مقاله پژوهشی

تخصیص منبع آگاه از مهلت و انرژی با استفاده از ترکیب رویکرد حریصانه چندمعیاره و درخت تصمیم در محیط اینترنت اشیا- مه- ابر

شیوا رزاق‌زاده و سارا حسین‌پور

چکیده: با رشد روزافزون اینترنت اشیا، حجم داده‌های جمع‌آوری‌شده از سنسورها به طور چشم‌گیری افزایش یافته است. با توجه به این امر، نیاز به اتصال اینترنت اشیا به سرورهای ابری برای رفع نیازهای ذخیره‌سازی، پردازش و تحلیل داده‌ها احساس می‌شود. همچنین ظهور فناوری میانی مانند مه، با انجام محاسبات اولیه بر روی درخواست‌ها در لبه شبکه، موجب کاهش حجم محاسبات ارسالی به ابر شده است. با این حال زمان‌بندی وظایف در منابع ابری، یک مسئله چالش‌برانگیز است. زمان‌بندی منابع به عنوان یک مسئله NP-Hard به معنای تخصیص و توزیع منابع (مانند پردازنده، حافظه، شبکه و ...) به وظایف ارسالی در سرورهای ابری به صورت بهینه و مؤثر می‌باشد. از این رو محققان زیادی سعی در ارائه روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری برای یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه هستند. هدف اصلی در این روش‌ها یافتن منبع مناسب برای تخصیص به وظیفه است، حال آن که وضعیت وظیفه از نظر مهلت زمان اجرای وظیفه بر روی ماشین مجازی در نظر گرفته نمی‌شود. در کاربردهای اینترنت اشیا، داده‌ها ممکن است مربوط به وظایف بحرانی باشند که نیازمند پاسخ سریع هستند. به عبارت دیگر وظایفی که مهلت کمی برای اجرا دارند ممکن است در راستای بهبود سایر اهداف کیفیت سرویس به ماشین‌های مجازی با قدرت پردازشی کمتری ارسال شوند و در زمان مقرر قادر به اتمام نباشند که توجه زیادی به این مسئله در روش‌های پیشین نشده است. از این رو در این مقاله، رویکرد تخصیص منابع با استفاده از زمان‌بندی در بستر اینترنت اشیا- مه- ابر بر اساس ترکیب درخت تصمیم در راستای اولویت‌بندی وظایف و رویکرد حریصانه چندمعیاره ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند روش پیشنهادی با تکیه بر اولویت‌بندی وظایف و ایجاد توازن در اهداف مختلف بر اساس رویکرد حریصانه چندمعیاره، با در نظر گرفتن فاکتورهای هزینه و زمان اتمام کار از نظر معیارهای ارزیابی نزدیک به بهینه عمل کرده و در مقایسه با روش‌های پیشین بهبود یافته است.

کلیدواژه: **اینترنت اشیا، تخصیص منابع، زمان‌بندی، درخت تصمیم، رویکرد حریصانه چندمعیاره.**

۱- مقدمه

اتصال «اشیا» و کارکرد آنها از راه دور، از طریق شبکه‌ها و فناوری‌های ارتباطی گوناگون، مفهومی نوین است که با نام «اینترنت اشیا (IoT)[1]» معرفی شده است. به عبارت ساده، این مفهوم به معنای توانایی دستگاه‌ها و مجموعه‌ای از دستگاه‌های هوشمند در ایجاد یک شبکه هوشمند برای جمع‌آوری و پردازش داده‌ها با یا بدون دخالت مستقیم انسان است [۱] و [۲]. دستگاه‌های خاص‌منظوره با استفاده از تجهیزات ارتباطی به شکلی مؤثر با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و داده‌های دریافت‌شده از محیط را به هم ارسال می‌کنند. این دستگاه‌ها مجهز به حسگرهایی هستند که داده‌های متنوعی را برای کاربردهای گوناگون جمع‌آوری می‌کنند [۳] و [۴]. با افزایش محبوبیت کاربردهای اینترنت اشیا در حوزه‌های علمی و صنعتی مختلف، نیاز به ذخیره‌سازی و پردازش داده‌های جمع‌آوری‌شده نیز بیشتر احساس می‌شود. این در حالی است که تجهیزات خاص‌منظوره تعبیه‌شده در این دستگاه‌ها توانایی پردازش و ذخیره داده‌ها را ندارند؛ از این رو برای رفع این مشکل، نیاز به میان‌افزارها و ابزارهای جانبی وجود دارد. محاسبات مه یا لبه، یکی از میان‌افزارهایی است که برای این منظور توسعه یافته است [۵] و [۶].

محاسبات مه به‌عنوان یک فناوری نوظهور با هدف رفع تنگناهای محاسباتی و شبکه‌ای در استقرار برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیا در مقیاس بزرگ طراحی شده است. این فناوری، الگویی مکمل و کارآمد برای محاسبات ابری ارائه می‌دهد که در آن عناصر محاسباتی، شبکه، ذخیره‌سازی و شتاب‌دهی به‌صورت چندلایه، توزیع‌شده و گاه مشارکتی در لبه‌ها و لایه‌های شبکه مستقر می‌شوند. محاسبات مه، الگویی نوین در محاسبات ارائه می‌دهد که در آن سرویس‌های شبکه به‌جای ارجاع به فضای ابری از طریق اینترنت، در لبه و/ یا شبکه محلی مستقر می‌شوند. محاسبات لبه به‌صورت لایه‌های مختلف توزیع شده است و در هر لایه، سرویس‌های ویژه‌ای ارائه می‌شود. لایه مه، تمامی امکانات محاسباتی میان دستگاه‌ها در شبکه‌های اینترنت اشیا و سرورهای ابری را به‌منظور ذخیره‌سازی و پردازش در چندین سطح سلسله‌مراتبی پوشش می‌دهد. هر یک از این سطوح، ویژگی‌های متفاوتی دارند که بر اساس نیازهای پردازش داده‌ها تنظیم می‌شود. در این لایه‌ها، داده‌های خام جمع‌آوری‌شده به اطلاعات هوشمندی تبدیل می‌شوند که برای پردازش و ذخیره‌سازی آماده‌اند [۷].

