

بهبود تأخیر و انرژی در بارگیری وظایف در شبکه‌های اینترنت اشیا مبتنی بر مه با استفاده از شبکه‌های نرم‌افزارمحور

رضا خالقی‌فر، رضا محمدی، محمد نصیری و سکینه سهرابی

دیگری از خدمات را به کاربران ارائه کرده است. به‌طور کلی در محیط محاسبات مه، دستگاه‌های اینترنت اشیا به دستگاه‌های مه متصل هستند. این دستگاه‌ها در نزدیکی کاربران قرار دارند و این مسئله به کمک کاهش تأخیر منجر به بهبود کارایی سامانه می‌شود. محاسبات مه یک مدل محاسباتی غیرمتمرکز است که می‌تواند به رایانش ابری برای ارائه خدمات با کیفیت بالا (QoS) کمک کند [۱] و [۲].

دستگاه‌های مه در نزدیکی شبکه قرار دارند و ذخیره داده، محاسبات و سایر خدمات را در اختیار کاربران قرار می‌دهند. اما باید توجه داشت که این دستگاه‌ها با محدودیت منابع مواجه هستند و افزایش درخواست‌های کاربر منجر به ازدحام شبکه، سربار محاسباتی، افزایش ارتباطات و مدت زمان طولانی ارائه خدمات می‌شود [۳] و [۴].

منابع پردازش گره‌های اینترنت اشیا نمی‌توانند به تنهایی با حجم کاری تولیدشده توسط دستگاه‌های اینترنت اشیا کنار بیایند. پردازش بخش‌هایی از حجم کار در ابرها می‌تواند این مشکل را حل کند، اما کیفیت خدمات برای کاربران نهایی کاهش می‌یابد. با توجه به کاهش تأخیر برای کاربران نهایی، مفهوم پردازش در دستگاه‌های مه که در لبه شبکه هستند، تکامل یافته است.

باید توجه داشت که بحث توازن بار، یک حوزه مطالعاتی بسیار جالب و مهم در محیط محاسباتی مه به شمار می‌آید؛ زیرا هدف آن دستیابی به استفاده بهینه از منابع است. از این رو زمان‌بندی کار در یک گره مه که یک مسئله NP کامل/ سخت است، بسیار حائز اهمیت است [۵]. ایده پیشنهادی در این پژوهش برای برنامه‌هایی که حساس به زمان هستند و آنها بر اهمیت QoS تأکید دارند، مناسب است. نمونه‌ای از این کاربردها نظارت، بازی آنلاین، اورژانس و مراقبت‌های بهداشتی است.

از سوی دیگر اینترنت اشیا دارای کاربردهای نظامی بسیار قوی بوده و در واقع در صنایع نظامی شامل طیف وسیعی از دستگاه‌هایی است که دارای توانایی‌های مختلف از طریق رابط‌های سایبری یا مجازی هستند. اینترنت اشیا می‌تواند سربازان، تانک‌ها، هواپیماها، کشتی‌ها و هواپیماهای بدون سرنشین و پایگاه‌های عملیاتی را در یک شبکه منسجم متصل کند. به گفته محققان یکی از عناصر اصلی در اینترنت اشیا نظامی، محاسبات لبه‌ای قوی است که از سنسورهای محیطی و سایر دستگاه‌های متصل به منظور دریافت و ارسال سریع اطلاعات و کمک به کادر نظامی در موقعیت‌های بالقوه خطرناک در میدان نبرد استفاده می‌کند [۶].

ساختارهای بارگیری وظیفه در مقالات موجود، بار شبکه در مسیر دستگاه به سرور لبه را در نظر نگرفته‌اند و عمدتاً بر روی توان محاسبه و مصرف انرژی متمرکز شده‌اند. از آنجا که پروتکل‌های اینترنت اشیا مانند MQTT-SN و CoAP برای اطمینان از تحویل قابل اطمینان، از انتقال مجدد لایه برنامه استفاده می‌کنند، از بین رفتن بسته به دلیل ازدحام

چکیده: رشد سریع فناوری اینترنت اشیا منجر به ظهور انواع مختلفی از برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیا حساس به تأخیر شده است. این برنامه‌ها به منابع محاسباتی قابل توجهی برای پردازش در زمان واقعی نیاز دارند که منجر به مصرف زیاد انرژی در دستگاه‌های اینترنت اشیا می‌شود. برای پرداختن به این مسئله، بارگیری وظایف با استفاده از محاسبات مه به‌عنوان یک راه‌حل جدید ظاهر شده است. بارگیری وظیفه با استفاده از محاسبات مه، باعث کاهش تأخیر و انعطاف‌پذیری دستگاه‌های اینترنت اشیا می‌گردد. در این پژوهش یک مدل ریاضی با هدف کاهش میزان تأخیر انتهابه‌انتها و مصرف انرژی برای بارگیری وظایف در شبکه اینترنت اشیا و مه که مبتنی بر زیرساخت شبکه‌های نرم‌افزارمحور می‌باشد، معرفی شده است. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی بر اساس معیارهای تأخیر و انرژی مصرفی با دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و سوسک‌های بال آتشین و همچنین مقاله پایه مقایسه شده است. پس از پیاده‌سازی سناریو و تجزیه و تحلیل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاکی از آن است که مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری توانسته است که به طور میانگین و تقریبی، تأخیر و انرژی مصرفی را به ترتیب ۱۸ و ۱۹ درصد کاهش دهد.

کلیدواژه: اینترنت اشیا، الگوریتم بهینه‌سازی سوسک‌های بال آتشین، رایانش مه، شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار.

۱- مقدمه

این فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیا منجر به تولید حجم بالای داده می‌شوند که پردازش درخواست‌های اینترنت اشیا تنها بر روی محیط محاسباتی ابر راه‌حل کارآمدی نیست؛ به‌خصوص برای برخی از برنامه‌های اینترنت اشیا که حساس به زمان هستند و این مسئله باعث کاهش کارایی سامانه می‌شود.

برای رسیدگی به این مسئله، محاسبات مه که در میان دستگاه‌های ابر و اینترنت اشیا قرار دارد، پیشنهاد شد. محاسبات مه، بخش عظیمی از صنعت فناوری اطلاعات را درگرون کرده و با ویژگی‌هایی که دارد شکل

این مقاله در تاریخ ۲۳ اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ دریافت و در تاریخ ۱۲ اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

رضا خالقی‌فر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، (email: r.khaleghifar@eng.basu.ac.ir).

رضا محمدی (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، (email: r.mohammadi@basu.ac.ir).

محمد نصیری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، (email: m.nassiri@basu.ac.ir).

سکینه سهرابی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، (email: s.sohrabi@eng.basu.ac.ir).

جدول ۱: ویژگی‌های مربوط به الگوریتم‌های بررسی‌شده.

مقاله	مزایا	معایب	تکنیک مورد استفاده
[۱۴]	متعادل کردن بار و تأثیر مثبت آن در زمان‌بندی	مشکلات ایجاد زیرساخت	استفاده از CNN و MPSO
[۱۵]	برنامه‌نویسی هدفمند و پویا	مراحل برنامه‌نویسی زیاد	رویکرد برنامه‌نویسی هدف
[۱۶]	پیاده‌سازی نسبتاً راحت	زمان‌بر بودن	مدل تئوری صف
[۱۷]	یک مبادله بین مصرف انرژی و تأخیر در پردازش بارهای کاری در مه فرموله‌شده	پشتیبانی و پیاده‌سازی پیچیده	استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه
[۱۸]	یک رویکرد مبتنی بر حریصانه-اکتشافی رای حل مؤثر مسئله	مراحل زیاد و هزینه نسبتاً بالا	توسط نرم‌افزار برای برنامه‌های اینترنت اشیا
[۱۹]	کاهش تأخیر در پردازش و تأخیر ارتباطی بین گره‌های ابر و مه و کنترل نوسانات تأخیر پردازش	پیچیدگی زیاد و زیرساخت‌های لازم	استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی‌کننده یادگیری

نجفی‌زاده و همکارانش [۱۵] الگوریتم MOSA را ارائه کرده‌اند که مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه می‌باشد که برای زمان‌بندی کارها در محیط مه ارائه شده است. در روش مذکور با توجه به ماهیت چندهدفه الگوریتم پیشنهادی، از رویکرد برنامه‌نویسی هدف (GPA) برای شناسایی مناسب‌ترین راه‌حل در بین راه‌حل‌های غیرغالب استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های MOPSO، MOTS و MOMF عملکرد بهتری دارد و دارای دو مزیت بهترین مبادله بین اهداف زمان و هزینه است و کمترین تخطی از شرایط مربوط به دو هدف دیگر مسئله یعنی کنترل سطح دسترسی و مهلت اجرای کارها می‌باشد. باید توجه داشت که در این روش به معیارهایی همچون اولویت و توازن بار پرداخته نشده است.

