگذاری داده‌ها در حافظه نهان داخل شبکه برای سیستم‌های اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه اطلاعات محور است. چون گره‌های مه در لبه‌های شبکه قرار دارند، می‌توانند به خوبی با تولیدکننده‌گان داده ارتباط داشته و داده‌های خام را از حسگرها یا دستگاه‌های اینترنت اشیاء دریافت کنند. سپس در گره‌های مه داده‌ها دسته‌بندی و اولویت‌بندی شده و به گره‌های شبکه اطلاعات محور منتقل می‌شوند. دسته‌بندی و اولویت‌بندی داده‌ها می‌تواند براساس یک یا چندین مشخصه داده انجام گیرد. اولویت داده نشان دهنده مناسب بودن یا نبودن داده برای ذخیره‌سازی در حافظه نهان گره‌های شبکه اطلاعات محور موجود در مسیر داده به سمت مصرف‌کننده است [۲۴]. باتوجه به امکانات پردازشی و محاسباتی موجود در سرورهای مه، انجام فرآیند تصمیم‌گیری در سرورهای مه، باعث رفع محدودیت سرعت تصمیم-گیری در گره‌های شبکه اطلاعات محور می‌گردد. با اولویت‌بندی داده‌ها در محیط مه، نیازی به انجام تصمیم‌گیری در هریک از گره-های شبکه اطلاعات محور نیست. استفاده از مه راه‌حلی برای رفع

محدودیت‌های مساله جایگذاری داده‌ها در حافظه نهان گره‌های شبکه اطلاعات محور است، که با روش ارائه شده به بهبود کارایی حافظه نهان نیز کمک می‌کند.

به عنوان یک راه حل، تصمیم گیری برای کشینگ داده را تنها براساس میزان محبوبیت آن و توسط گره‌های مه تعیین می‌کنیم. استفاده از گره‌های مه یا همان رایانش مه، پروسه تصمیم گیری در روترهای NDN را حذف می‌کند. زمانی که داده به شبکه NDN وارد میشود، پردازش های مربوط به تصمیم‌گیری کشینگ برای این داده قبلا انجام شده است. پردازش های ذکر شده، در این مطالعه تنها براساس محبوبیت داده، است.

برای ارزیابی دو سناریوی مختلف را بررسی می کنیم. در هردو این سناریوها، مجموعه محدود و مشخصی از سنسورها با یک نود مه در ارتباطند. داده‌های ارسالی از سنسورها براساس میزان محبوبیت آنها در نودهای مه پردازش می شوند. براین اساس، هر ۵ تولیدکننده داده با یکی از گره‌های مه مستقیماً در ارتباط هستند و داده‌های تولیدی خود را به گره مه تخصیص داده شده، ارسال می‌کنند.

داده‌های خام توسط حسگرها تولید می‌شوند، و به گره مه منتقل می‌شوند. گره مه داده را در حافظه موقت خود ذخیره کرده و از این به بعد هر زمان که بسته علاقه‌ای برای آن داده دریافت کند، میزان اولویت داده را محاسبه می‌کند. سپس براساس میزان اولویت تعیین شده، بیت جدیدی به نام بیت اولویت به بسته داده اضافه می‌شود. این بیت مشخص کننده درجه اولویت تعیین شده برای داده است. مقدار بیت اولویت داده، برای داده‌های با اولویت کشینگ پایین صفر و برای داده‌های با اولویت بالای کشینگ یک تعریف می‌کنیم. بنابراین گره مه، داده حاوی بیت اولویت را به شبکه اطلاعات محور ارسال می‌کند. مسیریاب‌های شبکه اطلاعات محور هنگام دریافت داده، ابتدا بیت اولویت داده را چک می‌کنند، اگر این بیت برابر ۱ باشد، درصورت نیاز براساس سیاست جایگزینی استفاده شده، یک داده از مخزن محتوا گره حذف شده و داده ورودی جدید جایگزین آن می‌گردد. اگر این بیت برابر صفر باشد، نیازی به ذخیره کردن داده نیست. در هر دو حالت، داده براساس PIT به واسط بعدی ارسال می شود تا زمانی که به مصرف‌کننده تحویل گردد.

