

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

نوع مقاله: پژوهشی

مدیریت منابع ناهمگن برای بار کاری لبه موبایل بی‌درنگ با رویکرد نظریه بازی مبتنی بر تحرک برای مدیریت کارآمد انرژی

ابوالفضل یونسی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
پست الکترونیکی: abolfazl.yunesi@sharif.edu

محسن انصاری*

استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
پست الکترونیکی: ansari@sharif.edu

سپیده صفری

استادیار، پژوهشکده دانش‌های بنیادی، پژوهشکده علوم کامپیوتر، تهران، ایران
پست الکترونیکی: sepideh.safari@ipm.ir

چکیده

شکاف زمانی، گره‌ها با همسایگان از طریق چانه‌زنی محلی بر اساس پیشنهادهای پاسخ‌های موقت، مذاکره می‌کنند. این هماهنگی توزیع‌شده واقع‌بینانه بدون ساماندهی متمرکز را تقلید می‌کند. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، الگوریتم را در شدت‌های بارکاری و چگالی گره‌های مختلف ارزیابی می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد نسبت پذیرش وظیفه به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ۴٪ در مقایسه با مدل‌های لبه ایستا و ابر، با کاهش تأخیر حداقل ۶٪ و صرفه‌جویی در انرژی حداقل ۲۲٪ ایجاد کرده است.

واژه‌های کلیدی: نظریه بازی، مدیریت منابع، مدیریت انرژی، تحرک، تأخیر، دسترسی‌پذیری.

۱. مقدمه

رشد سریع دستگاه‌ها و فناوری‌های اینترنت اشیا^۱ نسل جدیدی از برنامه‌های حساس به تأخیر^۲ مانند واقعیت

در سال‌های اخیر، محاسبات لبه موبایل^۱ به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای پشتیبانی از برنامه‌های کاربردی مهم در راستای بهبود تأخیر، بهبود کیفیت خدمات و تضمین در دسترس بودن منابع در شبکه‌های نسل بعدی ظهور کرده است. با این حال، تغییرات هم‌بندی لبه پویا ناشی از تحرک گره، چالش‌های مدیریت منابع قابل‌توجهی را ایجاد می‌کند. رویکردهای موجود معمولاً به کنترل متمرکز یا زیرساخت‌های ایستا متکی هستند. این مقاله یک الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی و حرکت لوی^۲ را برای تخصیص آگاه از دسترس‌پذیری و توزیع‌شده منابع در سامانه‌های لبه موبایل پیشنهاد می‌کند که از برنامه‌های اینترنت اشیا بی‌درنگ پشتیبانی می‌کنند. الگوریتم پیشنهادی که از حرکت لوی الگو می‌گیرد، حرکات گره لبه را مدل می‌کند. در هر

* نویسنده مسئول

1-Mobile Edge Computing
2-Lévy walk3-Internet of Things
4-Latency-Sensitive

افزوده، وسایل نقلیه خودمختار، مراقبت‌های بهداشتی هوشمند و اتوماسیون صنعتی را قادر ساخته است [۱].

در حوزه محاسبات لبه موبایل، در دسترس بودن منابع به عنوان یک عامل محوری است که مستقیماً بر عملکرد، قابلیت اطمینان و مقیاس‌پذیری برنامه‌های کاربردی مستقر در لبه تأثیر می‌گذارد [۱۵]. در محیط‌های لبه موبایل، منابعی مانند ظرفیت محاسباتی، حافظه، ذخیره‌سازی و پهنای باند شبکه در سراسر شبکه‌ای از گره‌های لبه پراکنده می‌شوند. با این حال، گره‌ها غالباً با محدودیت‌های منابع دست و پنجه نرم می‌کنند [۱۶][۱۵]. تضمین در دسترس بودن این منابع برای برآورد نیازهای برنامه‌های کاربردی لبه بسیار مهم است [۱۶].

با این حال، پشتیبانی مؤثر از این برنامه‌های کاربردی بی‌درنگ، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد زیرساخت‌های محاسباتی لبه موبایل، چالش‌های عمده‌ای در مدیریت منابع ایجاد می‌کند. گره‌های لبه به دلیل تحرک کاربر، محدودیت‌های شدید منابع و قابلیت دسترس‌پذیری کمتری دارند [۲]. در نتیجه، طراحی الگوریتم‌های تخصیص منابع کارآمد حیاتی است. این الگوریتم‌ها باید قابلیت‌های محاسباتی و ذخیره‌سازی محدود گره‌های لبه را در نظر بگیرند و در عین حال از اتصالات با تأخیر کم و قابلیت اطمینان^۶ بالا اطمینان حاصل کنند. علاوه بر این، آن‌ها همچنین باید ماهیت پویای زیرساخت‌های محاسباتی لبه را در نظر بگیرند و با تغییرات در تحرک کاربر و در دسترس بودن گره‌های لبه سازگار شوند [۳].

روش‌های تخصیص منابع متمرکز سنتی به‌خوبی به محیط لبه توزیع‌شده در مقیاس بزرگ نمایان نمی‌شوند و نمی‌توانند با تغییرات هم‌بندی پویا سازگار شوند [۱]. [۲]. درحالی‌که رویکردهای توزیع‌شده مقیاس‌پذیری و سازگاری را بهبود می‌بخشند، امکان همکاری کارآمد بین گره‌های لبه‌ای که به نفع شخصی هستند، بی‌اهمیت است [۴].

بدون انگیزه‌های مناسب، اشتراک توزیع‌شده منابع خطراتی را به همراه دارد که منجر به تخصیص حریصانه و ناعادلانه می‌شود که در بهینه‌سازی شکست می‌خورد. برای مقابله با این چالش‌ها، محققان ساختارهای انگیزشی مختلفی را در محیط لبه توزیع‌شده پیشنهاد کرده‌اند که در بخش ۲ مروری بر آن‌ها خواهیم داشت. یکی از این سازوکارها استفاده از نظریه بازی است که در آن گره‌های لبه به عنوان بازیکنان منطقی باهدف به حداکثر رساندن مطلوبیت خود در نظر گرفته می‌شوند [۵].

با طراحی توابع سودمند مناسب و سازوکارهای پاداش، می‌توان همکاری را تشویق کرد و از رفتار خودخواهانه در میان گره‌های لبه جلوگیری کرد که منجر به تخصیص منابع منصفانه‌تر و بهبود کارایی سیستم می‌شود. این ساختارهای انگیزشی راه را برای مدیریت مؤثر منابع در محیط لبه توزیع‌شده هموار می‌کند و ضمن در نظر گرفتن منافع شخصی گره‌ها، استفاده بهینه از منابع را تضمین می‌کنند [۵].

نظریه بازی چارچوبی ریاضی برای مدل‌سازی تعاملات راهبردی^۷ بین تصمیم‌گیرندگان منطقی و هدایت آن‌ها به‌سوی نتایج اجتماعی بهینه از طریق رفتارهای خودخواهانه ارائه می‌کند. راه‌حل‌های نظریه بازی موجود برای مدیریت منابع لبه به‌طور کامل از الگوهای تحرک گره‌های لبه استفاده نمی‌کنند که در دسترس بودن منابع در طول زمان به روش‌های غیرقابل‌پیش‌بینی تأثیر می‌گذارد. نادیده گرفتن ویژگی‌های تحرک گره می‌تواند منجر به تصمیمات تخصیص نامناسب و ناپایدار شود [۴]. [۵][۶]. با ترکیب ویژگی‌های تحرک گره در مدل‌های نظریه بازی، می‌توان به نمایش دقیق‌تری از در دسترس بودن منابع دست‌یافت. این امر به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا تصمیمات تخصیص آگاهانه‌تری را در حالت بی‌درنگ اتخاذ کنند که منجر به ثبات بهتر و نتایج بهینه می‌شود. علاوه بر این، درک تأثیر تحرک گره بر تخصیص منابع همچنین می‌تواند توسعه راهبردهای پویا را که با شرایط