در پژوهشی دیگر، یک چارچوب برای مدل محاسبات ابر-مه بر اساس تئوری صف ارائه گردیده است. باید توجه داشت در بسیاری از سناریوهایی که ممکن است منابع کمیاب باشند یا کیفیت خوب خدمات یک نیاز باشد، اندازه مناسب اجزا و دستگاه‌ها یکی از چالش‌های اصلی است. از این رو با کمک مدل‌های تئوری صف می‌توان رویکرد خوبی برای درک چگونگی رفتار یک معماری معین برای مجموعه‌ای از پارامترها ارائه کرد. مدل‌های تئوری صف به شناسایی مشکلات احتمالی و گلوگاه‌ها کمک می‌کنند. برای رسیدگی به چالش‌های مدل محاسباتی ابر-مه با محدودیت‌های QoS یا SLA با حداقل هزینه منابع و کاهش زمان پاسخ روش پیشنهادی عملکردی خوبی دارد. باید توجه داشت در این روش، پارامترها به صورت دستی تنظیم شده‌اند و بهتر بود برای اطمینان از استفاده بهینه از گره‌ها از یک الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن بهترین مقدار پارامترها استفاده شود. همچنین در این روش به معیارهایی همچون اولویت، توازن بار و مهلت اجرا پرداخته نشده است [۱۶].

در مقاله‌ای که یعقوبی‌کیا و همکارانش [۱۷] عنوان کرده‌اند، با رشد سریع دستگاه‌های محاسباتی متصل به شبکه، اینترنت اشیا (IoT)، مقدار داده‌های تولیدشده و بارهای محاسباتی به طور چشمگیری افزایش یافته است. یک راه‌حل برای رسیدگی به این حجم عظیم از کار، محاسبات ابری است که در آن تأخیر قابل توجهی در پردازش وجود دارد و این یک نگرانی در زمینه شبکه‌های محاسباتی توزیع‌شده می‌باشد. پردازش بارهای کاری در لبه شبکه می‌تواند به طور چشمگیری زمان پاسخگویی را کاهش دهد و در عین حال محدودیت‌های انرژی را با رساندن وظیفه پردازش بار از مراکز داده که توسط منابع انرژی الکتریکی تأمین می‌شود، به لبه‌های شبکه که با محدودیت همراه است، تحمیل کند. برای مثال در لبه شبکه با محدودیت انرژی باتری‌ها مواجه هستیم؛ بنابراین حجم کار باید به طور مساوی بین ابرها و لبه‌های شبکه توزیع شود.

سادیب و همکارش [۱۸] در پژوهشی دیگر مشکل بارگذاری وظیفه در یک شبکه دسترسی تعریف‌شده توسط نرم‌افزار را در نظر می‌گیرند که در

شبکه منجر به افزایش مصرف انرژی در دستگاه‌های اینترنت اشیا می‌شود [۷] و [۸]؛ بنابراین هنگام تصمیم‌گیری درباره بارگیری وظیفه، باید بار پویای روی شبکه نیز در نظر گرفته شود. این موضوع می‌تواند با استفاده از یک شبکه نرم‌افزارمحور برای معماری اینترنت اشیا فراهم شود [۹] و [۱۰]. از آنجا که شبکه نرم‌افزارمحور می‌تواند کنترل منطقی متمرکز، دید سراسری از شرایط شبکه و باز ارسال انعطاف‌پذیر مبتنی بر قوانین را ارائه دهد، انتزاعات مدیریت شبکه ارائه‌شده توسط شبکه نرم‌افزارمحور به کنترل‌کننده شبکه نرم‌افزارمحور این امکان را می‌دهد تا اطلاعات شبکه را از دستگاه‌های بی‌سیم ناهمگن از طریق فناوری‌های مختلف بی‌سیم جمع‌آوری کند [۱۱].

بنابراین مدیران شبکه با استفاده از دید سراسری شبکه، قادر به تصمیم‌گیری بهینه برای بارگیری وظایف هستند. علاوه بر این، شبکه نرم‌افزارمحور از نظر انعطاف‌پذیری شبکه و ساده‌سازی مدیریت شبکه، برای تنظیم و مدیریت زیرساخت‌های اینترنت اشیا که مبتنی بر مه هستند، مزایایی را نیز ارائه می‌دهد [۱۲] و [۱۳]. این باعث می‌شود شبکه نرم‌افزارمحور برای رسیدگی به مشکل بارگیری وظایف در یک سناریوی اینترنت اشیا پویا از جذابیت خاصی برخوردار باشد.

در ادامه و در بخش ۲ مقاله، کارهای پیشین در این حوزه مورد بررسی قرار گرفته و سپس در بخش ۳ فرموله‌سازی و فرض‌های مسئله بیان شده است. در بخش ۴ مدل پیشنهادی ارائه گردیده و در بخش ۵ محیط شبیه‌سازی و شاخص‌های ارزیابی معرفی شده است. بخش ۶ تجزیه و تحلیل نتایج را نشان داده و در بخش ۷ نتیجه‌گیری نهایی مقاله بیان شده است.

۲- کارهای پیشین

در این بخش به معرفی کارهای پیشین در حوزه توازن بار، زمان‌بندی وظایف و بارگیری وظایف پرداخته شده است. در جدول ۱ ویژگی‌های مربوط به الگوریتم‌های بررسی‌شده آمده است.

Talaat و همکارانش [۱۴] الگوریتم EDLB را ارائه کرده‌اند. الگوریتم مذکور یک تکنیک موازنه بار پویای مؤثر می‌باشد که مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشن و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح‌شده است. هدف اصلی روش مذکور دستیابی به توازن بار در محیط محاسباتی مه از طریق الگوریتم زمان‌بندی بی‌درنگ پویاست. چالش‌های مختلفی در بحث توازن بار وجود دارد که می‌توان به مسائلی همچون امنیت و تحمل خطا اشاره کرد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر آن است که الگوریتم EDLB در مقایسه با الگوریتم‌های GA، WRR و BLA عملکرد بهتری داشته و منجر به کاهش زمان پاسخ، بهبود توازن بار کاری سامانه و افزایش بهره‌وری از منابع می‌شود. در این مقاله به معیارهایی همچون اولویت و تأخیر پرداخته نشده است.