داده‌ها در محیط محاسبات مه میان گره‌های مختلف منتقل می‌شوند و پس از پردازش اولیه به سرورهای ابری ارسال می‌گردند. محیط پردازش مه با انجام پردازش اولیه روی داده‌ها، حجم بار کاری منتقل‌شده به ابر را کاهش می‌دهد. با این حال، حفظ کیفیت خدمات در خود محیط مه به یکی از دغدغه‌های اصلی در حوزه محاسبات مه تبدیل شده است [۸]. افزایش کاربردهای محیط مه منجر به افزایش مصرف انرژی در گره‌های مه می‌شود. همچنین در برخی کاربردها مانند مراقبت‌های بهداشتی در شبکه‌های اینترنت اشیا، داده‌های بحرانی علاوه بر پردازش، نیازمند ارسال فوری و بدون تأخیر قابل توجه هستند [۹] و [۱۰].

این مقاله در تاریخ ۹ تیر ماه ۱۴۰۳ دریافت و در تاریخ ۹ دی ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

شیوا رزاق‌زاده (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران، (email: shiva.razzaghzadeh@srbiau.ac.ir).

سارا حسین‌پور، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران، (email: sara.hsnpoor@gmail.com).

1. Internet of Things

ابر، فرصت‌های هیجان‌انگیزی برای مجازی‌سازی در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌کند. بسیاری از سازمان‌هایی که از خدمات ابری بهره می‌برند، می‌توانند هزینه‌های عملیاتی مرتبط با ارتباطات اطلاعاتی را کاهش دهند، از ابزارها و زیرساخت‌های ابری برای خدمات فناوری اطلاعات خود استفاده کنند و زمینه همکاری در سطوح جدید را میان انواع کاربران فراهم سازند. تنوع خدمات ارائه‌شده توسط ارائه‌دهندگان سرویس‌های ابری بسیار گسترده و چشمگیر است [۱۱]؛ از این رو استفاده از این خدمات برای سازمان‌ها تصمیمی منطقی به نظر می‌رسد. در حال حاضر، حجم عظیمی از داده‌های تولیدشده توسط دستگاه‌های توزیع‌شده اینترنت اشیا به محیط ابری ارسال می‌شود تا در منابع ابری پردازش و ذخیره‌سازی شوند. منابع ابری داده‌ها را دریافت کرده و بر اساس ماهیت دستگاه‌های ارسال‌کننده، وظایف و پردازش‌های لازم را تعریف و اجرا می‌کنند. در چنین شرایطی به دلیل حجم بالای داده‌ها در اینترنت اشیا، بار کاری واردشده به ابر بسیار زیاد است و این امر مستلزم صرف زمان پردازش طولانی‌تر، تأخیر بیشتر و هزینه‌های قابل توجهی خواهد بود.

از سوی دیگر، برخی برنامه‌های کاربردی در بستر اینترنت اشیا به پردازش سریع و زمان پاسخ کوتاه نیاز دارند و دارای مهلت‌های سخت‌گیرانه‌ای برای ارائه خدمات هستند. در چنین شرایطی، اجرای این وظایف در محیط ابر عملاً غیرممکن و ناکارآمد خواهد بود؛ بنابراین پردازش غیرمتمرکز داده‌های اینترنت اشیا به‌عنوان یک رویکرد مؤثر مطرح می‌شود. در واقع، دستگاه‌های اینترنت اشیا (مانند دروازه‌ها، حسگرها و سیستم‌های تعبیه‌شده) منابع محاسباتی، ذخیره‌سازی و شبکه‌ای را فراهم می‌کنند که امکان انتقال اجرای برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیا به لبه شبکه را مهیا می‌سازد. به همین دلیل، این رویکرد به‌عنوان محاسبات مه یا محاسبات لبه توصیف می‌شود [۱۲]. محاسبات مه به‌عنوان گسترش زیرساخت مبتنی بر ابر، امکاناتی نظیر محاسبات، ذخیره‌سازی و منابع شبکه مشابه ابر را فراهم کرده و اجرای برنامه‌های اینترنت اشیا را در نزدیکی منبع داده تسهیل می‌کند. این روش در مقایسه با مراکز داده راه دور، مزیت کاهش زمان پاسخگویی برنامه را به همراه دارد. گره‌های مه در موقعیت‌های جغرافیایی پراکنده قرار دارند و منابع آنها در مقایسه با ابر محدودتر است. میان گره‌های مه، عواملی چون زمان رفت‌وبرگشت شبکه، سرعت پردازش داده‌ها و دسترسی به منابع همچنان بسیار اهمیت دارند [۱۳]. به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای بهینه‌سازی زمان تکمیل و مصرف انرژی، پردازش اولیه داده‌های جمع‌آوری‌شده از دستگاه‌های اینترنت اشیا در محیط محاسبات مه انجام می‌شود و وظایف اصلی برای پردازش نهایی به محیط ابر ارسال می‌شوند.