5-Mobility
6-Reliability

7-Strategic

۲. کارهای پیشین

نویسندگان در [۸] یک الگوریتم بارسپاری^۸ وظیفه را برای به حداقل رساندن هزینه انرژی با بهینه‌سازی مشترک نرخ بارسپاری وظیفه، توان انتقال و دستگاه‌های تلفن همراه برای بارگیری محاسباتی چند کاربره پیشنهاد می‌کنند. نویسندگان در [۹] روشی را برای بارگذاری امن برنامه‌ها به صورت بی‌درنگ پیشنهاد کرد که در دسترس بودن و نزدیکی منابع را در نظر می‌گیرند. آن‌ها همچنین هزینه‌های اجرا و تأخیر بارگذاری برنامه‌ها در سرورهای لبه را در نظر می‌گیرند. تحقیقات آن‌ها پتانسیل استفاده از سامانه‌های محاسباتی مه برای بارسپاری و گسترش ذخیره‌سازی را بررسی می‌کند. با این حال، راه حل آن‌ها یک اشکال دارد: نمی‌تواند در دسترس بودن منابع را همیشه تضمین کند، به خصوص در مواردی که سرور مه بارگذاری بیش از حد است. در نتیجه، عملکرد سیستم ممکن است به تدریج کاهش یابد.

پانجانانسان و همکاران [۱۰] یک الگوریتم زمان‌بندی پیشنهاد کردند که از صف کم تأخیر^۹ برای بهبود کیفیت خدمات^{۱۰} برای برنامه‌های صوتی و تصویری، با کاهش تأخیر و افزایش توان استفاده می‌کند. علاوه بر این، ژانگ و همکاران، [۱۱] یک الگوریتم زمان‌بندی منابع برای رسیدگی به درخواست‌های بارگیری چندگانه موبایل به طور هم‌زمان پیشنهاد کردند. این الگوریتم با به حداقل رساندن توان عملیاتی و به حداقل رساندن زمان پردازش برنامه‌های تلفن همراه، منابع را به طور مؤثر به چندین کاربر تلفن همراه اختصاص می‌دهد.

در این مقاله چندین مزیت نسبت به کارهای پیشین وجود دارد: اولاً، مدل‌سازی ریاضی پیچیده‌تری از حرکت لوی ارائه می‌دهیم که می‌تواند برای مدل کردن جریان ترافیک و ارتباطات در شبکه‌های بزرگ کاربردی باشد. دوم، مؤلفه‌های تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی مانند تأخیر، میزان تقاضا و منابع مورد نیاز را شامل می‌شود در حالی که

متغیر سازگار می‌شوند، امکان‌پذیر سازد و کارایی و اثربخشی سامانه‌های مدیریت منابع لبه را بهبود بخشد.

در این مقاله، یک چارچوب مدیریت منابع توزیع‌شده مبتنی بر نظریه بازی جدید برای برنامه‌های کاربردی حساس به تأخیر در سامانه‌های محاسباتی لبه چند دسترسی تلفن همراه پیشنهاد شده است. چندین مشارکت کلیدی انجام شده در این مقاله در ادامه لیست شده‌اند.

- ارائه یک مدل بازی غیرهمکارانه برای مدل‌سازی چانه‌زنی توزیع‌شده بین گره‌های لبه موبایل با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و اهداف آن‌ها.

- به کارگیری مدل‌های پیشرفته پیمایش تصادفی مانند مدل حرکت لوی برای شبیه‌سازی واقع‌بینانه تحرک گره‌های لبه و تأثیر آن بر در دسترس بودن منابع.

- طراحی الگوریتمی نوین مبتنی بر چانه‌زنی و پیمایش تصادفی برای تخصیص بهینه و توزیع‌شده منابع بین گره‌های لبه متحرک.

- توسعه یک چارچوب یکپارچه مدیریت منابع توزیع‌شده مبتنی بر نظریه بازی که الگوهای تحرک را در نظر می‌گیرد.

ارائه راه‌حلی برای مسائل بحرانی مدیریت منابع در محیط‌های لبه موبایل مانند تضمین کیفیت سرویس و مقیاس‌پذیری.

در ادامه مقاله، فصل ۲ به بررسی کارهای پیشین مرتبط در زمینه موضوع مورد بحث اختصاص خواهد داشت. در فصل ۳، سیستم مدل مورد استفاده برای پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی به طور کامل تشریح خواهد شد. فصل ۴ به ارائه روش پیشنهادی و جزئیات آن اختصاص دارد. در این فصل، گام‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی، ایده‌های اصلی، فرمول‌بندی‌های ریاضی و نحوه پیاده‌سازی به طور کامل توضیح داده خواهد شد. در فصل ۵، نتایج حاصل از اجرای روش پیشنهادی در شرایط و سناریوهای مختلف، به طور جامع تحلیل و بررسی می‌شود. در نهایت، فصل ۶ شامل نتیجه‌گیری کلی مقاله خواهد بود.

8-Offload
9-Least Latency Queue
10-Quality of Service

$T_{n,t}$ (نشان دهنده مدل تولید وظایف برای دستگاه n است که مشخص می‌کند در هر بازه زمانی چه تعداد وظیفه‌ای تولید و به گره‌ها ارسال خواهد شد) تولید شده در هر شکاف t نمونه برداری می‌شود. ورود این وظایف حجم کاری را تشکیل می‌دهد که باید تحت مهلت‌های تأخیر پردازش شود تا سودمندی تعیین شود. این بهینه‌سازی منابع پویا توسط الگوریتم نظری بازی انجام می‌شود.

گره‌های لبه: مجموعه‌ای از گره‌های لبه متحرک در سراسر منطقه تحت پوشش شبکه مستقر شده‌اند تا خدمات رایانش ابری را ارائه دهند. برخی گره‌های لبه مانند m دارای منابع پردازشی (مانند CPU) و ارتباطی (مانند پهنای باند) محدود هستند که باید بین وظایف مختلف تقسیم شوند. میزان منابع محاسباتی و ارتباطی هر گره m محدود به f_m و b_m است. گره‌ها می‌توانند وظایف را به صورت محلی پردازش کنند یا به دیگر گره‌ها/ابر بارگذاری کنند. **کارسان لبه:** یک کارسان متمرکز سیستم کلی را با وضعیت منابع جهانی هماهنگ می‌کند اما منابع را مستقیماً تخصیص نمی‌دهد.

۱-۳- مدل سازی تحرک با استفاده از حرکت لوی

رفتار تحرک گره‌های لبه متحرک را با استفاده از حرکت لوی در زمان گسسته مدل می‌شود. یک فضای دوبعدی را در نظر بگیرید که گره‌ها در آن حرکت می‌کنند. اجازه دهید $(x_{m,t}, y_{m,t})$ مختصات گره m را در زمان t نشان دهیم. تکامل مکان‌های گره در شکاف‌های زمانی متوالی $t = 1, 2, \dots$ توسط فرآیند تحرک حرکت لوی توصیف می‌شود. طول گام‌های $l_{m,t}$ که توسط گره m بین شکاف‌های زمانی متوالی گرفته می‌شود، متغیرهای تصادفی هستند که از توزیع لوی $L(\lambda)$ گرفته شده‌اند. توزیع لوی یک توزیع احتمال سنگین است که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$L(\lambda) = \frac{1}{(\lambda t^3)} \text{ for } t \geq 0 \quad (1)$$

در اینجا $\lambda > 0$ یک پارامتر مقیاس بندی است که تغییر طول گام را تعیین می‌کند. توزیع لوی طول پله‌های

بسیاری از مراجع ذکر شده فقط به بهینه‌سازی هزینه‌ها یا عملکرد می‌پردازند. سوم، اثرات متقابل بین اجزای مختلف سیستم را به طور ریاضی مدل می‌کند تا رفتار سیستم را در شرایط واقعی تری در کنار دسترسی پذیری منابع مدل کند.