از دستگاه اینترنت اشیا به کارگزار مه محاسبه می‌شود. در این مدل از تأخیر انتشار، صرف‌نظر و تأخیر انتقال با استفاده از (۲) محاسبه می‌شود

$$\delta_j^{tx} = \frac{s_i}{bw_{ij}} \quad (2)$$

پس از دریافت کار توسط کارگزار مه، کارگزار مه بر اساس مؤلفه b_i تصمیم می‌گیرد کار را به گره‌های مه خود بسپارد و یا آن را برای ابر ارسال کند. در صورتی که $b_i = 0$ باشد، کار برای پردازش بر اساس معیارهای مد نظر به یکی از گره‌های مه تخصیص داده می‌شود که در این صورت تأخیر، از مجموع تأخیر زمان منتظرماندن کار در صف پردازش δ_j^{que} و زمان پردازش کار δ_i^{fog} محاسبه شده است. در این مدل با توجه به اینکه در گره مه مدل صف $M/M/1$ در نظر گرفته شده، تأخیر صف با استفاده از (۳) محاسبه می‌شود

$$\delta_j^{que} = \frac{1}{\mu_j - \lambda_j} \quad (3)$$

همچنین برای محاسبه تأخیر پردازش از (۴) استفاده می‌شود که در آن w_i میزان پردازش مورد نیاز کار و f_j توان پردازش گره مه است

$$\delta_i^{fog} = \frac{w_i}{f_j} \quad (4)$$

شرایط محاسبه b_i مشابه a_i در نظر گرفته شده است. یعنی در صورتی که $b_i = 1$ باشد، کار به کارگزار مه ارسال می‌شود و در صورتی که $0 < b_i < 1$ باشد، بخشی در مه و بخشی در ابر پردازش می‌شود. به طور کلی در روش پیشنهادی تأخیر را می‌توان با (۵) نمایش داد

$$J_{\delta}(x, y, z, v, a, b) = \sum_i [(a_i \times \delta_i^{loc}) + (1 - a_i)(\delta_i^{tx} + \delta_i^{ppp}) + (b_i(\delta_i^{fog}) + (1 - b_i)(\theta_i^{tx} + \theta_i^{ppp} + \theta_i^{cloud}))] + \sum_j \delta_j^{que} + \sum_l \theta_l^{que} \quad (5)$$

۳-۳ مدل انرژی

همان طور که قبلاً اشاره شد، با استفاده از متغیر a_i متوجه خواهیم شد که پردازش در داخل دستگاه اینترنت اشیا به صورت محلی انجام می‌شود و یا اینکه پردازش به کارگزار مه ارسال می‌شود تا کار به گره‌های مه تخصیص داده شود و یا به کارگزار ابر ارسال شود. بر همین اساس انرژی مصرف‌شده بر روی دستگاه اینترنت اشیا از دو بخش تشکیل شده است. در صورتی که کار به کارگزار مه ارسال شود، با استفاده از متغیر b_i متوجه خواهیم شد که کار در گره‌های مه پردازش می‌شود و یا اینکه کار برای پردازش به کارگزار ابر ارسال می‌شود. بر همین اساس انرژی مصرف‌شده بر روی گره‌های مه از دو بخش تشکیل شده است. انرژی مصرف‌شده توسط گره‌های مه در حالتی که کار در گره مه انجام شود با استفاده از (۶) محاسبه می‌شود

$$e_i^{fog} = p_j \times (f_j)^{\alpha} \times w_i \quad (6)$$

زمانی که کارگزار مه تصمیم می‌گیرد کار را برای تخصیص و پردازش به کارگزار ابر ارسال کند، انرژی مصرف‌شده برای انجام این کار با استفاده از (۷) محاسبه می‌شود

$$e_i^{tx(fog-cloud)} = p_i^{tx-fog} \times \theta_i^{tx} \quad (7)$$

آن، دستگاه‌های اینترنت اشیا به گره‌های محاسباتی که از طریق نقاط دسترسی اینترنت اشیا با ساختار چند گامه متصلند، ارتباط می‌یابند. آنها یک رویکرد مبتنی بر حریصانه-اکتشافی را برای حل مؤثر مشکل پیشنهاد داده‌اند. راه‌حل حریصانه تأخیر، مصرف انرژی، مسیرهای چندجهشی و شرایط شبکه پویا مانند استفاده از لینک و ظرفیت قانون SDN را در نظر می‌گیرد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی آنها توانسته است میانگین تأخیر و مصرف انرژی را به ترتیب ۱۲ و ۲۱ درصد در مقایسه با وضعیت فعلی که در پژوهش خود نشان داده‌اند کاهش دهد.

این مقاله یک مدل پردازش برای مشکل ارائه می‌کند که در آن یک مبادله بین مصرف انرژی و تأخیر در پردازش بارهای کاری در مه فرموله شده و این مدل چندهدفه مسئله با استفاده از الگوریتم NSGAII حل شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای تخصیص بار کاری در سناریوی مه-ابر، هم می‌توان مصرف انرژی و هم تأخیر را بهبود بخشید. همچنین با تخصیص ۲۵ درصد از بار کاری اینترنت اشیا به دستگاه‌های مه، مصرف انرژی و تأخیر هر دو به حداقل می‌رسد [۱۹].

۳- فرموله‌سازی و فرض‌های مسئله

در این بخش به فرموله‌سازی مسئله می‌پردازیم. برای این منظور ابتدا مدل بار کاری، تأخیر و انرژی به اختصار توضیح داده شده است.

۱-۳ مدل بار کاری

در این سناریو مدل زمانی، پیوسته فرض شده است. در بازه زمانی پیوسته تعداد و ظرفیت پردازشی دستگاه‌های اینترنت اشیا، مه و ابر مقدار ثابتی خواهد داشت. برای هر دستگاه اینترنت اشیا (d_k) با ویژگی $k \in D$ ، مجموعه وظایف $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$ به صورت زوج‌های مرتب $t_i = (w_i, s_i)$ مدل‌سازی شده است. در این زوج مرتب w_i و s_i به ترتیب تعداد کلاک مورد نیاز برای پردازش برحسب میلیون دستور عمل در ثانیه (MIPS) و اندازه کار ورودی برحسب کیلوبایت (kb) را نمایش می‌دهد.

۲-۳ مدل تأخیر

با توجه به اینکه بعضی از دستگاه‌های اینترنت اشیا دارای منابع محاسباتی هستند، می‌توانند پردازش مورد نیاز را به صورت محلی انجام دهند؛ با این شرط که معیارهای انرژی و تأخیر در نظر گرفته شود. در غیر این صورت کار به کارگزار مه ارسال می‌شود. برای این منظور متغیر α_i به ازای هر کار تولیدی در دستگاه اینترنت اشیا با توانایی پردازش به شکل زیر توصیف شده است:

اگر $\alpha_i = 0$ باشد، پردازش به صورت محلی در دستگاه اینترنت اشیا انجام می‌شود و زمان پردازش با استفاده از (۱) محاسبه می‌شود

$$\delta_i^{loc} = \frac{w_i}{f_k} \quad (1)$$

اگر $0 < \alpha_i < 1$ باشد، در صورتی که کار از نوع تقسیم‌پذیر باشد، متناسب با مقدار متغیر α_i بخشی از کار در دستگاه اینترنت اشیا و بخش دیگر آن به کارگزار مه ارسال می‌شود. در صورتی که کار تقسیم‌پذیر نباشد، کل کار به گره مه ارسال می‌شود.

اگر $\alpha_i = 1$ باشد، کار برای پردازش به کارگزار مه ارسال می‌شود که تأخیر زمانی آن با دو مؤلفه زمان انتقال δ_i^{tx} و زمان انتشار δ_i^{ppp} کار t_i

هر لینک l_{ij} و l_{ji} پهنای باند مشخصی دارد و برای کاهش ازدحام و در نتیجه تعداد ارسال مجدد کمتر بهتر است بیشتر از ظرفیت لینک اطلاعات ارسال نشود. به گونه‌ای که (۱۶) برقرار باشد

$$\begin{aligned} \sum_i \frac{s_i}{\theta_i^{tx}} \times x_{ij} &\leq bw_{ij} \\ \sum_i \frac{s_i}{\theta_i^{tx}} \times z_{ji} &\leq bw_{ji} \end{aligned} \quad (16)$$

تعداد قوانین در جدول قوانین SDN دارای محدودیت می‌باشد و نباید بیشتر از ظرفیت در آن قوانین ذخیره کرد. به گونه‌ای که (۱۷) برقرار باشد. به منظور ساده‌سازی مدل، قوانین جریان تطابق دقیق در نظر گرفته شده‌اند

$$\begin{aligned} \sum_i x_{ij} &\leq R_j \\ \sum_j z_{ji} &\leq R \end{aligned} \quad (17)$$

۴- روش پیشنهادی

در این بخش از مقاله و پس از مدل‌سازی سیستم در روش پیشنهادی که یک مدل مبتنی بر مقاله سادیب و همکارش [۱۸] می‌باشد، یک رویکرد جدید برای تخصیص وظایف به گره‌های مه با بهره‌گیری از الگوریتم فراابتکاری سوسک‌های بال آتشین پیشنهاد شده است.