از این رو در این مقاله رویکردی برای تخصیص منابع در محیط اینترنت اشیا- مه- ابر با ترکیب رویکرد حریصانه چندمعیاره و درخت تصمیم ارائه شده است. در روش پیشنهادی، داده‌های دریافت‌شده از دستگاه‌های اینترنت اشیا به محیط مه ارسال می‌شود. در این محیط، پردازش اولیه روی آنها انجام می‌گیرد. در زمان پردازش اولیه، داده‌های جمع‌آوری‌شده به قالب وظایف گسسته یا جریان کاری تبدیل می‌شوند که ممکن است وظایف در آن به یکدیگر مرتبط باشند. سپس وظایف بر اساس ویژگی‌هایی نظیر زمان تخمینی اجرا، مهلت تعیین‌شده و تعداد وظایف وابسته در جریان کاری، با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم دسته‌بندی می‌شوند. درخت تصمیم، وظایف را به دو دسته وظایف فوری و وظایف عادی تقسیم می‌کند. سپس این وظایف برای اجرای تکمیلی به محیط ابر ارسال می‌شوند. در محیط ابر با استفاده از رویکرد حریصانه و با توجه به دسته مربوط به هر وظیفه، زمان‌بندی انجام می‌شود؛ این زمان‌بندی فاکتورهای زمان اتمام، هزینه و انرژی لازم برای اجرای وظایف در ماشین‌های مجازی را در نظر می‌گیرد. نهایتاً روش پیشنهادی بر اساس معیارهای ارزیابی شناخته‌شده در زمینه تخصیص منابع ارزیابی شده و با سایر روش‌های پیشین در شرایط برابر مقایسه خواهد شد.

سهم اصلی این مقاله به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- پیاده‌سازی بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرهای تعبیه‌شده در این محیط
- استفاده از ترکیب رویکرد حریصانه چندمعیاره و درخت تصمیم برای مدیریت زمان‌بندی
- دسته‌بندی وظایف در لایه مه بر اساس زمان تخمینی اجرا، مهلت و تعداد وظایف وابسته با استفاده از درخت تصمیم
- تخصیص منابع بر مبنای زمان تکمیل وظایف در ماشین‌های مجازی، هزینه و انرژی مورد نیاز برای اجرای وظایف با استفاده از جستجوی حریصانه
- استفاده از تابع ارزیابی چندهدفه برای بهبود اهداف کیفیت خدمات
- شبیه‌سازی روش پیشنهادی در محیط ترکیبی اینترنت اشیا- مه- ابر با توجه به سناریوهای مختلف

ادامه مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم، کارهای مرتبط بررسی می‌شود. بخش سوم به ارائه روش پیشنهادی می‌پردازد. در بخش چهارم، پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی آمده و در بخش پنجم، نتیجه‌گیری مقاله بیان می‌شود.

۲- کارهای مرتبط

در [۱۴] برای رفع مشکل برآورده‌سازی نیازهای پویا و مبتنی بر مهلت کاربر، الگوریتم‌های تخصیص و تأمین منابع با استفاده از رتبه‌بندی منابع و ارائه آنها به‌صورت ترکیبی و سلسله‌مراتبی پیشنهاد شده است.

در [۱۵]، مسئله زمان‌بندی کار به‌صورت ریاضی برای به حداقل رساندن مصرف انرژی کل گره‌های مه در حالی فرموله شده که الزامات کیفیت خدمات وظایف اینترنت اشیا برآورده شود.

در [۱۶] برای مقابله با مشکل بار نامتعادل و نادیده‌گرفتن اولویت کار در الگوریتم‌های زمان‌بندی قبلی، الگوریتم زمان‌بندی جدیدی به نام P-Min-Min-Max پیشنهاد شده که اولویت را با استراتژی حریص ترکیب می‌کند.

در [۱۳]، یک معماری کلی اینترنت اشیا- مه- ابر پیشنهاد شده که به‌طور کامل از مزایای مه و ابر بهره می‌برد. در این روش، تخلیه بار و تخصیص منابع به‌صورت محاسباتی که به بهینه‌سازی مصرف انرژی و زمان می پردازد، در قالب مسئله کمینه‌سازی هزینه انرژی و زمان فرموله شده است.

در [۱۷]، یک الگوریتم مکان‌یابی وظیفه مبتنی بر یادگیری پیشنهاد شده که از شبکه عصبی پیشرو نظارت‌شده برای تشخیص کاربردهای حیاتی حساس به تأخیر استفاده می‌کند.

در [۱۸] برای حل مسئله وظایف دارای مهلت سخت، یک معماری محاسباتی مه چندلایه جدید به نام استقرار خدمات مبتنی بر مهلت پیشنهاد شده که خدمات را هم در گره‌های مه و هم در ابر ارائه می‌دهد.

در [۱۹]، یک استراتژی تخصیص منابع مبتنی بر بهینه‌سازی برای افزایش فروش و کاهش هزینه‌ها پیشنهاد شده است. این روش شامل خوشه‌بندی وظایف با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند خوشه‌بندی k-means همراه با مدل تحلیل ویژگی‌های پنهان است که کیفیت خدمات و زمان کار را در نظر می‌گیرد. همچنین از یک الگوریتم ترکیبی

به نام بهینه‌سازی شبکه چندمرحله‌ای امن و متعادل بار برای تخصیص بهینه منابع با در نظر گرفتن کارایی مصرف انرژی، استفاده از پردازنده و زمان اجرا بهره می‌گیرد. مقایسه عملکرد این روش با سیستم‌های موجود بر مصرف انرژی، زمان اجرا و بهره‌وری منابع متمرکز است.

در [۲۰]، یک استراتژی تخصیص و برنامه‌ریزی منابع آگاه از انرژی مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌نام تکنیک اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل پیشنهاد شده است. رویکرد تخصیص منابع مبتنی بر توپولوژی در هنگام تخصیص منابع ماشین مجازی برای وظایف پردازشی، نسبت به الگوریتم‌های موجود عملکرد بهتری در صرفه‌جویی انرژی (تا ۴۰٫۲۵٪) و کاهش زمان اجرا (تا ۱۶٫۲۱٪) دارد. این صرفه‌جویی نشان‌دهنده‌ی ۷۸٫۰۶ ساعت، کاهش زمان پردازش و ۶۳٫۲۱۵ کیلوژول صرفه‌جویی در مصرف انرژی را در مقایسه با روش‌های زمان‌بندی فعلی نشان می‌دهد و اثربخشی مدل را در تخصیص و زمان‌بندی منابع در محیط لبه برجسته می‌کند. این صرفه‌جویی بالقوه است، یعنی در صورت تحقق شرایط زمانی و عملی، می‌تواند سبب کاهش زمان پردازش و مصرف انرژی مصرفی در مراحل مختلف باشد.