محبوبیت داده، براساس نرخ درخواست‌های ورودی برای یک داده خاص تعیین می‌گردد. هر زمان که بسته علاقه‌ای برای داده‌ای خاص توسط گره مه دریافت می‌شود، محبوبیت داده افزایش می‌یابد. اگر مجموع درخواست‌های ورودی به گره مه برای یک داده خاص را R_D درنظر بگیریم، محبوبیت داده$PO(d)$ ، نسبت R_D به مجموع درخواست‌های دریافتی برای تمامی داده‌ها است (R_{total}). داده‌هایی که نرخ درخواست بالاتری داشته باشند، قطعاً محبوبیت بیشتری دارند[۲۵]. چنین داده‌هایی ، برای ذخیره‌سازی در شبکه اطلاعات محور، داده‌هایی ارزشمند لحاظ می‌شوند و باید اولویت بالاتری به این داده‌ها تخصیص داده شود.

$$PO(d) = R_d/R_{total} \qquad (۱)$$

در سناریوی‌های بررسی شده ، همه محتواها با اندازه یکسان لحاظ شده‌اند. اندازه حافظه نهان تعریف شده برای تمام مسیریاب‌های میانی NDN نیز یکسان است. سناریوی شبیه‌سازی شده شامل ۲۵ تولیدکننده است که براساس توپولوژی درختی قرار گرفته‌اند. هر مصرف‌کننده مستقیماً به یک مسیریاب متصل است. تعداد داده‌ها متغیر لحاظ شده است و هر مصرف‌کننده می‌تواند هر داده‌ای را درخواست کند. در این سناریو، مصرف‌کنندگان داده را طبق قانون[۱۸]Zipf درخواست می‌کنند[۲۶]، که با مشخصه چولگی[۱۹] روی ۱,۰ تنظیم شده است. همچنین مصرف‌کننده و تولیدکننده را فاقد قابلیت ذخیره‌سازی درنظر می‌گیریم، تا مانع از تامین داده توسط حافظه نهان داخلی آنها شویم. اندازه حافظه نهان گره‌های مه را یک درصد تعداد کل محتوا در هر مرحله آزمایش درنظر گرفته‌ایم. از LRU به عنوان سیاست جایگزینی استفاده شده است. . در اغلب مطالعات انجام شده در زمینه جایگذاری داده، عموماً از سیاست جایگزینی LRU استفاده می‌شود مشخصه‌های شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصه‌های شبیه‌سازی

اندازه هر محتوا	10 بسته داده
تعداد تولیدکننده داده	25
اندازه حافظه نهان	20 بسته داده
تعداد گره مه	5
مدت زمان شبیه‌سازی	100 s

روش مبتنی بر مه با روش CE^2، روش مرکزیت(BC) [۲۷]، روش ذخیره‌سازی مشتری(CC) [۲۸] مقایسه شده است. سناریوی بیان شده، در چهار حالت مختلف ارزیابی می‌کنیم. در اولین حالت، بدون استفاده از رایانش مه، شبیه سازی شبکه را انجام می‌دهیم. این حالت همان ساختار NDN اصلی است که با CE^2 نشان داده ایم. روش CE^2، همان سیاست ذخیره‌سازی پیش فرض در شبکه داده نامگذاری شده است. در حالت بعدی شبیه سازی را با درنظر گرفتن رایانش مه انجام می‌دهیم. نودهای مه، پردازش و اولویت بندی داده‌ها را انجام می دهند. دو حالت دیگر، روش ذخیره‌سازی مرکزیت(BC) [۲۷] و روش ذخیره‌سازی مشتری(CC) [۲۸] است.