۳. سیستم مدل

در این مقاله یک سامانه رایانش لبه موبایل متشکل از دستگاه‌های اینترنت اشیا، گره‌های لبه و یک کارسان لبه را در نظر می‌گیریم.

دستگاه‌های اینترنت اشیا: مجموعه‌ای از دستگاه‌های اینترنت اشیا، وظایف کاربردی حساس به تأخیر را تولید می‌کنند. هر دستگاه اینترنت اشیا یک مجموعه $n \in N$ دارای الزامات محاسباتی و شبکه‌ای است که توسط یک زوج (c_n, b_n) تعریف شده است که در آن c_n چرخه‌های CPU و b_n حجم داده مورد نیاز برای پردازش یک وظیفه است. هر وظیفه k نیاز به پردازش دارد:

$$c_{n,k} - \text{چرخه‌های CPU مورد نیاز به ازای هر وظیفه،}$$

برگرفته از توزیع نرمال:

$$c_{n,k} \sim N(\mu_c, \sigma_c)$$

$B_{n,k}$ - اندازه داده، برگرفته از توزیع log-normal:

$$B_{n,k} \sim \text{LogN}(\mu_b, \sigma_b)$$

این تنوع در شدت منابع در انواع مختلف برنامه را نشان می‌دهد. تعداد وظایف $T_{n,t}$ تولید شده توسط دستگاه n در هر شکاف زمانی t به عنوان یک متغیر تصادفی پواسون مدل سازی می‌شود:

$$T_{n,t} \sim \text{Poisson}(\phi_n)$$

ϕ_n در معادله بالا میانگین نرخ تولید برای دستگاه n است. این منعکس کننده انبوه کارهایی است که به طور مستقل با احتمال مشخص ϕ_n در هر واحد زمانی وارد می‌شوند. مقادیر ϕ_n بر اساس پروفایل طولانی مدت بارهای کاری از هر نوع دستگاه (به عنوان مثال حسگر دما و غیره) تخمین زده می‌شود. با توجه به ϕ_n ، تعداد خاصی از وظایف

گسسته $\{1, 2, \dots\}$ $t \in$ مدل سازی شده است [۷][۱۲].

بازیکنان: بازیکنان در بازی مجموعه $M = \{1, 2, \dots, M\}$ از گره های لبه موبایل هستند. هر گره به عنوان یک تصمیم گیرنده منطقی باهدف به حداکثر رساندن سود خود عمل می کند. در هر شکاف زمانی t ، گره $m \in M$ فقط اطلاعات محلی در مورد منابع خود $(F_{m,t}, B_{m,t})$ و وظایف در ناحیه تحت پوشش خود را دارد و وضعیت شبکه جهانی را نمی شناسد.

راهبردها: گره m در هر نوبت زمانی t می تواند تصمیمات مختلفی در مورد تخصیص منابع خود بگیرد که هر کدام شانس مختلفی برای انجام دارند. مجموعه همه این احتمالات تصمیم گیری برای تخصیص منابع، فضای راهبرد $S_{m,t}$ نام دارد که نشان دهنده گزینه های ممکن برای گره m در زمان t است. یک راهبرد $\sigma_{m,t} = \{x_{n,m,t}\}$ مشخص می کند که کدام وظایف از دستگاه های همسایه برای پردازش پذیرفته می شوند، که در آن $x_{n,m,t} \in \{0, 1\}$.

$\Sigma_{m,t} = \{\sigma_{m,t} | \sigma_{m,t} \text{ satisfies node } m\text{'s capacity constraints}\}$ انتخاب راهبرد توسط ظرفیت های منابع گره برای اطمینان از امکان پذیر بودن تخصیص محدود می شود. راهبردها نیز تحت تأثیر بازده مورد انتظار از تخصیص به دستگاه های مختلف قرار می گیرند.

بهره وری: تابع ابزار $U_{m,t}(\sigma_{m,t}, \sigma_{-m,t})$ گره بازدهی دریافتی m را با گرفتن راهبرد $\sigma_{m,t}$ با توجه به راهبردهای $\sigma_{-m,t}$ از گره های دیگر دریافت می کند. $U_{m,t}$ را به صورت رابطه ۴ تعریف می کنیم:

$$U_{m,t}(\sigma_{m,t}, \sigma_{-m,t}) = \alpha U_{m,task}(\sigma_{m,t}) + (1 - \alpha) U_{m,fairness}(\sigma_{m,t}, \sigma_{-m,t}) \quad (4)$$

در جایی که $U_{m,t}$ نشان دهنده بازده پردازش وظیفه بر اساس بارهای کاری پذیرفته شده است و $U_{m,fairness}$ عادلانه بودن تخصیص بین دستگاه ها را نشان می دهد. همچنین $\alpha \in [0, 1]$ اهداف را وزن می کند.

جدول زمانی: بازی در چند شکاف زمانی ادامه دارد $t = 1, 2, \dots$ هر شکاف شامل گره هایی است که راهبردها

توزیع شده تصادفی را با این ویژگی کلیدی تولید می کند که احتمال طول پله های بزرگ به تدریج کاهش می یابد (به عنوان یک قانون توان) نسبت به توزیع عادی. این منجر به پرش های متناوب طولانی تر با احتمال غیر صفر می شود. روش حرکت گره های لبه را به صورت تصادفی با الهام از مدل حرکت لوی طراحی کردیم تا هم ویژگی های تصادفی لازم برای مدل سازی حرکت غیرقابل پیش بینی گره ها را فراهم کند و هم ویژگی حافظه بلند مشاهده شده در داده های واقعی تحرک را حفظ نماید؛ بنابراین پارامتر λ را برابر ۱٫۵ تنظیم کردیم [۲۲]. طول گام $l_{m,t}$ برای هر گره m به طور مستقل از توزیع لوی، $L(1.5)$ نمونه برداری می شود. جهت حرکت $\theta_{m,t}$ در هر زمان t به عنوان زاویه ای که به طور احتمالی از توزیع یکنواخت انتخاب شده است نشان داده می شود:

$$\theta_{m,t} \sim U(0, 2\pi)$$

این امر تصادفی بودن جهت گرفته شده در هر مرحله را با حفظ تغییرات طول گام سنگین^{۱۲} معرفی می کند. با توجه به طول گام $l_{m,t}$ و جهت $\theta_{m,t}$ ، می توانیم مکان جدید $(x_{m,t+1}, y_{m,t+1})$ گره m را بعد از زمان t با استفاده از رابطه های ۲ و ۳ محاسبه کنیم:

$$x_{m,t+1} = x_{m,t} + l_{m,t} \times \cos(\theta_{m,t}) \quad (2)$$

$$y_{m,t+1} = y_{m,t} + l_{m,t} \times \sin(\theta_{m,t}) \quad (3)$$

این عبارات به صورت بازگشتی مسیر تصادفی هر گره m را در طول زمان بر اساس فرآیند حرکت لوی ترسیم می کنند. مدل حرکت لوی یک مبنای واقعی و ریاضی دقیق برای شبیه سازی تحرک سیال گره های لبه در الگوریتم تخصیص منابع و فرمول بندی بازی فراهم می کند. این امکان ارزیابی عملکرد در شرایط طبیعی موبایل را فراهم می کند.

۳-۲- مدل بازی غیر همکارانه

تخصیص منابع توزیع شده بین گره های لبه متحرک به عنوان یک بازی غیر همکارانه $G = (M, \{\Sigma_{m,t}\}, \{U_{m,t}\})$ روی شکاف های زمانی $G = (M, \{\Sigma_{m,t}\}, \{U_{m,t}\})$

حاصل می‌کند که بار CPU از ظرفیت گره m ، $F_{m,t}$ تجاوز نمی‌کند.

• **ظرفیت پهنای باند گره:** $\sum_{n \in N} x_{n,m,t} B_{n,t} \leq B_{m,t}$ در محدوده پهنای باند گره: $B_{m,t} m$.