در [۲۱]، استراتژی‌های کارآمد انرژی برای مراکز داده به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی بررسی شده است. رایانش ابری با ارائه منابع و خدمات بر اساس تقاضا از طریق اینترنت، شرکت‌های سنتی فناوری اطلاعات را متحول کرده است. این فناوری بر اساس مدل پرداخت به‌ازای استفاده عمل می‌کند و انواع مختلفی از منابع مانند زیرساخت، پلتفرم و نرم‌افزار را برای کاربران در مراکز داده فراهم می‌آورد. مصرف انرژی با تکیه بر منابع تجدیدناپذیر، یکی از نگرانی‌های اصلی در رایانش ابری است.

در [۲۲]، یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سبز معرفی شده که ماشین‌های مجازی را بر روی سرورهای با انرژی کارآمد، زمان‌بندی می‌کند تا تعادل مناسبی بین مصرف انرژی و پایبندی به توافق‌نامه سطح خدمات را برقرار کند. این الگوریتم فضای جستجوی جهانی را بررسی می‌کند تا تعداد سرورهای فعال را به حداقل برساند و مصرف برق مرکز داده را کاهش دهد؛ در عین حال الزامات توافق‌نامه سطح خدمات را حفظ کند. این الگوریتم که در کلودسیم پیاده‌سازی شده است، با روش‌های موجود زمان‌بندی ماشین مجازی مقایسه می‌شود.

در [۲۳] به بررسی تبادل بین مصرف انرژی و تأخیر وظایف در سیستم‌های اینترنت اشیا با مقایسه سرورهای ابر و مه پرداخته شده است. این روش یک چارچوب تخصیص بار کاری را برای مدل‌سازی توابع مصرف انرژی و تأخیر معرفی می‌کند و الگوریتم اصلاح‌شده حداقل سستی اول را برای به حداقل رساندن آستانه‌های تأخیر پیشنهاد می‌دهد. علاوه بر این، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات غیرمسلط با هدف افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تأخیرها در مقایسه با الگوریتم‌های موجود در شبیه‌سازی عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از کاهش انرژی برتر در روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات غیرمسلط و اثربخشی نسخه دوم الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط در به حداقل رساندن تأخیرهای انتقال را نشان می‌دهند. الگوریتم اصلاح‌شده حداقل سستی اول به طور قابل توجهی آستانه تأخیر را در مقایسه با سایر رویکردها کاهش داده و کارایی مناسب فراابتکاری‌ها را در محاسبات توزیع‌شده برجسته می‌کند.

در [۲۴]، چارچوب زمان‌بندی وظایف جدیدی به نام MABLE[1] برای محاسبات ابری ارائه شده که وظایف را روی ماشین‌های مجازی زمان‌بندی می‌کند. این چارچوب شامل سه مرحله اصلی است: تطبیق برای شناسایی مناسب‌ترین ماشین‌ها، مرتب‌سازی برای اولویت‌بندی وظایف و زمان‌بندی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی عقاب طاس پیشرفته (EBEO)[2].

در [۲۵]، روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی ازدحام ذرات دودویی (IBPSO)[3] برای تخصیص منابع درخواست‌های اینترنت اشیا در محیط ترکیبی مه- ابر ارائه شده که هدف آن کاهش تأخیر درخواست‌ها و توازن بار بین گره‌های مه است. عملکرد این روش با الگوریتم‌های ژنتیک دودویی (BGA)[4]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات دودویی (BPSO)[5]، بهینه‌سازی گرگ خاکستری دودویی (BGWO)[6] و روش‌های تخصیص منابع مبتنی بر رتبه‌بندی از نظر تأخیر، درخواست‌های از دست رفته، زمان اجرا و توازن بار مقایسه شده است.

در [۲۶]، معماری جدیدی برای واگذاری وظایف و تخصیص منابع در اینترنت اشیا ارائه شده که از الگوریتم بهینه‌سازی پروانه- شعله (MFO)[7] همراه با یادگیری مبتنی بر تقابل (OBL)[8] و روش ذخیره‌سازی پشته‌ای برای توازن بار استفاده می‌کند. همچنین لایه دوم با بهره‌گیری از فناوری بلاکچین دقت داده‌های تراکنش را تضمین کرده و تخصیص منابع را بهینه می‌سازد.

در [۲۷]، روشی با نام LATOC ارائه شده که ابتدا معیارهای کلیدی وظایف ورودی مانند واحد پردازشی مورد نیاز، طول داده وظیفه و زمان اجرا را در نظر گرفته و سپس اولویت‌بندی وظایف را در صف‌های جداگانه با استفاده از تکنیک اولویت‌دهی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS)[9] و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)[10] در قالب یک الگوریتم هوشمند ترکیبی (AHP-TOPSIS) انجام داده است. وظایف مرتب‌شده در صف‌های اولویت‌دار بر اساس سطح اولویت قرار گرفتند و سپس برای تخصیص هر وظیفه از هر صف به ماشین‌های مجازی، از بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته استفاده شد.