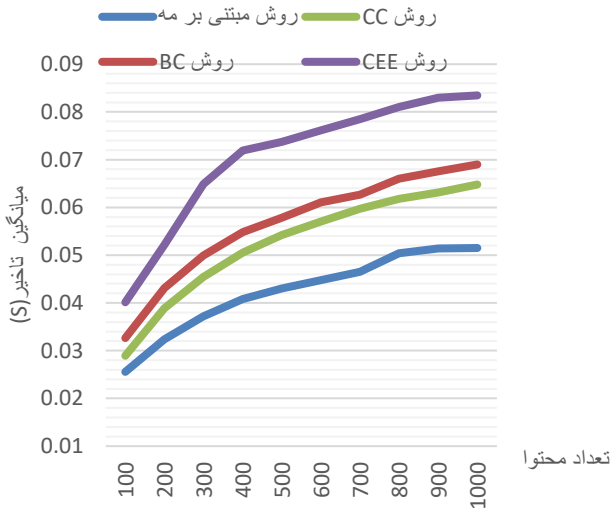
روش BC براساس معیار خاصی است که در هر گره محاسبه می‌شود. این معیار، نشان دهنده تعداد دفعاتی است که گره در مسیر تحویل محتوا بین زوج گره‌های موجود در شبکه قرار می‌گیرد. براساس روش BC، گره‌ای که بیشترین تعداد عبور داده‌ها در زمان پاسخ‌دهی به درخواست‌ها مربوط به آن است برای ذخیره‌سازی انتخاب می‌شود[۲۷].

مکانیزم ذخیره‌سازی و انتخاب محتوای روش CC مبتنی بر سه فرض اصلی ارائه شده‌است. فرض اول، روش ذخیره‌سازی روی مسیر عبور داده است، تا داده‌ها در گره‌های شبکه موجود در مسیر درخواست‌دهنده ذخیره شوند. به این ترتیب نیازی به ارسال اطلاعات اضافه برای اطلاع دادن به گره‌های شبکه به منظور تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مکان‌های حافظه نهان مناسب نیست. فرض دوم، انتخاب گرهی مناسب است تا فاصله بین کاربران درخواست‌دهنده و محتواهای ذخیره شده کاهش یابد. ضمن اینکه تعداد گره‌های ذخیره‌سازی نیز کاهش می‌یابد. در انتها، فرض سوم که روش براساس آن بنا شده است، انتخاب مکان ذخیره‌سازی در نزدیکی کاربران است. براساس فرض‌های ذکر شده، روش CC گره‌هایی که حداقل یک اتصال با گره مشتری دارند و در مسیر بازگشت داده هستند، را برای ذخیره‌سازی انتخاب می‌کند و در آن‌ها ذخیره‌سازی داده انجام می‌شود [۲۸].

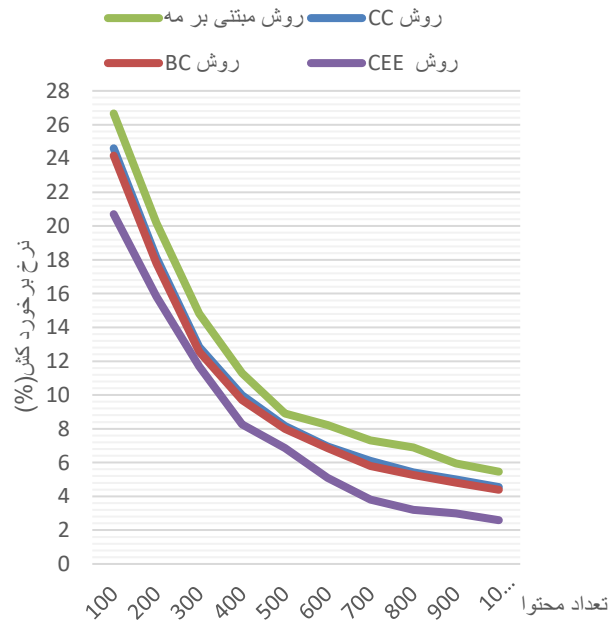
نتایج میانگین تأخیر و نرخ برخورد حافظه نهان نسبت به تعداد محتوا به ترتیب در شکل ۴ (الف) و (ب) نشان داده شده است. به این منظور تعداد محتوا را مقادیر مختلف درنظر گرفته و به ازای هر مقدار شبیه‌سازی انجام شده است. مشاهده می‌کنیم که روش مبتنی بر مه از روش‌های ذخیره‌سازی بررسی شده از نظر نرخ برخورد و تاخیر بهتر عمل می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده، تاثیر اولویت‌بندی داده‌ها و عدم ذخیره‌سازی داده‌های کم اولویت در حافظه نهان گره‌ها را بر کارایی سیستم ذخیره‌سازی تأیید می‌کند. این دستاورد اساساً بدلیل تخصیص فضای ذخیره‌سازی موجود به داده‌های با محبوبیت بالا است.