در مقاله پایه، سادیب و همکارش مطرح کردند که مشکل بارگذاری وظیفه در یک شبکه دسترسی تعریف شده توسط نرم‌افزار را در نظر می‌گیرند. طرح پیشنهادی آنها جنبه‌های زیر را در معماری اینترنت اشیا مبتنی بر محاسبات مه در نظر می‌گیرد:

- (۱) تصمیم بهینه در مورد محاسبه وظایف محلی یا از راه دور
- (۲) انتخاب بهینه گره مه
- (۳) انتخاب مسیر بهینه برای تخلیه

بر این اساس آنها مسئله بارگذاری کار چند هاپ را به عنوان یک برنامه خطی عدد صحیح فرموله می‌کنند. از آنجا که مجموعه امکان‌پذیر غیرمحدب است، یک رویکرد مبتنی بر حریص-اکتشافی را برای حل مؤثر مشکل پیشنهاد داده‌اند. راه حل حریصانه تأخیر، مصرف انرژی، مسیرهای چندجهشی و شرایط شبکه پویا، مانند استفاده از لینک و ظرفیت قانون SDN را در نظر می‌گیرد. تفاوت مدل ارائه شده در این پژوهش و مقاله پایه، هم الگوریتم‌های مورد بررسی و هم معیارهای مورد ارزیابی می‌باشد.

الگوریتم پیشنهادی استفاده شده در این پژوهش در دسته الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت قرار می‌گیرد که برای درک بهتر الگوریتم پیشنهادی، ابتدا الگوریتم تولیدمثل سوسک‌های بال آتشین به اختصار توضیح داده می‌شود. الگوریتم جفت‌گیری سوسک‌های بال آتشین یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید می‌باشد که با الهام از رفتار سوسک‌ها هنگام جفت‌گیری ارائه شده است. نام الگوریتم مذکور FSO^۱ می‌باشد و از پنج رفتار تشکیل می‌شود که در ادامه به توضیح هر یک به اختصار می‌پردازیم.

الف. تشکیل کلنی‌های زن

سوسک‌ها جفت مناسب را جستجو می‌کنند و هر سوسک نر دارای یک کلونی از سوسک‌های ماده به تعداد می‌باشد. باید توجه داشت که در

در صورتی که کار به ابر ارسال شود انرژی مصرفی ابر با استفاده از (۸) محاسبه می‌شود

$$e_i^{cloud} = p_i \times (f_i)^{\alpha} \times w_i \quad (8)$$

تابع هزینه برای مصرف انرژی به صورت کلی طبق (۹) محاسبه شده است

$$\begin{aligned} J_{\epsilon}(x, y, z, v, a, b) &= \sum_i (a_i \times e_i^{loc}) + (1 - a_i)(e_i^{tx(iot-fog)} + \\ & (1 - a_i)(b_i(e_k^{fog}) + (1 - b_i)(e_i^{tx(fog-cloud)} + e_i^{cloud})) \end{aligned} \quad (9)$$

با استفاده از توابع هزینه برای تأخیر و انرژی، مسئله به صورت (۱۰) ارائه شده که برای کنترل نسبی اهمیت تأخیر و انرژی، ثابت $0 \leq \alpha \leq 1$ توسط کاربر تعیین می‌شود. مثلاً چنانچه مسئله از نوع مسائل با حساسیت شدید نسبت به تأخیر باشد، می‌توان مقدار $\alpha = 1$ را در نظر گرفت. در (۱۰) متغیرهای τ_{min}^{energy} و τ_{max}^{energy} ، τ_{min}^{delay} و τ_{max}^{delay} به ترتیب بیشترین و کمترین تأخیر و بیشترین و کمترین انرژی مصرفی در سیستم هستند که این متغیرها به مرور زمان بر اساس وضعیت سیستم به‌روزرسانی می‌شوند

$$\begin{aligned} \min_{x, y, z, v, a, b} J(x, y, z, v, a, b) &= \alpha \times \frac{J_{\delta}(x, y, z, v, a, b) - \tau_{min}^{delay}}{\tau_{max}^{delay} - \tau_{min}^{delay}} \\ &+ (1 - \alpha) \times \frac{J_{\epsilon}(x, y, z, v, a, b) - \tau_{min}^{energy}}{\tau_{max}^{energy} - \tau_{min}^{energy}} \end{aligned} \quad (10)$$

در مدل پیشنهادی فرضیات و محدودیت‌های زیر بررسی شده است. مسیر انتخاب شده بین کار t_i و گره مه fog_j با استفاده از متغیر دودویی x_{ij} مشخص شده است. در صورتی که لینک l_{ij} برای ارتباط استفاده شده باشد، مقدار $x_{ij} = 1$ می‌شود.

برای تضمین این که هر وظیفه t_i صرفاً توسط یک گره محاسباتی پردازش شود، متغیر y_j^i دودویی تعریف شده است، به طوری که (۱۱) برقرار باشد

$$\sum_{j \in F} y_j^i = 1 \quad (11)$$

مسیر انتخاب شده بین گره مه fog_j و گره ابر c_i با استفاده از متغیر دودویی z_{ji} مشخص شده است. در صورتی که لینک l_{ji} برای ارتباط استفاده شده باشد، مقدار $z_{ji} = 1$ می‌شود.

متغیر دودویی v_i^j برای اطمینان حاصل کردن از اینکه کار t_i تنها توسط یک گره ابر c_i پردازش شده است، در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که (۱۲) برقرار باشد

$$\sum_{i \in C} v_i^j = 1 \quad (12)$$

گره‌های مه نمی‌توانند بیشتر از توان پردازشی خود پردازش کنند؛ یعنی (۱۳) باید همواره برقرار باشد

$$\sum_i t_i \leq \sum_j f_j \times y_j^i \quad (13)$$

گره‌های ابر نمی‌توانند بیشتر از توان پردازشی خود پردازش کنند؛ یعنی (۱۴) باید همواره برقرار باشد

$$\sum_i t_i \leq \sum_i f_i \times v_i^j \quad (14)$$

هر دستگاه اینترنت اشیا d_k توان باتری مشخص و محدودی دارد و نباید بیشتر از ظرفیت باتری خود انرژی مصرف کند؛ یعنی (۱۵) باید همواره برقرار باشد

$$a_i \times e_i^{loc} + (1 - a_i)e_i^{tx(iot-fog)} \leq e_k^{available} \quad (15)$$

ج. حرکت سوسک‌های ماده

پس از مقداردهی اولیه، محل سوسک‌های ماده به‌روزرسانی می‌شود. هر سوسک ماده به سمت سوسک نر که کنترل‌کننده کلونی می‌باشد، حرکت می‌کند.

د. جذب سوسک نر به مناسب‌ترین سوسک ماده

هر سوسک نر می‌تواند جذب مناسب‌ترین سوسک ماده شود که در کلونی متعلق به آن نیست. این حرکت سوسک‌های نر به سمت سوسک ماده، کل جمعیت را محدود به یک مکان جغرافیایی خاص نگه می‌دارد و از پراکنده‌شدن دسته‌ها جلوگیری می‌کند. هیچ رقابتی برای مناسب‌ترین سوسک ماده در کلونی یک سوسک نر خاص وجود ندارد. این کار برای جلوگیری از جذب همه سوسک‌های نر به سمت یک سوسک ماده انجام می‌شود.