روش‌های مختلف ارائه‌شده برای تخصیص منابع و زمان‌بندی وظایف در محیط‌های اینترنت اشیا، مه و ابر چالش‌های متعددی دارند. استفاده از الگوریتم‌های سلسله‌مراتبی و ترکیبی مثل AHP-TOPSIS یا MABLE برای بهبود اولویت‌بندی وظایف نیازمند پردازش پیچیده و منابع محاسباتی بالا هستند. روش‌هایی که بر کاهش مصرف انرژی و تأخیر تمرکز دارند، مانند IBPSO و OBLMFO، ممکن است توازن میان این اهداف و الزامات کیفیت خدمات را به‌سختی حفظ کنند. تکنیک‌های خوشه‌بندی و فراابتکاری مانند P-Min-Min-Max یا اصلاح‌شده‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات، هرچند کارایی را افزایش می‌دهند، اما به علت ماهیت پیچیده الگوریتم‌ها ممکن است در محیط‌های بزرگ‌مقیاس یا پویا بهینه عمل نکنند. رویکردهای مبتنی بر بلاکچین یا یادگیری عمیق مانند استفاده از شبکه‌های عصبی پیشرو یا فناوری بلاکچین، گرچه امنیت و دقت را تضمین می‌کنند، اما با چالش‌هایی مانند نیاز به توان محاسباتی

1. Matched Bald Eagle
2. Enhanced Bald Eagle Optimization
3. Improved Binary Particle Swarm Optimization
4. Binary Genetic Algorithm
5. Binary Particle Swarm Optimization
6. Binary Grey Wolf Optimization
7. Moth-Flame Optimization
8. Opposition-Based Learning
9. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
10. Analytic Hierarchy Process

بالا و افزایش تأخیر مواجهند. علاوه بر این، برخی روش‌ها در شبیه‌سازی و تست عملکرد، محدود به سناریوهای خاص هستند و ممکن است در شرایط واقعی با رفتارهای غیر قابل پیش‌بینی مواجه شوند.

با توجه به روش‌های پیشین می‌توان دید فاکتور مهلت اجرای وظایف به‌منظور مرتب‌سازی و در واقع اولویت‌بندی وظایف در کارهای متعددی استفاده شده است. در بیشتر روش‌ها این فاکتور به عنوان یک ویژگی ورودی برای یک روش آماری در نظر گرفته می‌شود که تأثیر متقابل آن بر روی سایر ویژگی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و اولویت‌بندی بر اساس تأثیر ویژگی‌ها بر روی هم انجام می‌شود. در نهایت وظایف بر اساس اولویت خود برای اجرا به ماشین‌های مجازی ارسال می‌شوند. این در حالی است که در روش پیشنهادی از فاکتور مهلت اجرای وظایف به همراه سایر ویژگی‌های مربوط به وظایف به عنوان ورودی یک روش طبقه‌بندی (درخت تصمیم) استفاده می‌شود که قابلیت دسته‌بندی و پیش‌بینی وظایف را با پیچیدگی به مراتب کمتری نسبت به روش‌های آماری انجام می‌دهد. از سوی دیگر در روش پیشنهادی، مهلت اجرای وظایف به عنوان یکی از پارامترهای ورودی تابع ارزیابی در رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌منظور تخصیص وظایف در نظر گرفته شده است. این موجب می‌شود مهلت اجرای وظایف در ماشین‌های مجازی نیز در نظر گرفته شود و وظایف با اولویت بالا به ماشین‌هایی که توانایی انجام این وظایف را در مهلت مقرر ندارند، ارسال نشود و قابلیت اطمینان روش زمان‌بندی را افزایش می‌دهد.

۳- روش پیشنهادی

رویکرد پیشنهادی این مقاله برای تخصیص منابع آگاه از مهلت و انرژی در محیط اینترنت اشیا- مه- ابر، با ترکیب رویکرد حریصانه چندمعیاره و درخت تصمیم ارائه شده است. در این روش، وظایف واردشده به سیستم اولویت‌بندی شده و به منابع مناسب در محیط مه تخصیص داده می‌شوند. در این رویکرد، مسئله اولویت‌بندی وظایف از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به تنوع نیازهای کاربران و وظایف مختلف واردشده به سیستم‌های اینترنت اشیا- مه- ابر، وظایف بحرانی با مهلت سخت باید در اولویت قرار گیرند تا نتایج به‌موقع به کاربران ارائه شوند؛ بنابراین تعیین اولویت وظایف می‌تواند ترتیب اجرای آنها را در منابع موجود در ابر مشخص کند. در این روش برای تخصیص منابع از درخت تصمیم استفاده شده و با در نظر گرفتن ویژگی‌های مختلف وظایف، تخصیص منابع بهینه‌سازی می‌شود.

درخت تصمیم به عنوان یکی از الگوریتم‌های محبوب و قدرتمند در حوزه یادگیری ماشین، ابزاری کارآمد برای حل مسائل اولویت‌بندی محسوب می‌شود. این روش با ساختاری سلسله‌مراتبی، وظایف را بر اساس مجموعه‌ای از شرایط مشخص طبقه‌بندی می‌کند. در حوزه رایانش مه و رایانش ابری به دلیل حجم بالای وظایف و تنوع در نیازهای پردازشی، وجود یک مکانیزم قابل اعتماد و سریع برای اولویت‌بندی وظایف ضروری است. درخت تصمیم با قابلیت تحلیل ویژگی‌های مختلف وظایف مانند مهلت اجرا، حجم داده‌ها، پیچیدگی محاسباتی، سرعت و فاصله از پردازشگر مه، ارتباطات وابسته میان وظایف، امکان تفکیک وظایف به دو دسته عادی و فوری را فراهم می‌کند. این تقسیم‌بندی به تخصیص بهینه منابع در محیط‌های ابری و کاهش تأخیر در اجرای وظایف، کمک شایانی می‌کند.

رایانش ابری به دلیل پویایی و تعدد وظایف، نیازمند یک رویکرد کارآمد و دقیق برای تعیین ترتیب اجرای وظایف است. درخت تصمیم با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی مانند مهلت تعیین‌شده، تعداد وظایف وابسته و میزان مصرف منابع، ترتیب اجرای وظایف را به طور دقیق مشخص می‌کند. این روش امکان اولویت‌بندی وظایف فوری را که تأخیر در اجرای آنها ممکن است به اختلال در کل فرایند منجر شود، فراهم می‌سازد. به عنوان مثال در محیطی که محدودیت زمانی برای انجام یک وظیفه وجود دارد، درخت تصمیم می‌تواند به صورت خودکار این وظایف را در اولویت قرار داده و منابع را به نحوی اختصاص دهد که زمان‌بندی بهینه حفظ شود.