مهلت تأخیر: تأخیر $(n, t) \leq L_{n,t}$. تأخیر همه وظیفه‌ها با مهلت $L_{n,t}$ مطابقت دارد.

این فرمول مشکل بهینه‌سازی جهانی زمان‌بندی وظایف به گره‌ها را با رعایت محدودیت‌های سیستم مدل‌سازی می‌کند. الگوریتم مبتنی بر حرکت لوی (زیر بخش ۳-۱) یک رویکرد توزیع‌شده برای تقریب این راه‌حل ارائه می‌دهد.

۳-۴- دسترسی پذیری منابع

در حوزه محاسبات لبه موبایل، در دسترس بودن منابع به عنوان یک عامل محوری است که مستقیماً بر عملکرد، قابلیت اطمینان و مقیاس پذیری برنامه‌های کاربردی مستقر در لبه تأثیر می‌گذارد و از طریق رابطه ۶ می‌توان آن را محاسبه کرد [۱۷]. در محیط‌های لبه موبایل، منابعی مانند ظرفیت محاسباتی (C)، حافظه (M)، ذخیره‌سازی (S) و پهنای باند شبکه (B) در سراسر شبکه‌ای از گره‌های لبه پراکنده می‌شوند. با این حال، این گره‌ها اغلب با محدودیت‌های منابع در مقایسه با هم‌تایان خود در مراکز داده ابری سنتی دست و پنجه نرم می‌کنند. اطمینان از در دسترس بودن این منابع برای برآوردن نیازهای متنوع برنامه‌های کاربردی لبه، از پردازش با تأخیر کم تا تجزیه و تحلیل داده‌های با توان عملیاتی بسیار مهم است [۱۹].

[۲۰].

$$RA = \frac{\text{Avialable resources}}{\text{Total Resources}} \times 100\% \quad (6)$$

در دسترس بودن منابع به طور جدایی ناپذیری با تضمین کیفیت خدمات که توسط ارائه‌دهندگان لبه موبایل گسترش می‌یابد، مرتبط است [۱۹].

عوامل متعددی بر در دسترس بودن منابع در محیط‌های لبه موبایل تأثیر می‌گذارند که شامل محدودیت‌های سخت افزاری تا شرایط شبکه و پارامترهای محیطی است. درک

را به‌طور هم‌زمان بر اساس اطلاعات محلی برای توزیع وظایف انتخاب می‌کنند. راهبردها به‌صورت پویا با حجم وظیفه و تغییرات تحرک بین بازه‌ها سازگار می‌شوند.

تعادل: مجموعه راهبرد $\sigma^* = \{\sigma_1^*, \sigma_2^*, \dots\}$ یک تعادل نش را تشکیل می‌دهد، اگر هیچ یک از گره‌ها نتوانند با تغییر یک‌جانبه راهبرد خود، سود خویش را - با توجه به راهبردهای سایر گره‌ها - بهبود ببخشند. به این ترتیب، این مجموعه راهبردها تخصیص منابع را به‌صورت توزیع‌شده ثابت و پایدار می‌کند. به عبارت دیگر، در این وضعیت تعادلی هیچ گرهی منفعت بیشتری نخواهد یافت که موجب تغییر رفتار (راهبرد) خود شود.

۳-۳- مدل مدیریت منابع

مسئله تخصیص منابع توزیع‌شده را به عنوان یک بهینه‌سازی جهانی برای به حداکثر رساندن کل ابزار سیستم تحت محدودیت ظرفیت و تأخیر فرموله شده که با توجه به ویژگی‌های شبکه و ابزارهای مورد استفاده، پارامترهایی مانند تأخیر میانگین و ظرفیت پهنای باند قابل تخمین، به همراه سربرار وارده از طرف شبکه قابل محاسبه است [۱۳][۱۴]. هدف، به حداکثر رساندن ابزار جمع‌آوری‌شده $\sum_{n \in N} U_n$ از همه وظایفی است که در دستگاه‌های $n \in N$ انجام می‌شوند.

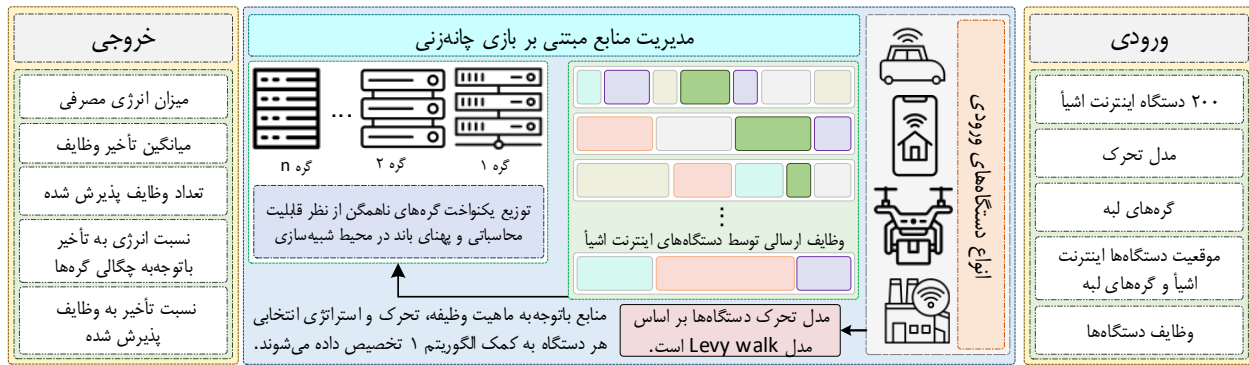
$$U_n = \alpha_n * T_n \quad (5)$$

جایی که T_n تعداد وظایفی است که توسط گره m انجام گرفته/پردازش شده است و α_n هم وزنی است که به گره m بر اساس منابع پردازشی که دارد اختصاص داده می‌شود. هدف این کار بهینه‌سازی توان عملیاتی و انصاف بین دستگاه‌ها است. متغیر تصمیم تخصیص عبارت است از:

$$x_{n,m,t} = \{0, 1\}$$

که نشان می‌دهد که آیا وظیفه n در زمان t به گره m اختصاص داده شده است یا خیر. محدودیت‌ها (از اطلاعات تاریخی (گذشته) ذخیره شده برای محاسبه محدودیت‌ها استفاده شده است):

• **ظرفیت CPU گره:** $\sum_{m \in M} x_{n,m,t} C_{n,t} \leq F_{m,t}$ اطمینان



شکل ۱. نشان دهنده کلیت روش پیشنهادی مبتنی بر سیستم مدل

بسته‌ها و تأخیر می‌تواند عملکرد برنامه‌های لبه را تضعیف کند و در نتیجه دسترسی و پاسخگویی را کاهش دهد [۱۸].

$$NC = \frac{B_{avail}}{Total\ Bandwidth} \times 100\% \quad (۸)$$

شرایط محیطی: عناصر محیطی مانند دما و نوسانات توان می‌توانند بر قابلیت اطمینان و در دسترس بودن زیرساخت لبه تأثیر بگذارند. آب و هوای نامساعد یا قطع برق این امکان را دارد که عملکرد گره‌های لبه را مختل کند و در نتیجه دسترسی به منابع را به خطر بیندازد.

متغیر بودن بار کاری: ماهیت پویای بارهای کاری لبه، که با تقاضاهای موج و نوسانات در استفاده از منابع مشخص می‌شود، به عنوان یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر در دسترس بودن منابع است. اوج ترافیک یا افزایش ناگهانی در شدت بار کاری ممکن است منابع موجود را تحت فشار قرار دهد و منجر به کمبود وقت و کاهش دسترسی شود. رابطه ۹ درصد اختلاف بین اوج تقاضا و متوسط تقاضا را نسبت به میانگین تقاضا محاسبه می‌کند. این کمیت یعنی تغییر در تقاضای منابع در طول زمان، نشان دهنده سطح غیر قابل پیش‌بینی در الگوهای حجم کار است.

$$WV = \frac{Peak\ demand - Avg.\ demand}{Avg.\ demand} \times 100\% \quad (۹)$$

۴. روش پیشنهادی

در این مقاله الگوریتم توزیع‌شده‌ای (الگوریتم ۱) که تعاملات مستقلى بین گره‌های لبه متحرک برای مذاکره

این عوامل به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی سیستم‌های لبه‌ای انعطاف‌پذیر و مستحکم که قادر به تطبیق با شرایط نوسانی و ضرورت‌های بار کاری هستند، عمل می‌کند.