ه. انسجام ازدحام

در الگوریتم FSO ازدحام رخ داده به عنوان یک واحد به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند و حرکت فردی سوسک‌ها منجر به پراکنده‌شدن جمعیت نمی‌شود. از آنجا که ازدحام به‌صورت تصادفی به شکل یک واحد حرکت می‌کند، حرکت فردی سوسک‌ها باید در جهت حرکت دیگران باشد.

رویکرد پیشنهادی در این پژوهش که مبتنی بر الگوریتم سوسک‌های بال آتشین می‌باشد، شامل ۸ گام کلی است که در شکل ۱ به صورت بلوک دیاگرام نمایش داده شده است. در ادامه توضیحات مربوط به هر یک از گام‌های اساسی در طرح پیشنهادی شرح داده شده است.

(۱) در اولین بخش دستگاه‌های اینترنت اشیا شروع به تولید اطلاعات و بارهای کاری می‌کنند.

(۲) در بخش بعدی بر اساس اینکه دستگاه اینترنت اشیا توان پردازشی دارد یا خیر، روند اجرا به دو بخش تقسیم شده است.

(۳) در صورتی که دستگاه اینترنت اشیا دارای توان پردازشی باشد و (۱۸) برقرار باشد

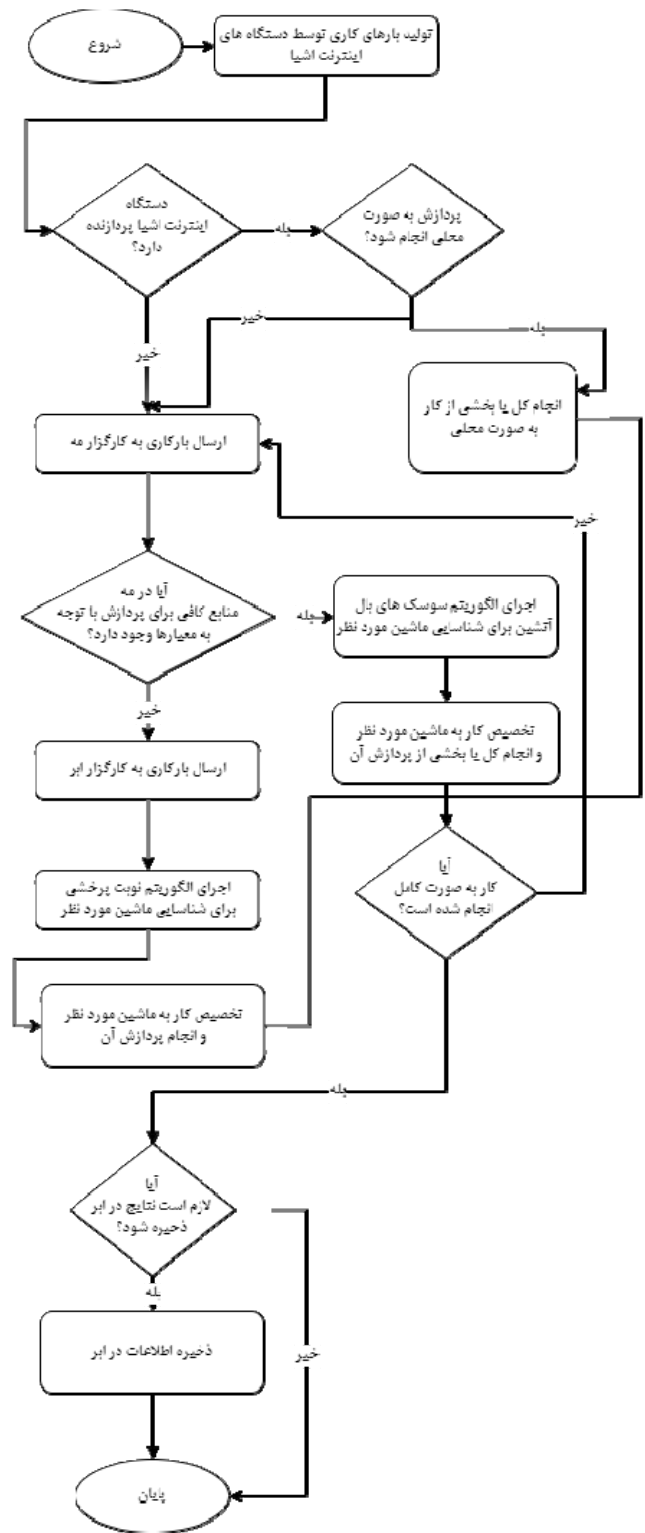
$$e_k^{threshold} < e_k^{available} \quad (18)$$

با استفاده از (۱۹) بر اساس مقدار U_i^{off} مشخص شده که کل یا بخشی از کار توسط دستگاه اینترنت اشیا انجام شود و یا کار به کارگزار مه ارسال شود. در صورتی که مقدار $U_i^{off} \geq 0$ باشد، کار برای پردازش به کارگزار مه ارسال می‌شود. لازم به ذکر است در صورتی که کار بخش‌پذیر باشد ابتدا قسمت اول کار توسط (۱۹) بررسی می‌شود و اگر قسمت اول قابل پردازش باشد، قسمت‌های بعدی را بررسی می‌کنیم. در این رابطه متغیر β_δ نسبت اهمیت تأخیر و β_e نسبت اهمیت انرژی را نشان می‌دهد که هر دو اعدادی بین ۰ و ۱ هستند؛ به گونه‌ای که $\beta_\delta + \beta_e = 1$ باشد

$$U_i^{off} = \beta_\delta \frac{\delta_i^{loc} - \delta_i^{tx}}{\delta_i^{loc}} + \beta_e \frac{e_i^{loc} - e_i^{tx}}{e_i^{loc}} \quad (19)$$

(۴) در صورتی که دستگاه اینترنت اشیا نتواند کار را انجام دهد، کار به کارگزار مه ارسال می‌شود و کارگزار مه در صورتی که میزان تأخیر صف گره‌های مه کمتر از میزان تأخیر ارسال کار به کارگزار ابر باشد، تصمیم می‌گیرد کار در مه یا ابر انجام شود. در صورتی که چارک اول تأخیر صف کوچک‌تر از تأخیر انتقال باشد (یعنی (۲۰) برقرار باشد)، کار در گره مه پردازش می‌شود و در غیر این صورت کار برای پردازش به کارگزار ابر ارسال می‌گردد

$$Q(\delta_j^{que}) < \theta_i^{tx} \quad (20)$$



شکل ۱: بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی.

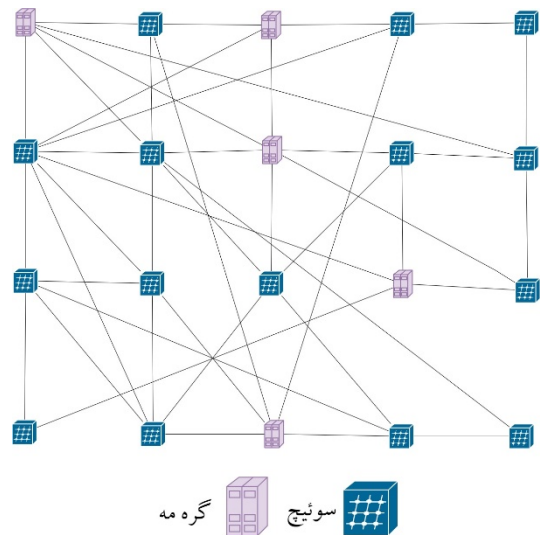
ابتدای الگوریتم FSO، تعداد معینی سوسک ماده وجود خواهد داشت که به‌طور تصادفی در فضای جستجو توزیع می‌شوند. هر سوسک دارای یک موقعیت خاص در فضای مسئله و مقدار تابع هزینه مربوط به آن موقعیت است.