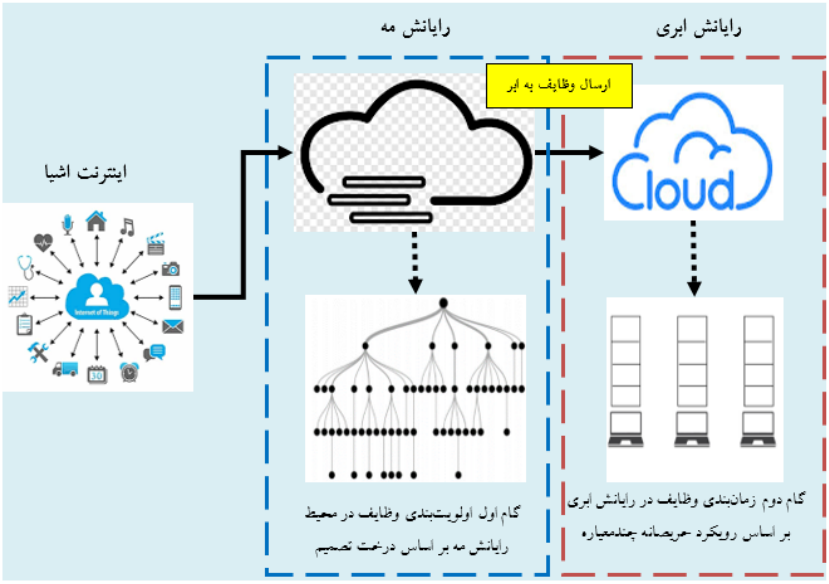
یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از درخت تصمیم در اولویت‌بندی وظایف، بهبود کارایی سیستم و استفاده بهینه از منابع است. این روش با تحلیل دقیق شرایط و ویژگی‌های هر وظیفه، تصمیماتی اتخاذ می‌کند که منجر به کاهش زمان انتظار و افزایش نرخ بهره‌وری منابع می‌شود. علاوه بر این، با تفکیک وظایف به دسته‌های فوری و عادی، منابع محدود در محیط ابر به وظایفی که اهمیت بیشتری دارند اختصاص می‌یابد؛ در حالی که وظایف عادی در صف‌های اولویت پایین‌تر قرار می‌گیرند. این امر نه‌تنها موجب کاهش بار اضافی بر روی سیستم می‌شود، بلکه به ارتقای کیفیت خدمات ارائه‌شده در محیط‌های ابری و مه نیز کمک می‌کند. درخت تصمیم به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری هوشمند، سازگاری بالایی با تغییرات پویای محیط دارد و از این رو در تخصیص منابع و مدیریت وظایف نقشی کلیدی ایفا می‌کند. همچنین رویکرد حریصانه چندمعیاره برای تخصیص منابع به‌کار گرفته شده است تا بهترین تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن معیارهای متعدد اتخاذ شود.

در روش پیشنهادی، ابتدا وظایف گره‌های تعبیه‌شده در اینترنت اشیا با استفاده از درخت تصمیم بر اساس اولویت‌های مرتبط، مرتب و برچسب‌گذاری می‌شوند. ورودی‌های درخت تصمیم شامل ویژگی‌های وظایف مانند زمان تخمینی اجرا، مهلت تعیین‌شده و تعداد وظایف وابسته در گردش کاری است و خروجی آن، کلاس اولویت وظایف را مشخص می‌کند. اولویت‌بندی وظایف با استفاده از معیارهای شباهت، شامل پارامترهای حساسیت اجرای وظایف، انجام می‌شود.

در این روش، وظایف محاسباتی سنگین به چندین زیروظیفه تقسیم می‌شوند و ارتباط میان این زیروظایف برای تکمیل وظیفه اصلی از اهمیت بالایی برخوردار است. وظایف به‌صورت جریان کاری وارد محیط مه شده تا ارتباط میان داده‌ها و وظایف حفظ شود. زیروظایف برای اجرا به داده‌ها و نتایج حاصل از اجرای زیروظایف پیشین خود در جریان کاری وابسته هستند. البته، تنها برخی از وظایف در جریان کاری به نتایج اجرای سایر وظایف وابسته‌اند. در این جریان کاری وظایف والد و فرزند نیز مشخص شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که وظایف فرزند تنها پس از اجرای موفقیت‌آمیز وظایف والد امکان اجرا دارند. بنابراین ارتباط میان وظایف در جریان کاری یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین اولویت هر وظیفه به شمار می‌رود.

مهلت اجرای وظایف، نقشی تعیین‌کننده در اولویت‌بندی آنها دارد. هر وظیفه بر اساس نوع داده و پردازش مربوطه، دارای مهلتی مشخص برای اجراست و عدم رعایت آن می‌تواند عملکرد کلی سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر این، زمان تخمینی اجرای هر وظیفه که از نسبت تعداد دستورالعمل‌های آن به قدرت پردازشی منبع در سیستم‌های توزیع‌شده به دست می‌آید، از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در اولویت‌بندی وظایف است. با در نظر گرفتن این سه پارامتر، وظایف به دو دسته عادی و فوری تقسیم‌بندی می‌شوند.

در این روش، فرایند اولویت‌بندی وظایف با تحلیل ویژگی‌های کلیدی هر وظیفه مانند زمان تخمینی اجرا، مهلت تعیین‌شده و تعداد وظایف



شکل ۱: معماری روش پیشنهادی.