محدودیت‌های سخت‌افزاری: دستگاه‌های لبه و کارسازها معمولاً با قابلیت‌های محاسباتی محدود (C_{max})، حافظه محدود (M_{max}) و ذخیره‌سازی (S_{max}) در مقایسه با مراکز داده معمولی دست و پنجه نرم می‌کنند. این محدودیت‌ها مقدار منابعی را که می‌توان به برنامه‌های لبه تخصیص داد، محدود می‌کند و در نتیجه بر در دسترس بودن منابع تأثیر می‌گذارد [۲۰]. رابطه ۷ نسبت حداکثر منابع سخت‌افزاری موجود (مانند ظرفیت محاسباتی، حافظه و ذخیره‌سازی) را در مقایسه با کل منابع محاسبه می‌کند و رویکردهایی را در مورد محدودیت‌های تحمیل شده توسط محدودیت‌های سخت‌افزاری در دسترس بودن منابع ارائه می‌دهد [۲۱].

$$HC = \frac{C_{max} + M_{max} + S_{max}}{Total\ Resources} \times 100\% \quad (۷)$$

ازدحام شبکه: دسترسی‌پذیری پهنای باند شبکه و اتصال اینترنت، از عوامل مهم تأثیرگذار بر دسترسی به منابع در محاسبات لبه‌ای موبایل است. این موضوع از طریق رابطه ۸ درصد نسبت پهنای باند موجود شبکه به ظرفیت کلی آن را محاسبه می‌کند، قابل ارزیابی است. به این ترتیب می‌توان تأثیر ازدحام شبکه بر در دسترس بودن منابع را اندازه‌گیری کرد، که نشان دهنده میزان اشباع پهنای باند یا اختلاف است. مواردی از ازدحام شبکه، از دست دادن

طور میانگین ۲ الی ۴ میلی ثانیه باتوجه به تعداد همسایه‌ها زمان می‌برد. پذیرش وظیفه: گره m درخواست‌های وظیفه را از دستگاه‌های موجود در ناحیه تحت پوشش جدید خود دریافت می‌کند. چانه‌زنی: گره m برای تخصیص منابع درگیر چانه‌زنی توزیع شده با همسایگان $N_{m,t}$ می‌شود. تخصیص: گره m تخصیص‌های مورد مذاکره با همسایگان را قطعی و نهایی می‌سازد و سپس وظایف پذیرفته شده را قبل از انقضای زمان t پردازش می‌کند. اکنون به جزئیات فرآیند چانه‌زنی و تخصیص در هر شکاف می‌پردازیم.

چانه‌زنی: گره m راهبرد پیشنهادی خود $\sigma_{m,t}$ را بر اساس در دسترس بودن به‌روزرسانی شده منابع برای به حداکثر رساندن مطلوبیت $U_{m,t}$ محاسبه می‌کند. با استفاده از طرح عقب‌نشینی نمایی دودویی، پیشنهادهای موقتی را به همسایگان متناسب با منابع موجود می‌دهد. همسایه‌ها با پذیرش/رد پاسخ می‌دهند تا زمانی که ظرفیت تکمیل شود یا همه پیشنهادها پردازش شود. این پویایی چانه‌زنی توزیع شده واقع‌بینانه را تقلید می‌کند.

تخصیص: گره m پیشنهادها موقت پذیرفته شده را در برنامه زمان‌بندی $S'_{m,t}$ خود ثبت می‌کند. اگر دسترس‌پذیری لحظه‌ای منابع کافی نباشد، چانه‌زنی را مجدداً شروع می‌کند. همچنین اگر $S'_{m,t}$ در t امکان‌پذیر باقی بماند، متعهد است. در غیر این صورت، m با بهترین راهبرد واکنش $\sigma'_{m,t}$ دوباره چانه‌زنی می‌کند. این به‌طور مکرر با مذاکرات ناهم‌زمان ادامه می‌یابد تا زمانی که یک برنامه باثبات $S'_{m,t}$ در عرض t به دست آید. همگرایی: چانه‌زنی تضمین شده است که به تخصیص تعادل واکنش همگرا می‌شود، زیرا گره‌ها ابزارهای محلی را از طریق به‌روزرسانی راهبرد نزدیک‌بینی در طول زمان به حداکثر می‌رسانند.

الگوریتم DAB که دارای حلقه‌هایی بر روی گره‌ها و شکاف‌های زمانی است، پیچیدگی زمانی تا حد زیادی تحت تاثیر این دو عامل قرار می‌گیرد. اگر گره‌های n و شکاف‌های زمانی t وجود داشته باشد، و الگوریتم هر گره را در یک شکاف زمانی جداگانه پردازش کند، ممکن است

Algorithm 1: Distributed Availability-aware Bargaining (DAB)

Input: Nodes with location, Strategies, Task requests, Resources

Output: Bargaining strategy at time t , Resource allocation, Processed tasks

```

1. foreach time slot  $t$  do
2.   foreach node  $m$  do
3.     Draw step size  $l_{m,t} \sim L(\lambda)$ 
4.     Draw direction  $\theta_{m,t} \sim U(0, 2\pi)$ 
5.     Update location  $x_{m,t+1}, y_{m,t+1}$ 
6.     Update resource availability
7.      $N_{m,t} \leftarrow$  Find nodes within range of  $x_{m,t+1}, y_{m,t+1}$ 
8.     Receive tasks requests  $T_{m,t}$  from devices in coverage
9.     if resources available then:
10.      Compute initial bargaining strategy based on
        availability
11.    else:
12.      Re-initialize bargaining
13.    While offers not finalized do
14.      foreach node  $n \in N_{m,t}$  do
15.        if resources available then:
16.           $p \leftarrow$  Offer proportionate to available resources
17.          Response  $\leftarrow$  Get response from  $n$ 
18.          if (Response == Accept) then
19.             $S'_{m,t} \leftarrow$  Add ( $n$ , allocation) to schedule
20.          else
21.             $\sigma_{m,t} \leftarrow$  Update strategy using binary
              exponential backoff
22.          if ( $S'_{m,t}$  is feasible) then
23.             $S_{m,t} \leftarrow$  Commit provisionally accepted offers
24.          else
25.             $\sigma_{m,t} \leftarrow$  Best response strategy
26.            Go to bargaining step
27.          Process tasks allocated in  $S_{m,t}$ 
28.          Update resource availability

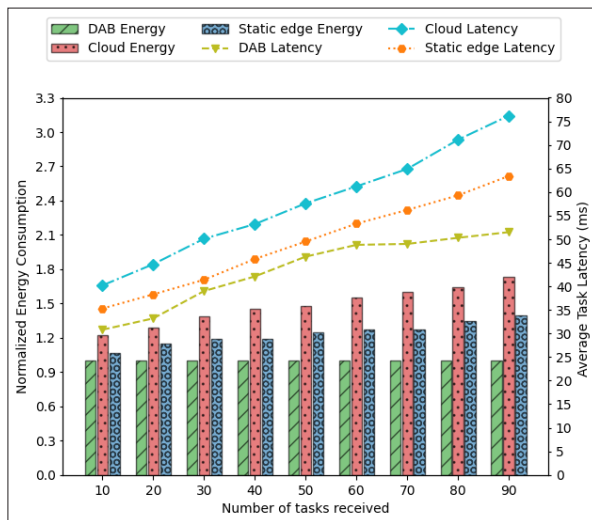
```