ب. انتخاب همسر

از آنجا که سوسک نر فقط با قوی‌ترین سوسک ماده جفت می‌شود، پس موقعیت هر سوسک نر با توجه به موقعیت بهترین سوسک ماده در کلونی خود به‌روزرسانی می‌شود.

جدول ۲: لیست پارامترهای شبیه‌ساز.

پارامتر	مقادیر سناریو
تعداد گره‌های اینترنت اشیا	۵۰ - ۲۵۰
توان پردازشی گره اینترنت اشیا (مگاهرتز)	۱۶ - ۸۴
ظرفیت باتری گره‌های اینترنت اشیا (ژول)	۱۰۰۰
پهنای باند گره اینترنت اشیا (مگابیت بر ثانیه)	۶۰
میانگین تعداد کار تولیدی به‌ازای هر گره	۱۰
میانگین پردازش مورد نیاز بار کاری (گیگاهرتز)	۱.۵ - ۲.۵
میانگین سایز بار کاری تولیدی (کیلوبیت)	۴۵۰
تعداد گره‌های مه	۵
توان پردازشی گره‌های مه (گیگاهرتز)	۲۹ - ۴۲
تعداد هسته پردازشی گره‌های مه	۲
پهنای باند دیتاستر مه (گیگابیت بر ثانیه)	۱
تعداد گره‌های ابر	۴۸



شکل ۲: شبکه در نظر گرفته‌شده در دیتاستر مه.

دستگاه اینترنت اشیا ارسال می‌گردد.

۵- محیط شبیه‌سازی و شاخص‌های ارزیابی

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی و ارزیابی برنامه‌های محاسبات مه با توجه به اینکه مدل پیشنهادی شامل یک مجموعه کامل از دستگاه‌های اینترنت، گره‌های مه، شبکه گسترده نرم‌افزارمحور و گره‌های ابر است، از شبیه‌ساز IoTsim-Osmosis استفاده شده است [۲۰]. این شبیه‌سازی بر روی سیستمی با پردازنده هشت‌هسته‌ای با فرکانس ۲/۶ GHz و حافظه RAM ۱۶ GB اجرا شده است. شکل ۲ گراف شبکه دیتاستر مه برای طرح پیشنهادی در محیط IoTsim-Osmosis را نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی عملکرد، مدل پیشنهادی بر اساس معیارهای زیر با مقاله پایه مقایسه شده است. همچنین برای بررسی بهتر الگوریتم پیشنهادی به‌عنوان یک الگوریتم جدید و در حالت بعدی از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم قدیمی استفاده شده است.

- میانگین زمان اجرا: میانگین زمان اجرای وظایف عبارت است از شاخصی برای سنجش بهینه‌بودن میزان زمان پردازش وظایف مدل پیشنهادی در لایه مه. برای به دست آوردن این معیار، تمامی تأخیرهای شبکه‌ای و پردازشی برای یک وظیفه و سپس میانگین زمان اجرای برای تمامی وظایف محاسبه می‌شود. واحد این شاخص ثانیه است.
- مصرف انرژی: شاخصی برای بهینه‌بودن میزان مصرف انرژی است و در ارزیابی میزان مصرف انرژی گره‌های مه، سوئیچ‌های دیتاستر مه، گره‌های ابر، سوئیچ‌های دیتاستر ابر و سوئیچ شبکه گسترده نرم‌افزارمحور ارزیابی شده است.

۶- تجزیه و تحلیل

به‌منظور بررسی مدل پیشنهادی و به دست آوردن نتایج، سناریوهای مختلفی را برای شبکه می‌توان در نظر گرفت. در این مقاله بر اساس پارامترهای شبیه‌سازی جدول ۲ از یک سناریو استفاده شده است. در این سناریو پارامترهای متغیر ۵ بار تغییر داده شده و با توجه به اینکه در مدل پیشنهادی از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است، به‌ازای هر تغییر ۱۰ بار خروجی گرفته شده و میانگین آن در ارزیابی‌ها استفاده شده است. در این سناریو بر اساس افزایش تعداد گره‌های اینترنت اشیا، مقیاس‌پذیری شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۵) در صورتی که تصمیم گرفته شود کار در گره مه پردازش شود برای انتخاب بهترین گره مه، مدل پیشنهادی را با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری بررسی و گره مه مناسب را برای پردازش کار انتخاب می‌کنیم. مدل پیشنهادی همانند الگوریتم ازدحام سوسک‌های بال آتشین دارای پنج مرحله است. بارهای کاری به‌عنوان سوسک‌های مه به‌عنوان سوسک‌های ماده در نظر گرفته شده و به‌ازای هر بار کاری یک کلونی تصادفی با تعداد مشخص از گره‌های مه ایجاد می‌شود. در هر کلونی با استفاده از تابع برازش بهترین گره مه جستجو می‌شود. تابع برازش بر اساس (۲۱) محاسبه شده که در این رابطه با استفاده از ضرایب γ_{que} ، γ_{exe} ، γ_{link} و γ_{uti} به ترتیب نسبت اهمیت میزان تأخیر صف، میزان تأخیر پردازش، میزان تأخیر لینک و میزان بهره‌وری گره مه مشخص شده است. پس از اجرای الگوریتم در مدل پیشنهادی، مناسب‌ترین گره مه برای اجرای کار مشخص می‌شود و کار به آن گره تخصیص داده می‌شود

$$U_i^{fog} = \gamma_{que} \frac{\delta_j^{que}}{\delta_j^{que-max}} + \gamma_{exe} \frac{\delta_i^{fog}}{\delta_i^{fog-max}} + \gamma_{link} \frac{\delta_{bfj}^{tx}}{\delta_{bfj}^{tx-max}} + \gamma_{uti} \frac{uti_j^{fog}}{uti_j^{fog-max}} \quad (21)$$

۶) در صورتی که مه نتواند کار را پردازش کند، کار به کارگزار ابر ارسال می‌شود و کارگزار ابر بر اساس الگوریتم نوبت گردشی^۱ (RR) تصمیم می‌گیرد تا کار را به کدام گره ابر تخصیص دهد.

۷) به طور کلی با توجه به اینکه در بخش‌های مختلف این سیستم اعم از مه، شبکه گسترده نرم‌افزارمحور و ابر قابلیت SDN فعال شده است، کنترلر SDN در دیتاستر مه با استفاده از (۲۲) مناسب‌ترین لینک برای انتقال اطلاعات را مشخص می‌کند. برای سایر بخش‌ها نیز (۲۲) تعمیم داده شده است. همچنین در این رابطه با استفاده از ضرایب φ_{bw} ، φ_{δ} و φ_R به ترتیب نسبت اهمیت میزان تأخیر لینک، میزان بهره‌وری لینک و میزان بهره‌وری جدول قوانین SDN مشخص شده است

$$U_i^{link} = \varphi_{\delta} \frac{\delta_{ij}}{\delta_{ij}^{max}} + \varphi_{bw} \frac{bw_{ij}^{util}}{bw_{ij}^{max}} + \varphi_R \frac{R_j^{util}}{R_j} \quad (22)$$

۸) در هر مرحله در صورتی که بار کاری انجام شده باشد، پاسخ برای

درصد کاهش پیدا کرده است؛ اما پس از رسیدن به ۲۰۰ دستگاه اینترنت اشیا میزان اختلاف تأخیر با روش مقاله پایه به صورت افزایشی شده است. این اتفاق به این دلیل رخ داده که در مدل پیشنهادی در صورتی که میزان تأخیر صف در دیتاستر مه بیشتر از میزان تأخیر انتقال به گره ابر باشد، بار کاری از دیتاستر مه به دیتاستر ابر ارسال می‌شود که این موضوع در مقاله پایه مورد بررسی قرار نگرفته است.