عملکرد روش مبتنی بر مه بهتر از BC و CC است. . در روش CE^2 بدلیل ذخیره‌سازی تمامی داده‌ها، به سرعت حافظه‌های نهان موجود در شبکه پر می‌شوند. به همین ترتیب تعداد دفعات جایگزینی داده‌ها افزایش می‌یابد و کارایی حافظه نهان کاهش می‌یابد. در سناریوی بررسی شده، نرخ برخورد در روش CC نزدیک به نتایج حاصل از روش BC است. با این حال، از نظر میانگین تاخیر متوسط، BC بهتر از CC عمل می‌کند.

همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش تعداد محتوا، نرخ برخورد حافظه نهان در همه روش‌ها کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش محتوا، احتمال بیشتری برای درخواست محتوای متمایز بوجود می‌آید. همچنین با افزایش تعداد محتوا، میانگین تاخیر بالاتری نیز تجربه می‌شود. به طورکلی نتایج بدست آمده، نشان دهنده بهبود کارایی ذخیره‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های بررسی شده است.



(الف) میانگین تاخیر



(ب) میانگین نرخ برخورد کش

شکل ۴: مقایسه روش مبتنی بر مه با سه روش CC ، BC و CEE

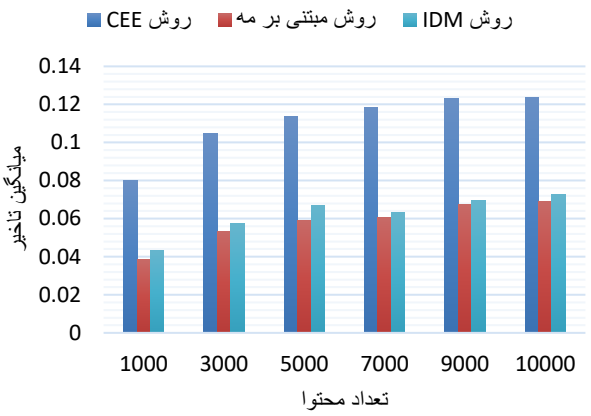
در ادامه برای ارزیابی کاملتر روش مبتنی بر مه، سناریوی دیگری را نیز بررسی می‌کنیم. در سناریوی دوم تعداد محتوای موجود در

شبکه را افزایش می‌دهیم. از تعداد محتوا ۱۰۰۰ شروع کرده و شبیه سازی را انجام می دهیم. به همین ترتیب مرحله به مرحله پیش می رویم. حداکثر تعداد محتوای شبیه سازی شده ۱۰۰۰۰ در نظر می گیریم. باتوجه به حجم بالای داده تعریف شده در این سناریو، اندازه حافظه نهان را ۱۰۰ بسته داده فرض می‌کنیم. پارامتر طول عمر داده را نیز در این سناریو درنظر می‌گیریم. منظور از طول عمر داده، مدت زمانی است که از تولید داده توسط تولیدکننده اصلی گذشته است. همه محتواها با اندازه یکسان فرض شده‌اند. اندازه هر محتوا برابر ۱۰ بسته داده است. اندازه حافظه نهان تعریف شده برای تمام مسیریاب‌های میانی NDN نیز یکسان است. دیگر مشخصات شبیه‌سازی مانند توپولوژی که در این قسمت ذکر نشده، با سناریوی اول یکسان است.