و تخصیص منابع در نظر گرفته شده است. این الگوریتم به هر گره اجازه می‌دهد بر اساس الگوهای تحرک حرکت لوی که الهام گرفته از طبیعت است، توزیع غیرمتمرکز و به‌صورت مستقل با در نظر گرفتن در دسترس بودن منابع حرکت کند (شکل ۱) و با همسایگانش در مورد تخصیص منابع مذاکره و توافق نماید. در هر شکاف زمانی t ، هر گره m مراحل زیر را برای تخصیص منابع از طریق چانه‌زنی محلی انجام می‌دهد:

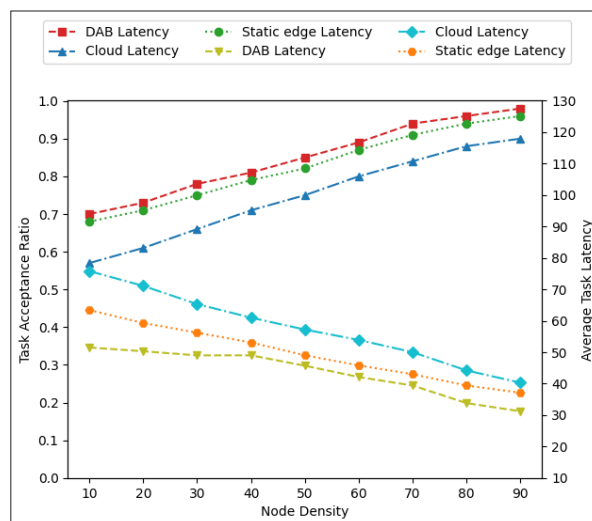
به‌روزرسانی تحرک: گره m به‌طور تصادفی اندازه گام $l_{m,t} \sim L(\lambda)$ و جهت $\theta_{m,t}$ را برای به‌روزرسانی مکان خود انتخاب می‌کند. سپس در دسترس بودن منابع خود را بروز می‌کند. کشف همسایه: گره m گره‌های همسایه $N_{m,t}$ را که در محدوده ارتباطی آن قرار دارند، شناسایی می‌کند، که به

ضعف آنها را شناسایی کنیم. نتایج با طرح‌های پایه محک می‌شوند: بارگذاری ابری: همه وظایف در یک ابر متمرکز و راه دور بارگذاری می‌شوند. لبه ایستا: وظایفی که بر اساس مجاورت به گره‌های لبه غیر متحرک ثابت اختصاص داده می‌شود. تخصیص حرکت لوی: وظایف به‌طور تصادفی به گره‌هایی که تحت تحرک حرکت لوی هستند، اختصاص داده می‌شوند.

در شکل ۳ نسبت پذیرش وظایف توسط DAB (نقاط مربعی شکل با رنگ قرمز) نسبت به دو حالت دیگر با افزایش تعداد گره‌ها حداقل ۳٪ بهتر عملکرد دارد و میزان



شکل ۲. نسبت میزان مصرف انرژی و میانگین تأخیر وظایف به تعداد وظایف دریافتی توسط گره‌ها



شکل ۳. نسبت پذیرش و میانگین تأخیر وظایف به تعداد گره

با پیچیدگی زمانی پایه $O(n \times t)$ شروع کنیم.

۵. نتایج

در این مقاله از یک شبیه‌سازی رویداد گسسته استفاده شده تا یک سیستم محاسباتی لبه موبایل توزیع‌شده جغرافیایی را در بازه‌های زمانی مدل‌سازی شود. شبیه‌ساز پارامترهای مختلفی مانند تعداد سرورهای لبه، نرخ رسیدن وظایف و ظرفیت پردازش هر کارساز را در نظر می‌گیرد. منطقه شبیه‌سازی ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر با ۹۰ گره لبه متحرک ناهمگن از نظر قابلیت‌های محاسباتی (۱۰-۱۰۰ گیگاهرتز) و شبکه (۱۰۰-۱۰۰۰ مگابیت بر ثانیه) است. تحرک آن‌ها از مدل حرکت لوی پیروی می‌کند. تعداد ۲۰۰ دستگاه اینترنت اشیا وجود دارد که به‌طور یکنواخت در این منطقه توزیع‌شده‌اند که وظایف مهم تأخیر را در طول زمان ایجاد می‌کنند. شدت‌های مختلف بارکاری شبیه‌سازی عبارت است از: سبک (۵-۱۰ وظیفه در دقیقه / دستگاه)، متوسط (۱۰-۱۵ وظیفه در دقیقه / دستگاه) و سنگین (۱۵-۲۰ وظیفه در دقیقه / دستگاه). معیارهای کلیدی زیر برای مقایسه کارایی الگوریتم ارزیابی شده است:

نسبت پذیرش وظایف: نسبت وظایف پذیرفته‌شده به کل وظایف دریافتی در لبه، منعکس‌کننده استفاده از منابع است. **میانگین تأخیر وظایف:** میانگین زمان لازم برای تکمیل اجرای وظایف پذیرفته‌شده. تأخیر کمتر انطباق توافقنامه سطح خدمات^{۱۳} را تضمین می‌کند. بهره‌وری انرژی: کل انرژی مصرف‌شده برای محاسبات و انتقال در هر وظیفه بهینه‌سازی مصرف انرژی برای محاسبات لبه موبایل ضروری است. علاوه بر معیارهای کلیدی ذکر شده، در این مطالعه، تأثیر پارامترهای مختلف شبیه‌سازی بر عملکرد الگوریتم‌ها در جدول ۱ بررسی شده است. این پارامترها شامل تعداد گره‌های لبه، نرخ رسیدن وظایف، ظرفیت پردازش گره‌ها، الگوی تحرک حرکت لوی و شدت بارکاری (سبک، متوسط و سنگین) می‌شوند. با تغییر این پارامترها، می‌توانیم رفتار الگوریتم‌ها را در شرایط مختلف ارزیابی کنیم و نقاط قوت و

13-Service Level Agreement (SLA)

جدول ۱. مقایسه رویکردها با توجه به معیارهای کارایی و تأثیر آنها؛
 نشان دهنده عملکرد خوب، نشان دهنده عملکرد ضعیف
 و نشان دهنده عملکرد متوسط

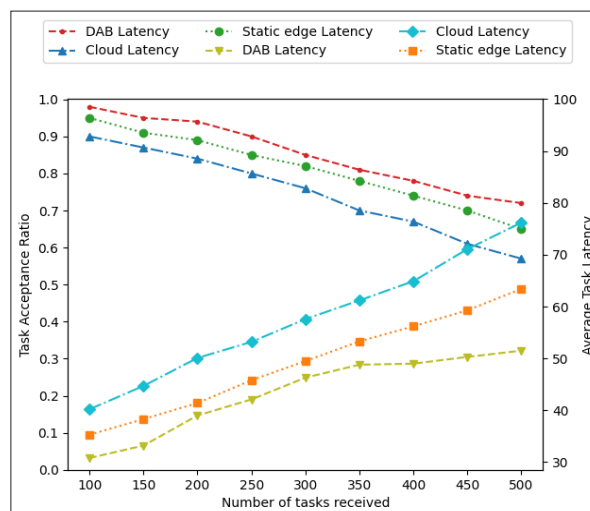
معیار ارزیابی	الگوریتم پیشنهادی	بارگذاری لبه	لبه ایستا
نسبت پذیرش وظیفه	بالا	بالا	متوسط
میانگین تأخیر وظیفه	پایین	بالا	متوسط
بهره‌وری انرژی	بالا	پایین	متوسط
مصرف انرژی کلی سیستم	متوسط	بالا	پایین
متوسط مصرف انرژی به ازای هر وظیفه	پایین	بالا	متوسط
بار متوازن سیستم	متوازن	نامتوازن	نسبتاً متوازن
درصد استفاده از منابع	متوسط	پایین	متوسط

دریافتی توسط گره‌ها خواهد شد و البته تعداد وظایف پذیرش شده با الگوریتم DAB بیشتر از ۶٪ سایر حالات که در نمودار ۳-۳-۴ نمایان است و این به خاطر ماهیت تحرکی است که در الگوریتم مدنظر گرفته شده است.