وابسته در جریان کاری انجام می‌شود. زمان تخمینی اجرا نشان‌دهنده مدت‌زمان لازم برای تکمیل یک وظیفه است و وظایفی با زمان اجرای کوتاه‌تر معمولاً به دلیل تأثیر کم بر منابع، اولویت بیشتری دارند. مهلت تعیین‌شده نیز یکی از مهم‌ترین عوامل است، زیرا وظایفی که نزدیک به پایان مهلت خود هستند نیازمند توجه فوری هستند. تعداد وظایف وابسته در جریان کاری نشان‌دهنده اهمیت یک وظیفه در تکمیل سایر وظایف است، به طوری که وظایفی که سایر وظایف به آنها وابسته‌اند باید در اولویت قرار گیرند تا از تأخیر در جریان کلی کار جلوگیری شود.

برای اولویت‌بندی وظایف از الگوریتم درخت تصمیم استفاده می‌شود. این الگوریتم به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری، ویژگی‌های وظایف را ارزیابی کرده و آنها را به دو گروه تقسیم می‌کند: وظایف فوری (اولویت بالا) و وظایف عادی (اولویت پایین). وظایف فوری شامل آن دسته از وظایفی هستند که به دلیل محدودیت زمانی یا وابستگی‌های حیاتی، نیازمند اجرای سریع‌تر هستند و منابع سیستم باید ابتدا به این وظایف اختصاص یابد. در مقابل، وظایف عادی فاقد محدودیت‌های شدید زمانی یا وابستگی‌های مهم هستند و اجرای آنها می‌تواند به تعویق بیفتد تا منابع برای وظایف حساس‌تر آزاد بمانند. این روش باعث می‌شود که سیستم به شکلی بهینه‌تر از منابع خود استفاده کند و ضمن کاهش تأخیر در اجرای وظایف مهم، کارایی کلی فرایند زمان‌بندی را بهبود بخشد.

پس از اولویت‌بندی وظایف و دسته‌بندی آنها، وظایف برای اجرا به منابع ابری ارسال می‌شوند. در این مرحله از رویکرد حریصانه چندمعیاره برای زمان‌بندی و تخصیص منابع استفاده می‌شود. در این رویکرد، هر راه‌حل به‌عنوان یک زمان‌بندی برای تخصیص وظایف در نظر گرفته می‌شود و به‌صورت برداری به طول وظایف نمایش داده می‌شود که درایه‌های آن توسط یک زوج‌مرتب مقداردهی می‌شوند. هر عنصر این بردار، یک زوج‌مرتب است که اندیس آن نشان‌دهنده ترتیب اجرای وظایف و زوج‌مرتب درون درایه‌ها، نشان‌دهنده شماره وظیفه و شماره ماشین مجازی اختصاص‌یافته به آن است. در حالی‌که در روش‌های چندمعیاره‌ی معمول، مقداردهی اولیه به‌صورت تصادفی انجام می‌شود، اما در روش پیشنهادی، اولویت هر وظیفه تعیین‌کننده مقداردهی اولیه در رویکرد حریصانه است. این نوآوری می‌تواند کارایی روش پیشنهادی را در زمان‌بندی وظایف و تخصیص منابع بهبود بخشد.

در شکل ۱، معماری کلی روش پیشنهادی نشان داده شده است. در ادامه به تشریح جزئیات روش پیشنهادی خواهیم پرداخت.

۳-۱ مدل گردش کار ورودی

در مدل پیشنهادی برای سیستم‌های توزیع‌شده، جهت ساده‌سازی مدل زمان‌بندی، فرض شده که ارتباطات بین پردازنده‌ها در همه پیوندها با سرعت و پهنای باند یکسان انجام می‌شود. این فرض ساده‌سازی امکان محاسبه هزینه ارتباط بین دو زیروظیفه وابسته در نمودار گردش کار را بر اساس پهنای باند یکسان فراهم می‌کند. با این حال در واقعیت، پهنای باند بین پردازنده‌ها ممکن است متفاوت باشد و تأثیر قابل توجهی بر زمان اجرای وظایف داشته باشد. بنابراین اگر پهنای باند بین دو پردازنده مجازی متفاوت باشد، هزینه ارتباط باید بر اساس پهنای باند هر پردازنده محاسبه شود. در نظر گرفتن این موضوع می‌تواند دقت و کارایی مدل زمان‌بندی را در سیستم‌های توزیع‌شده افزایش دهد.

در سیستم‌های توزیع‌شده، وظایف ممکن است مستقل یا دارای وابستگی باشند و خروجی یک وظیفه به‌عنوان ورودی وظیفه دیگر مورد استفاده قرار گیرد. برای مدل‌سازی این وابستگی‌ها معمولاً از نمودار جهت‌دار غیرمدور (DAG)[1] به‌عنوان مدل گردش کار بهره گرفته می‌شود. می‌شود. در این مدل، هر وظیفه به‌عنوان یک گره در نمودار نمایش داده می‌شود و هر لبه بین دو گره، بیانگر وابستگی میان آنها است. به عبارت دیگر، اگر یک وظیفه برای اجرا به نتیجه وظیفه دیگری وابسته باشد، لبه‌ای از گره مربوط به وظیفه دوم به گره وظیفه اول متصل می‌شود. با استفاده از این مدل می‌توان به‌سادگی وابستگی‌های میان وظایف را بررسی کرد و زمان اجرای هر وظیفه را بر اساس وابستگی‌های آن تخمین زد. بنابراین استفاده از نمودار جهت‌دار غیرمدور به‌عنوان مدل گردش کار، ابزاری مؤثر برای زمان‌بندی وظایف در سیستم‌های توزیع‌شده محسوب می‌شود.

۳-۲ ایجاد راه‌حل‌های اولیه

در واقع، در روش کدگذاری پیشنهادی در رویکرد حریصانه چندمعیاره، هر راه‌حل به‌صورت یک بردار به طول تعداد وظایف در گردش کاری مورد نظر که با n نشان داده می‌شود، تعریف می‌شود. هر درایه از این بردار،

1. Directed Acyclic Graph

جدول ۱: نحوه کدگذاری راه‌حل‌های اولیه بر اساس اولویت وظایف.