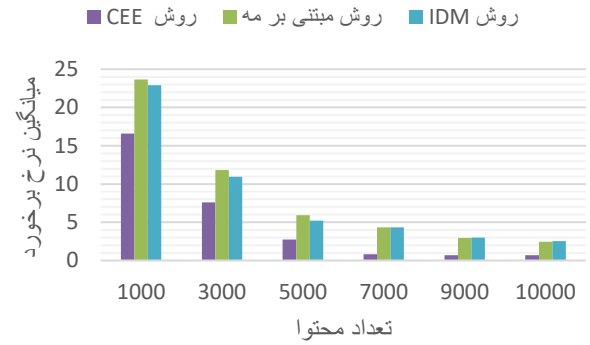
برای ارزیابی روش مبتنی بر مه را با روش IDM [13]و روش CE[2] مقایسه می‌کنیم. نتایج به دست آمده در شکل ۵ مشخص شده است. همانطور که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، افزایش تعداد محتوا، در همه روشها منجر به کاهش نرخ برخورد کش شده و از طرف دیگر افزایش تاخیر را به دنبال دارد. روش IDM، با هدف بهبود کارایی کشینگ از طریق دسته‌بندی داده‌ها ارائه شده است. از اینرو داده‌ها براساس پارامتر طول عمر دسته‌بندی شده و نودهای مناسب برای کشینگ هر دسته تعیین می‌گردد. باتوجه به اینکه داده‌ها با طول عمر طولانی تر، از نظر کشینگ، اهیمت بیشتری دارند[۱۳].

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، زمانی که تعداد محتوا به مقدار زیادی افزایش می‌یابد، میانگین تاخیر و نرخ برخورد کش روش IDM و روش مبتنی بر مه تقریباً مشابه هم هستند. در شبیه‌سازی‌هایی که با تعداد کمتر محتوا انجام شده است، روش مبتنی بر مه بهتر عمل می‌کند. در روش CEE ،حالت پیش فرض شبکه های NDN، بیشترین میزان تاخیر را مشاهده می کنیم.

باتوجه به اینکه در روش مبتنی بر مه، از مشخصه محبوبیت استفاده شده، افزایش تعداد محتوا منجر به کاهش نرخ برخورد در نودهای میانی شده و افزایش تاخیر را به همراه دارد. نتایج شبیه‌سازی نیز این نکته را تصدیق می‌کند.



الف)



ب)

شکل ۵: بررسی افزایش تعداد محتوا بر میانگین تاخیر و نرخ برخورد کش در سه روش مبتنی بر مه، CEE و IDM

۴- نتیجه گیری و جمع بندی

آینده رایانش مه، به دلیل قابلیت های جذابی که ایجاد مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه را تقویت کرده و پیشرفت صنعت را تسریع می‌کند، برای رشد قابل توجه آماده است. این تکامل احتمالاً فروشندگان و صنایع جدیدی را جذب خواهد کرد که هر کدام پیشنهادات منحصر به فرد و معماری‌های شبکه ای جدیدی را ارائه می دهند. یک پیشرفت نویدبخش،[۲۰] FaaS است که در آن ارائه دهندگان خدمات، گره‌های مه به هم پیوسته را در یک منطقه مستقر می‌کنند. این رویکرد، ایجاد برنامه ها و خدماتی را که پیاده سازی آنها با پلتفرم های سنتی مبتنی بر ابر دشوار است، امکان‌پذیر می سازد. به عنوان مثال، راه حل‌های امنیتی مبتنی بر مه می توانند به طور مؤثر با چالش های متعدد موجود در چشم انداز IoT مقابله کنند. علاوه بر این، راه اندازی فناوری ۵G، ظهور ابتکارات شهر هوشمند و ایجاد محیط‌های محاسباتی توزیع شده با هوش محیطی تعبیه شده، جنبه های مختلف زندگی روزمره را متحول

خواهد کرد. این پیشرفت ها، نظارت بر سلامت و سیستم های پیش بینی و بازیافت و مدیریت پسماند را بهبود می‌بخشند، اتصال بین افراد را تسهیل می‌کنند و منجر به پوشیدنی‌ها، ساختمان‌ها، سیستم های حمل و نقل و خانه های سازگارتر می شوند [۱].