تحلیل جدول: با توجه به جدول ۱ الگوریتم ۱ (الگوریتم توزیع شده برای مذاکره و تخصیص منابع) در اکثر معیارها عملکرد خوبی دارد. نسبت پذیرش وظیفه بالا، تأخیر پایین و بهره‌وری انرژی بالا نشان می‌دهد که این الگوریتم از منابع موجود به خوبی استفاده می‌کند و می‌تواند وظایف را با تأخیر کم و مصرف انرژی کم پردازش کند. بار متوازن سیستم و درصد استفاده از منابع بالا نیز نشان دهنده توزیع مناسب بار در میان گره‌های لبه است. تعداد چرخه‌های چانه زنی متوسط، پیچیدگی محاسباتی معقولی را نشان می‌دهد.

بارگذاری ابری، گرچه در پذیرش وظایف عملکرد خوبی دارد، اما در معیارهای حیاتی مانند تأخیر، مصرف انرژی و توزیع بار عملکرد ضعیفی دارد. این امر به دلیل فاصله زیاد بین دستگاه‌های اینترنت اشیاء و ابر و همچنین بار متمرکز است.

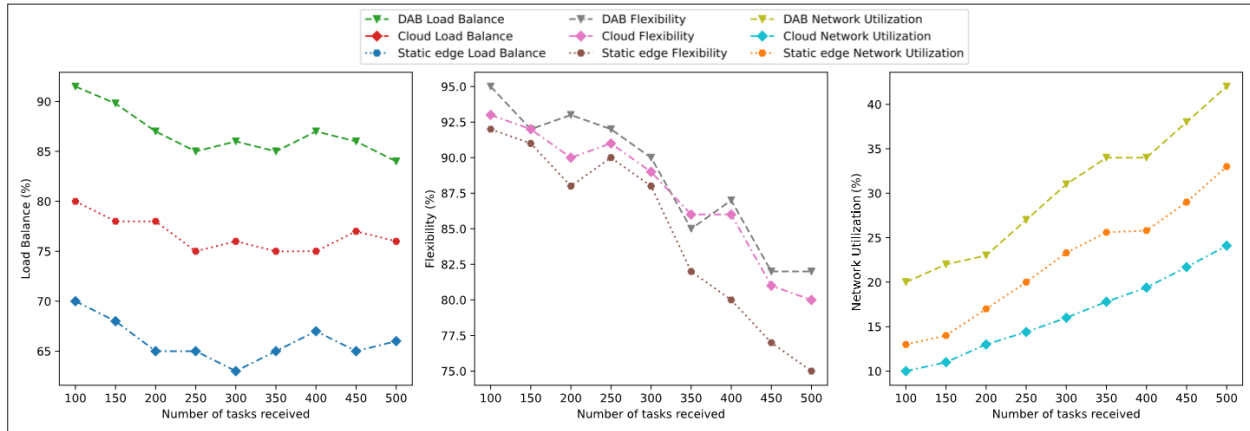
لبه ایستا در بیشتر معیارها عملکرد متوسطی دارد. گرچه مصرف انرژی کلی سیستم پایین است، اما معیارهای دیگر مانند تأخیر، بهره‌وری انرژی به ازای هر وظیفه و



شکل ۴. نسبت پذیرش و میانگین تأخیر وظیفه به تعداد وظایف دریافتی توسط گره‌ها

پذیرش وظایف تا نزدیک به ۱۰۰ درصد نیز می‌رود. با افزایش تعداد گره‌ها، میزان تأخیر کاهش می‌یابد. وقتی تحرک را نیز در نظر بگیریم، مشاهده می‌شود که الگوریتم (نقاط مثلثی شکل با رنگ زیتونی) همچنان بهبود ۴٪ را نسبت به سایر مدل‌ها دارد. همچنین وظایف استفاده شده در شبیه‌سازی، دارای توزیع یکنواخت از سه مدل بارکاری است که نشان دهنده رعایت اعتدال بین هر سه مدل بارکاری هستیم که در شکل ۲ مصرف انرژی و میانگین تأخیر برای گره‌ها را نسبت به تعداد وظایف دریافتی نشان می‌دهیم.

در این نمودار مقدار مصرف انرژی الگوریتم DAB در حالتی که گره‌ها دارای تحرک هستند نسبت به دو مدل دیگر که برای گره‌ها مدل نظر گرفته شده است حداقل ۷٪ و حداکثر ۲۲٪ بهتر عمل کرده است، چراکه الگوریتم توزیع شده بر اساس مدل تحرک گره‌ها وظایف را به آن‌ها اختصاص می‌دهد. از طرف دیگر با افزایش تعداد وظایف دریافتی میزان تأخیر در مدل ابری و لبه‌های ایستا ۸٪ و ۶٪ بدتر از روش DAB است. در شکل ۴ مقدار تأخیر به نسبت تعداد وظایف پذیرش شده از جانب گره‌ها را نشان می‌دهد که در واقع مقایسه‌ای در رابطه با افزایش تعداد وظایف تأخیر تأثیر تأخیر در پذیرش وظایف به چه صورت است که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد وظایف، میزان تأخیر نیز افزایش می‌یابد که این باعث کاهش تعداد وظایف



شکل ۵. نشان‌دهنده توازن بار، انعطاف‌پذیری و میزان مصرف شبکه نسبت به تعداد وظایف دریافتی

۵ درصد نسبت به سایر رویکردها در مقابل تغییرات ناگهانی بارکاری انعطاف‌پذیری بیشتری را داشته باشد. در شکل ۵ نمودار سمت راست نشان‌دهنده مقدار استفاده از شبکه را نشان می‌دهد. درصد استفاده از ظرفیت شبکه نشان‌دهنده آن است که در یک بازه زمانی مشخص، به‌طور میانگین چند درصد از کل ظرفیت پهنای باند شبکه‌ای موجود در سیستم، مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده بهینه از پهنای باند و جلوگیری از اشباع شدن پیوندهای شبکه، برای عملکرد مطلوب سیستم حائز اهمیت است. هرچقدر مقدار این معیار بیشتر باشد، به معنای بهره‌برداری بهتر الگوریتم از منابع شبکه‌ای موجود است. همانطور که از نمودار مشخص است حدود ۸ الی ۱۰ درصد الگوریتم DAB توانسته بهره‌وری بیشتری را داشته باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک الگوریتم توزیع‌شده مبتنی بر نظریه بازی برای مدیریت منابع در سامانه‌های محاسباتی لبه موبایل که از برنامه‌های اینترنت اشیاء بی‌درنگ پشتیبانی می‌کنند، پیشنهاد شده است. رویکرد با بهره‌گیری از بینش‌های رفتارهای جستجوی طبیعی، مبتنی بر حرکت گره‌ها در حرکت لوی و تخصیص وظایف از طریق چانه‌زنی محلی است. شبیه‌سازی‌های گسترده، رویکرد را در میان شدت‌های بارکاری و تراکم شبکه‌های مختلف ارزیابی کردند. نتایج بهبود نسبت پذیرش وظیفه

توزیع بار متوسط هستند. این الگوریتم نمی‌تواند از مزایای تحرک گره‌ها برای بهینه‌سازی منابع استفاده کند. در شکل ۵ از چپ به راست نمودار توازن بار، انعطاف‌پذیری و سپس مقدار مصرف شبکه به ازای وظایف دریافتی هر رویکرد را مشاهده می‌کنیم. در نمودار توازن بار، مشاهده می‌شود که DAB توانسته است بارکاری را به خوبی در محیط توزیع شده لبه موبایل به صورت متوازن بین گره‌ها تقسیم کند و با افزایش تعداد وظایف دریافتی همچنان نسبت به سایر رویکردها حدود میانگین ۱۰ الی ۱۲ درصد بهتر توازن را رعایت کرده است. سپس در نمودار وسط که قابلیت انعطاف‌پذیری در بار متغیر، الگوریتم‌ها را نمایش داده‌ایم. در سیستم‌های محاسباتی لبه موبایل، با توجه به ماهیت متغیر ترافیک و الگوهای درخواست‌های کاربران، احتمال دارد بارکاری ورودی به‌طور ناگهانی افزایش یا کاهش پیدا کند.