دیگر آزمایش انجام گرفته برای مقایسه عملکرد طرح‌ها در شاخص انرژی می‌باشد. همان طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، هر یک از طرح‌ها انرژی مصرفی تمامی بخش‌های سیستم را تحت تأثیر خود قرار داده‌اند؛ به گونه‌ای که در مدل پیشنهادی، انرژی مصرفی بخش‌های مختلف مانند انرژی مصرفی توسط گره‌های مه، سوئیچ‌های مه، گره‌های ابر، سوئیچ‌های ابر و همچنین سوئیچ‌های شبکه به طور میانگین حدوداً ۱۹ درصد کاهش پیدا کرده است.

تجزیه و تحلیل نتایج و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری، تأثیر بهتری بر عملکرد سیستم داشته‌اند. این نوع الگوریتم‌ها برخلاف اینکه با توجه به نتایج مورد ارزیابی زمان و انرژی بیشتری در زمان تصمیم‌گیری نسبت به الگوریتم حریصانه مصرف می‌کنند، اما در خروجی با توجه به اینکه زمان همگرایی در این الگوریتم‌ها کمتر از روش حریصانه است باعث می‌شود در تکرارهای یکسان الگوریتم پیشنهادی جواب‌های بهتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر مانند الگوریتم حریصانه به دست آورد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در الگوریتم‌های مختلف در سناریوی ۱ در جدول ۳ آورده شده است.

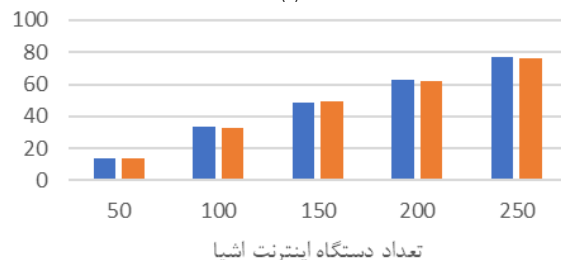
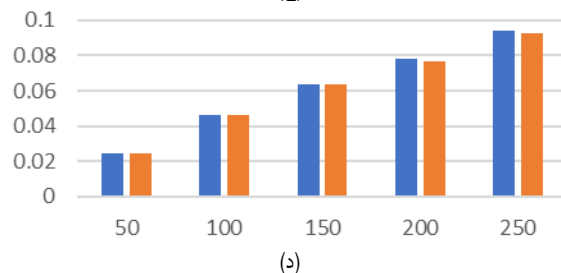
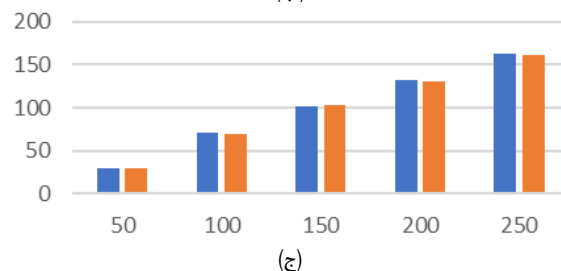
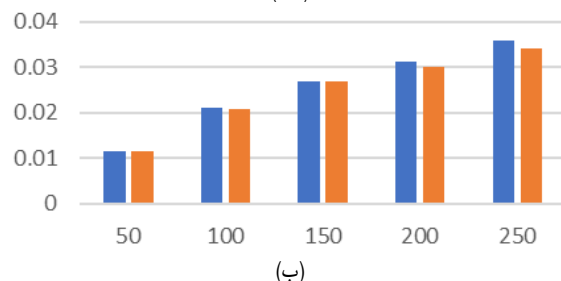
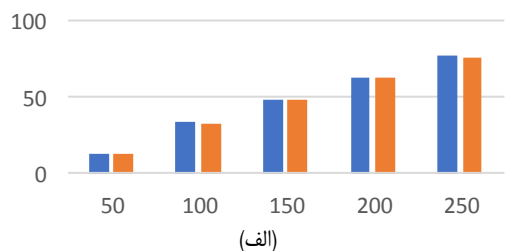
۷- نتیجه‌گیری و پژوهش‌های آتی

با توجه به تجربه‌ای که در پیاده‌سازی این مقاله به دست آمد، می‌توان در آینده در حوزه‌های زیر کار کرد:

- بررسی معیارهای متعدد دیگر مانند اولویت کارهای وارد شده به سیستم، مدت زمان انجام کار و تعادل بار کاری سیستم با اجرای سناریوهای بیشتر
- استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در دیتاستر ابر
- بررسی کارهای وابسته به هم
- اولویت‌بندی کارها از نظر حساس به تأخیر
- بررسی حرکت دستگاه‌های اینترنت اشیا و نحوه انتخاب بهترین دیتاستر مه

مراجع

- [1] Z. Jalali Khalil Abadi, N. Mansouri, and M. Khalouie, "Task scheduling in fog environment-challenges, tools & methodologies: a review," *Computer Science Review*, vol. 48, Article ID: 100550, May 2023.
- [2] R. K. Naha, et al., "Fog computing: survey of trends, architectures, requirements, and research directions," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 47980-48009, 2018.
- [3] H. Alhussian, N. Zakaria, and A. Patel, "An unfair semi-greedy real-time multiprocessor scheduling algorithm," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 50, pp. 143-165, Feb. 2016.
- [4] R. Thakur, G. Sikka, U. Bansal, J. Giri, and S. Mallik, "Deadline-aware and energy efficient IoT task scheduling using fuzzy logic in fog computing," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 2024, 2024.
- [5] M. S. U. Islam, A. Kumar, and Y. C. Hu, "Context-aware scheduling in fog computing: a survey, taxonomy, challenges and future directions," *J. of Network and Computer Applications*, vol. 180, Article ID: 103008, Apr. 2021.



■ Genetic ■ Firebug Swarm

(ه)

شکل ۳: نمودار انرژی مصرفی در سناریوی ۱، (الف) بر اساس گره‌های مه، (ب) بر اساس سوئیچ‌های مه، (ج) بر اساس گره‌های ابر، (د) بر اساس سوئیچ‌های ابر و (ه) بر اساس سوئیچ‌های شبکه گسترده نرم‌افزارمحور.

در این سناریو تعداد دستگاه‌های اینترنت اشیا از ۵۰ عدد در ۵ مرحله به ۲۵۰ عدد دستگاه رسیده است. با افزایش تعداد دستگاه‌ها حجم کار تولیدی در لحظه افزایش پیدا می‌کند و رفته‌رفته تأخیر و انرژی افزایش پیدا می‌کند. ارزیابی‌های حاصل از شبیه‌سازی این سناریو بر اساس معیارهای انرژی و تأخیر در ادامه این بخش و با بهره‌گیری از نمودار تفسیر شده است.

در اولین بررسی، عملکرد طرح‌ها در شاخص زمان اجرا مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۳ مشاهده شده که ابتدا میزان اختلاف تأخیر با مقاله پایه در حدود ۴۰ درصد است؛ اما با افزایش تعداد دستگاه‌های اینترنت اشیا میزان اختلاف تأخیر با روش مقاله پایه به ۶

جدول ۳: نتایج حاصل از شبیه‌سازی در الگوریتم‌های مختلف در سناریوی ۱.