به طور خلاصه ،رایانش مه به عنوان یک فناوری نوین و کارآمد در مدیریت داده‌ها و پردازش اطلاعات در محیط‌های توزیع شده شناخته می شود. این رویکرد با نزدیک‌تر کردن منابع پردازشی به محل تولید داده‌ها، نه تنها تأخیر را کاهش می‌دهد بلکه پهنای باند شبکه را نیز بهینه می‌سازد. با توجه به گسترش اینترنت اشیاء و نیاز روزافزون به تحلیل داده‌ها در زمان واقعی، رایانش مه می‌تواند نقش کلیدی در تسهیل و بهبود عملکرد سیستم‌های هوشمند ایفا کند. بنابراین، سرمایه‌گذاری در این حوزه و توسعه راهکارهای مبتنی بر رایانش مه می‌تواند به پیشرفت های چشمگیری در صنایع مختلف منجر شود و زمینه ساز نوآوری های بیشتری در آینده باشد.

مراجع

[1] T. P. Da Silva et al., “Fog Computing Platforms for Smart City Applications: A Survey,” ACM Trans. Internet Technol., vol. 22, no. 4, 2022, doi: 10.1145/3488585.

[2] P. Hu, S. Dhelim, H. Ning, and T. Qiu, “Survey on fog computing: architecture, key technologies, applications and open issues,” J. Netw. Comput. Appl., vol. 98, no. September, pp. 27–42, 2017, doi: 10.1016/j.jnca.2017.09.002.

[3] M. Aazam and E. N. Huh, “Fog computing and smart gateway based communication for cloud of things,” Proc. - 2014 Int. Conf. Futur. Internet Things Cloud, FiCloud 2014, pp. 464–470, 2014, doi: 10.1109/FiCloud.2014.83.

[4] P. Hu, S. Dhelim, H. Ning, and T. Qiu, “Survey on fog computing: architecture, key technologies, applications and open issues,” J. Netw. Comput. Appl., vol. 98, no. April, pp. 27–42, 2017, doi: 10.1016/j.jnca.2017.09.002.

[5] M. A. Al-Shareeda, A. A. Alsadhan, H. H. Qasim, and S. Manickam, “The fog computing for internet of things: review, characteristics and challenges, and open issues,” Bull. Electr. Eng. Informatics, vol. 13, no. 2, pp. 1080–1089, Apr. 2024, doi: 10.11591/EEI.V13I2.5555.

[6] A. Djama, B. Djamaa, and M. R. Senouci, “Information-Centric Networking solutions for the Internet of Things: A systematic mapping review,” 2020. doi: 10.1016/j.comcom.2020.05.003.

[7] L. Zhang et al., “Named data networking,” Comput. Commun. Rev., 2014, doi: 10.1145/2656877.2656887.

[8] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. Plass, N. Briggs, and R. Braynard, “Networking named content,” Commun. ACM, 2012, doi: 10.1145/2063176.2063204.

[9] D. Saxena, V. Raychoudhury, N. Suri, C. Becker, and J. Cao, “Named Data Networking: A survey,” 2016. doi: 10.1016/j.cosrev.2016.01.001.

[10] N. Askar et al., “Forwarding Strategies for Named Data Networking based IOT: Requirements, Taxonomy, and Open Research Challenges,” IEEE Access, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3276713.

[11] A. A. Alahmad, A. H. Mohd Aman, F. Qamar, and W. Mardini, “Efficient Caching Strategies in NDN-Enabled IoT Networks: Strategies, Constraints, and Future Directions,” Sensors (Basel)., vol. 25, no. 16, p. 5203, Aug. 2025, doi: 10.3390/S25165203.

[12] S. Kumar, R. Tiwari, S. Kozlov, and J. J. P. C. Rodrigues, “Minimizing delay in content-centric networks using heuristics-based in-network caching,” Cluster Comput., 2022, doi: 10.1007/s10586-021-03405-1.

[13] M. S. Zahedinia, M. R. Khayyambashi, and A. Bohlooli, “IoT data management for caching performance improvement in NDN,” Cluster Comput., vol. 27, no. 4, pp. 4537–4550, 2024, doi: 10.1007/s10586-023-04197-2.