انعطاف‌پذیری در بار متغیر به معنای توانایی الگوریتم در سازگاری و واکنش مناسب به این تغییرات ناگهانی در بارکاری است، به گونه‌ای که بتواند سطح کیفیت سرویس‌دهی مانند تأخیر، توازن بار و رد درخواست را در حد قابل قبولی حفظ کند. هرچقدر الگوریتم انعطاف‌پذیری بیشتری داشته باشد، در برابر نوسانات بارکاری مقاوم‌تر عمل خواهد کرد. این معیار مهم، پایداری و قابلیت اطمینان الگوریتم تحت شرایط غیرقابل پیش‌بینی را منعکس می‌کند. حال مشاهده می‌شود که الگوریتم DAB توانسته است حدود

- [9] M. A. Hassan, M. Xiao, Q. Wei, and S. Chen, "Help your mobile applications with fog computing," in Proc. 12th Annu. IEEE Int. Conf. Sens., Commun., Netw.-Workshops (SECON Workshops), Jun. 2015, pp. 1-6.
- [10] Rukmani Panjanathan and Ganesan Ramachandran, "Enhanced low latency queuing algorithm with active queue management for multimedia applications in wireless networks", International Journal of High Performance Computing and Networking, vol. 10, no. 1-2, pp. 23-33, 2017.
- [11] Jie Zhang, Guangjie Han and Yujie Qian, "Queuing theory based co-channel interference analysis approach for high-density wireless local area networks", Sensors, vol. 16, no. 9, 2016.
- [12] S. Kim, "Bargaining Game Based Offloading Service Algorithm for Edge-Assisted Distributed Computing Model," in IEEE Access, vol. 10, pp. 63648-63657, 2022.
- [13] W. Duan, X. Gu, M. Wen, Y. Ji, J. Ge and G. Zhang, "Resource Management for Intelligent Vehicular Edge Computing Networks," in IEEE TITS, vol. 23, no. 7, pp. 9797-9808, July 2022.
- [14] T. Bahreini, M. Brocanelli and D. Grosu, "VECMAN: A Framework for Energy-Aware Resource Management in Vehicular Edge Computing Systems," in IEEE TMC, vol. 22, no. 2, pp. 1231-1245, 1 Feb. 2023.
- [15] A. Shakarami, M. Ghobaei-Arani, and A. Shahidinejad, "A survey on the computation offloading approaches in mobile edge computing: A machine learning-based perspective," Computer Networks, vol. 182, p. 107496, Dec. 2020.
- [16] A. Shakarami, A. Shahidinejad, and M. Ghobaei-Arani, "A review on the computation offloading approaches in mobile edge computing: A game-theoretic perspective," Software: Practice and Experience, vol. 50, no. 9, pp. 1719-1759, Apr. 2020.
- [17] O. Kolosov, G. Yadgar, D. Breitgand and D. H. Lorenz, "PASE: Pro-Active Service Embedding in the Mobile Edge," 2023 IEEE 43rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Hong Kong, Hong Kong, 2023, pp. 1-11.
- [18] Y. Chen, J. Zhao, J. Hu, S. Wan, and J. Huang, "Distributed Task Offloading and Resource Purchasing in NOMA-enabled Mobile Edge Computing: Hierarchical Game Theoretical Approaches," ACM Transactions in Embedded Computing Systems, May 2023.
- [19] Minh Hai Vu et al., "An Empirical Study of MPQUIC Schedulers in Mobile Wireless Networks," Dec. 2022.
- [20] W. Zhou et al., "Priority-Aware Resource Scheduling for UAV-Mounted Mobile Edge Computing Networks," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 7, pp. 9682-9687, July 2023.
- [21] A. Islam and M. Ghose, "ELITE: Energy and Latency-Optimized Task Offloading for DVFS-Enabled Resource-Constrained Devices in MEC," Lecture Notes in Computer Science, pp. 50-67, Jan. 2024.
- [22] A. Younesi, M. A. Fazli, and A. Ejlali, "A Novel Levy Walk-based Framework for Scheduling Power-intensive Mobile Edge Computing Tasks," Research Square (Research Square), Mar. 2024.

۳٪، کاهش تأخیر ۶٪، صرفه‌جویی در انرژی ۲۲٪، حدود ۱۰٪ در توازن بار و استفاده از ظرفیت شبکه و ۵٪ در قابلیت انعطاف‌پذیری بهتر را در مقایسه با بارسپاری ابری و لبه ایستا نشان می‌دهند. این کارایی انطباق و مهار پویایی همکاری لبه‌های اضطراری را از الگوهای تحرک حرکت لوی نشان می‌دهد. همچنین نشان داده شده است که الگوریتم توزیع‌شده به‌طور مستقل استفاده از منابع را به حداکثر می‌رساند و معیارهای برنامه را در یک محیط پویا بهینه می‌کند. کارهای آتی مورد نظر شامل بهبود مدل فعلی با در نظر گرفتن جنبه‌های امنیت و حریم خصوصی، توسعه سازوکار یادگیری تقویتی برای انتخاب بهینه پارامترهای الگوریتم، و ترکیب الگوریتم پیشنهادی با سازوکارهای کنترل بار مثل مهاجرت محاسباتی است.

۷. منابع

- [1] L. A. Haibeh, M. C. E. Yagoub and A. Jarray, "A Survey on Mobile Edge Computing Infrastructure: Design, Resource Management, and Optimization Approaches," in IEEE Access, vol. 10, pp. 27591-27610, 2022.
- [2] S. Douch, M. R. Abid, K. Zine-Dine, D. Bouzidi and D. Benhaddou, "Edge Computing Technology Enablers: A Systematic Lecture Study," in IEEE Access, vol. 10, pp. 69264-69302, 2022.
- [3] F. Al-Doghman, N. Moustafa, I. Khalil, N. Sohrabi, Z. Tari and A. Y. Zomaya, "AI-Enabled Secure Microservices in Edge Computing: Opportunities and Challenges," in IEEE TSC, vol. 16, no. 2, pp. 1485-1504, 1 March-April 2023.
- [4] S. Yang, Z. Su, Q. Xu, R. Xing and D. Fang, "Task Allocation Optimization Strategy in UAV-enabled Mobile Edge Computing System," 2023 IEEE (MetaCom), Kyoto, Japan, 2023, pp. 338-344.
- [5] J. Moura and D. Hutchison, "Game Theory for Multi-Access Edge Computing: Survey, Use Cases, and Future Trends," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 1, pp. 260-288, Firstquarter 2019.
- [6] S. Arisdakessian, O. A. Wahab, A. Mourad, H. Otrouk and N. Kara, "FoGMatch: An Intelligent Multi-Criteria IoT-Fog Scheduling Approach Using Game Theory," in IEEE/ACM TN, vol. 28, no. 4, pp. 1779-1789, Aug. 2020.
- [6] H. Lu, G. Xu, C. W. Sung, S. Mostafa and Y. Wu, "A Game Theoretical Balancing Approach for Offloaded Tasks in Edge Datacenters," 2022 IEEE 42nd Int. Conf. Dist. Com. Sys. (ICDCS), Bologna, Italy, 2022, pp. 526-536.
- [8] Liqing Liu, Zheng Chang, Xijuan Guo and T. Ristaniemi, "Multi-objective optimization for computation offloading in mobile-edge computing," 2017 (ISCC), Heraklion, Greece, 2017, pp. 832-837.