تعداد دستگاه		میزان انرژی مصرف‌شده بر اساس گره‌های مه برحسب کیلوژول				زمان اجرای کارهای تولیدشده			
		Genetic		Firebug Swarm		Genetic		Firebug Swarm	
		کمترین	میانگین	کمترین	میانگین	کمترین	میانگین	کمترین	میانگین
۵۰		۰/۲۶	۰/۵۸	۰/۲۲	۰/۵۳	۱۲/۲۳	۱۳/۵۹	۱۲/۲۷	۱۳/۶۳
۱۰۰		۲/۱۹	۴/۴۱	۲/۱۶	۴/۳۶	۲۹/۹۵	۳۳/۶۵	۲۹/۰۱	۳۲/۹۷
۱۵۰		۴/۳۲	۸/۶۴	۴/۳۰	۸/۶۲	۴۲/۶۰	۴۸/۴۱	۴۴/۱۷	۴۹/۰۸
۲۰۰		۶/۱۰	۱۲/۴۷	۶/۱۱	۱۲/۴۷	۵۶/۱۶	۶۲/۴۰	۵۴/۱۷	۶۲/۲۶
۲۵۰		۸/۴۳	۱۶/۸۸	۸/۳۹	۱۶/۸۷	۷۰/۳۱	۷۷/۲۷	۶۵/۰۷	۷۶/۵۵
تعداد دستگاه		میزان انرژی مصرف‌شده بر اساس سوییچ‌های مه برحسب کیلوژول				میزان انرژی مصرف‌شده بر اساس گره‌های ابر برحسب کیلوژول			
		Genetic		Firebug Swarm		Genetic		Firebug Swarm	
		کمترین	میانگین	کمترین	میانگین	کمترین	میانگین	کمترین	میانگین
۵۰		۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۲۵/۸۳	۲۸/۷۰	۲۵/۹۲	۲۸/۸۰
۱۰۰		۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۶۲/۴۵	۷۰/۹۷	۶۱/۱۹	۶۹/۵۴
۱۵۰		۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۹۱/۸۷	۱۰۲/۰۸	۹۳/۱۴	۱۰۳/۴۹
۲۰۰		۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۱۱۴/۴۵	۱۳۱/۵۶	۱۱۴/۱۹	۱۳۱/۲۶
۲۵۰		۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۱۳۸/۴۵	۱۶۲/۸۸	۱۳۷/۱۶	۱۶۱/۳۷
تعداد دستگاه		میزان انرژی مصرف‌شده بر اساس سوییچ‌های ابر برحسب کیلوژول				میزان انرژی مصرف‌شده بر اساس شبکه گسترده نرم‌افزارمحور برحسب کیلوژول			
		Genetic		Firebug Swarm		Genetic		Firebug Swarm	
		کمترین	میانگین	کمترین	میانگین	کمترین	میانگین	کمترین	میانگین
۵۰		۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۱۲/۲۷	۱۳/۶۳	۱۲/۲۳	۱۳/۵۹
۱۰۰		۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۲۹/۰۱	۳۲/۹۷	۲۹/۶۱	۳۳/۶۵۵
۱۵۰		۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۶	۴۴/۱۷	۴۹/۰۸	۴۳/۵۷	۴۸/۴۱
۲۰۰		۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۷	۵۴/۱۷	۶۲/۲۶	۵۴/۲۹	۶۲/۴۰
۲۵۰		۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۹	۶۵/۰۷	۷۶/۵۵	۶۵/۶۸	۷۷/۲۷

- [14] F. M. Talaat, H. A. Ali, M. S. Saraya, and A. I. Saleh, "Effective scheduling algorithm for load balancing in fog environment using CNN and MPSO," *Knowledge and Information Systems*, vol. 64, pp. 773-797, 2022.
- [15] A. Najafizadeh, A. Salajegheh, A. M. Rahmani, and A. Sahafi, "Multi-objective task scheduling in cloud-fog computing using goal programming approach," *Cluster Computing*, vol. 25, no. 1, pp. 141-165, Feb. 2022.
- [16] L. Mas Manchón, J. Vilaplana, J. Mateo, and F. Solsona, "A queuing theory model for fog computing," *The J. of Supercomputing*, vol. 78, no. 8, pp. 11138-11155, Feb. 2022.
- [17] I. Z. Yakubu, L. Muhammed, Z. A. Musa, Z. I. Matinja, and I. M. Adamu, "A multi agent based dynamic resource allocation in fog-cloud computing environment," *Trends in Sciences*, vol. 18, no. 22, Article ID: 413, 15 Nov. 2021.
- [18] S. Misra and N. Saha, "Detour: dynamic task offloading in software-defined fog for IoT applications," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 5, pp. 1159-1166, May 2019.
- [19] M. Abbasi, E. Mohammadi Pasand, and M. R. Khosravi, "Workload allocation in IoT-fog-cloud architecture using a multi-objective genetic algorithm," *J. of Grid Computing*, vol. 18, no. 1, pp. 43-56, Jan. 2020.
- [20] K. Alwasel, et al., "IoTsim-Osmosis: a framework for modeling and simulating IoT applications over an edge-cloud continuum," *J. of Systems Architecture*, vol. 116, Article ID: 101956, Jun. 2021.
- [6] A. Raglin, S. Metu, S. Russell, and P. Budulas, "Implementing internet of things in a military command and control environment," in *Proc. of SPIE, the Int. Society for Optical Engineering*, Article ID: 1020708, Anaheim, CA, USA, 9-13 Apr 2017.
- [7] Maniah, B. Soewito, F. Lumban Gaol, and E. Abdurachman, "A systematic literature review: risk analysis in cloud migration," *J. of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 6, pt. B, pp. 3111-3120, Jun. 2021.
- [8] P. Schulz, et al., "Latency critical IoT applications in 5G: perspective on the design of radio interface and network architecture," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 70-78, Feb. 2017.
- [9] P. Mach and Z. Becvar, "Mobile edge computing: a survey on architecture and computation offloading," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1628-1656, Thirdquarter 2017.
- [10] K. Dolui and S. K. Datta, "Comparison of edge computing implementations: fog computing, cloudlet and mobile edge computing," *Global Internet of Things Summit*, 6 pp., Geneva, Switzerland, 6-9 Jun. 2017.
- [11] C. M. Huang, et al., "V2V data offloading for cellular network based on the software defined network (SDN) inside mobile edge computing (MEC) architecture," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 17741-17755, 2018.
- [12] D. Dey, S. Chandra, and N. Ghosh, "HessianAuth: an ECC-based distributed and efficient authentication mechanism for 6LoWPAN networked IoT devices," in *Proc. of the 24th Int. Conf. on Distributed Computing and Networking*, pp. 227-236, Kharagpur, India, 4-7 Jan. 2023.
- [13] K. Sood, S. Yu, and Y. Xiang, "Software-defined wireless networking opportunities and challenges for internet-of-things: a review," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 3, no. 4, pp. 453-463, Aug. 2016.

رضا خالقی‌فر تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر از دانشگاه بوعلی سینا همدان اخذ نموده است. در حال حاضر وی در مقطع دکتری مهندسی کامپیوتر- امنیت شبکه در دانشگاه شاهد مشغول به تحصیل می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: شبکه‌های کامپیوتری، محاسبات ابری، محاسبات مالدود و امنیت شبکه‌های کامپیوتری.

سکینه سهرابی مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر و کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات خود را از دانشگاه شهید رجایی دریافت نمود. در حال حاضر وی در مقطع دکتری مهندسی کامپیوتر در دانشگاه بوعلی سینا همدان مشغول به تحصیل می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: شبکه‌های کامپیوتری، زمانبندی کارها در محیط ابری، محاسبات مه‌آلود و تامین کیفیت خدمات در شبکه‌های کامپیوتری.

رضا محمدی در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه زنجان و در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات - شبکه‌های کامپیوتری خود را از دانشگاه صنعتی شیراز دریافت نمود. همچنین ایشان در سال ۱۳۹۶ مدرک دکتری خود را در گرایش شبکه‌های کامپیوتری از دانشگاه صنعتی شیراز اخذ نموده است. در حال حاضر ایشان عضو هیأت علمی گروه مهندسی کامپیوتر دانشگاه بوعلی سینا همدان می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شبکه‌های کامپیوتری، مهندسی ترافیک، محاسبات ابری، امنیت شبکه و اینترنت اشیا است.

محمد نصیری در سال مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه صنعتی شیراز دریافت نمود. ایشان مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه گرنوبل فرانسه اخذ نموده است. در حال حاضر ایشان عضو هیأت علمی گروه مهندسی کامپیوتر دانشگاه بوعلی سینا همدان می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شبکه‌های کامپیوتری، خطایابی نرم‌افزار، بهینه سازی پروتکل‌های شبکه و شبکه‌های IEEE 802.15.4 است.