[14] I. Abdullahi, S. Arif, and S. Hassan, “Survey on caching approaches in Information Centric Networking,” J. Netw. Comput. Appl., vol. 56, no. 2015, pp. 48–59, 2015, doi: 10.1016/j.jnca.2015.06.011.

[15] A. V. Vasilakos, Z. Li, G. Simon, and W. You, “Information centric network: Research challenges and opportunities,” J. Netw. Comput. Appl., vol. 52, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1016/j.jnca.2015.02.001.

[16] R. Ullah, S. H. Ahmed, and B. S. Kim, “Information-centric networking with edge computing for IoT: Research challenges and future directions,” IEEE Access, vol. 6, no. c, pp. 73465–73488, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2884536.

[17] Y. Chen, Y. Chang, C. Chen, Y. Lin, and J. Chen, “Cloud-Fog Computing for Information-Centric Internet-of-Things Applications,” pp. 637–640, 2017.

[18] A. Botta, W. De Donato, V. Persico, and A. Pescapé, “Integration of Cloud computing and Internet of Things: A survey,” Futur. Gener. Comput. Syst., 2016, doi: 10.1016/j.future.2015.09.021.

[19] M. Aazam, S. Zeadally, and K. A. Harras, “Offloading in fog computing for IoT: Review, enabling technologies, and research opportunities,” Futur. Gener. Comput. Syst., vol. 87, pp. 278–289, 2018, doi: 10.1016/j.future.2018.04.057.

[20] P. Bellavista, J. Berrocal, A. Corradi, S. K. Das, L. Foschini, and A. Zanni, “A survey on fog computing for the Internet of Things,” Pervasive Mob. Comput., vol. 52, pp. 71–99, 2019, doi: 10.1016/j.pmcj.2018.12.007.

[21] D. Gupta, S. Rani, and S. H. A. Shah, “ICN-Fog Computing for IoT-Based Healthcare,” in IoT-Enabled Smart Healthcare Systems, Services and Applications, 2022, pp. 19–37. doi: 10.1002/9781119816829.ch2.

[22] M. Aazam and E. N. Huh, “Fog computing and smart gateway based communication for cloud of things,” in Proceedings - 2014 International Conference on Future Internet of Things and Cloud, FiCloud 2014, 2014, pp. 464–470. doi: 10.1109/FiCloud.2014.83.

[23] S. Li et al., “IoT Middleware Architecture over Information-Centric Network,” 2015.

[24] M. Wang, J. Wu, G. Li, J. Li, Q. Li, and S. Wang, “Toward mobility support for information-centric IoV in smart city using fog computing,” in 2017 5th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2017, 2017, pp. 357–361. doi: 10.1109/SEGE.2017.8052825.

[25] I. U. Din, S. Hassan, M. K. Khan, M. Guizani, O. Ghazali, and A. Habbal, “Caching in Information-Centric Networking: Strategies, Challenges, and Future Research Directions,” IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 20, no. 2, pp. 1443–1474, 2018, doi: 10.1109/COMST.2017.2787609.

[26] A. Montazeri, “Analytical Investigation of On-Path Caching Performance in Information Centric Networks A PhD Thesis Submitted to the College of Graduate and Postdoctoral Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Dep,” 2018.

[27] W. K. Chai, D. He, I. Psaras, and G. Pavlou, “Cache ‘less for more’ in information-centric networks,” in International Conference on Research in Networking, Springer, 2012, pp. 27–40.

[28] M. Meddeb, A. Dhraief, A. Belghith, T. Monteil, K. Drira, and S. Alahmadi, “Cache freshness in named data networking for the internet of things,” Comput. J., vol. 61, no. 10, pp. 1496–1511, 2018, doi: 10.1093/comjnl/bxy005.

پاورقی‌ها:

[1] Fog computing
[2] context awareness
[3] SaaS
[4] PaaS
[5] IaaS
[6] QoS
[7] IoT
[8] Named Data Network
[9] Interest
[10] Forwarding Information Base
[11] Name Prefix
[12] Interface ID
[13] Routing preferences
[14] Pending Interest Table
[15] Content Store
[16] Ullah
[17] Virtualization
[18] Zipf'-law
[19] Skewness parameter
[20] Fog-as-a-Service