G۱	G۲	G۳	G۴	G۵	G۶	...	GT
(۳/۵)	(۲/۴)	(۴/۱)	(۶/۳)	(۸/۶)	(۱/۵)	...	(۹/۲)

یک زوج‌مرتب به طول ۲ است که مقدار اول در زوج‌مرتب نشان‌دهنده اندیس وظیفه و مقدار دوم نشان‌دهنده شماره منبعی است که وظیفه مذکور را اجرا می‌کند. اندیس هر درایه در بردار نشان‌دهنده اولویت اجرای آن است. با توجه به اولویت‌بندی وظایف در مرحله قبلی، تعداد وظایف با اولویت بالا (k) و وظایف با اولویت پایین مشخص است. از این رو می‌توان در بردارهای راه‌حل، درایه‌های ۱ تا k را به وظایف با اولویت بالا و درایه‌های $k+1$ تا انتها را به وظایف با اولویت پایین اختصاص داد. حال در هر وظیفه نحوه تخصیص وظایف اولویت بالا و اولویت پایین به ماشین‌های مجازی در راستای بهبود اهداف کیفیت سرویس و افزایش قابلیت اطمینان توسط رویکرد چندمعیاره مشخص خواهد شد. به عبارت دیگر، بردار راه‌حل‌ها به صورت (۱) تعریف می‌شود

$$[(i_1, j_1), (i_2, j_2), \ldots, (i_n, j_n)] \quad (1)$$

در اینجا j_1 نشان‌دهنده شماره منبعی است که وظیفه با شماره i_1 را قبل از سایر وظایف اجرا می‌کند. اگر یک گردش کار شامل ۶ وظیفه (شماره‌های ۱ تا ۶) باشد و ۳ منبع برای اجرای این وظایف در دسترس باشد، مثلاً یکی از بردارهای راه‌حل ممکن به صورت زیر تعریف می‌شود

$$[(1,2),(2,1),(3,3),(4,2),(5,1),(6,3)]$$

در اینجا (۱,۲) نشان می‌دهد که وظیفه ۱ به‌عنوان وظیفه‌ای با اولویت بالاتری با استفاده از منبع ۲ اجرا می‌شود، (۲,۱) نشان می‌دهد که وظیفه ۲ وظیفه‌ای که اولویت بالایی دارد و بعد از وظیفه شماره ۱ با استفاده از منبع ۱ اجرا می‌شود و به همین ترتیب برای وظایف دیگر. به طور کلی، هر بردار راه‌حل به این‌صورت کدگذاری می‌شود تا بتوان با استفاده از این بردارها در جستجوی بهترین راه‌حل برای مسئله زمان‌بندی به روش حریصانه چندمعیاره پیش برویم. جدول ۱ نمایی از کدگذاری اولیه راه‌حل‌ها بر اساس وظایف در روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در روش پیشنهادی، نوع جدیدی از کدگذاری برای مسئله زمان‌بندی وظایف ارائه شده که علاوه بر تخصیص وظایف به منابع، اولویت آنها را نیز در نظر می‌گیرد. در این رویکرد، الگوریتم با دریافت یک مجموعه اولیه از وظایف به‌عنوان ورودی و تولید یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌ها آغاز به کار می‌کند. هر راه‌حل، یک گزینه ممکن برای مسئله زمان‌بندی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، یک راه‌حل به‌صورت برداری است که شامل اعدادی برای نمایش شماره وظایف، تخصیص احتمالی منابع به وظایف و یک زمان‌بندی بالقوه است.

در این نوع کدگذاری به‌دلیل بیشتربودن تعداد وظایف نسبت به ماشین‌های مجازی، وجود اعداد تکراری در درایه‌های بردار اجتناب‌ناپذیر است. به عبارت دیگر، در زوج‌های مرتب موجود در درایه‌های بردار، اعداد تکراری در مقدار دوم (شماره منبع) مشاهده می‌شود. مزیت این نوع کدگذاری در آن است که همه وظایف به‌صورت یکجا زمان‌بندی می‌شوند و احتمال وقوع گرسنگی از بین می‌رود. همچنین ترتیب اولویت وظایف در این روش لحاظ شده است، به طوری که درایه‌های ابتدایی بردار اولویت بیشتری نسبت به درایه‌های انتهایی دارند.

برای مقداردهی اولیه به راه‌حل‌ها از اولویت وظایف تعیین‌شده توسط درخت تصمیم استفاده می‌شود. در این فرایند، وظایف دسته فوری در ابتدایی‌ترین درایه‌ها و وظایف عادی در انتهایی‌ترین درایه‌های هر راه‌حل قرار می‌گیرند. ترتیب اجرای وظایف در دسته‌های مشابه می‌تواند موجب تنوع میان راه‌حل‌های موجود در جمعیت اولیه شود. در مرحله بعد، راه‌حل‌های ایجادشده بر اساس اهداف چندگانه و تابع تناسب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و راه‌حل بهینه از میان جمعیت انتخاب می‌شود.

۳-۳ تابع تناسب

در تابع تناسب پیشنهادی برای مسئله زمان‌بندی از یک تابع تناسب چندهدفه استفاده شده که اهدافی مانند زمان اتمام وظایف در منابع، هزینه اجرای وظایف، مصرف انرژی منابع، مهلت تعیین‌شده برای هر وظیفه و هزینه انتقال داده‌ها را شامل می‌شود. برای هر یک از این اهداف، یک تابع اختصاصی در تابع تناسب تجمیعی تعریف می‌گردد که مقادیر آن بر اساس عملکرد راه‌حل در دستیابی به آن هدف محاسبه می‌گردد. به‌عنوان مثال برای محاسبه هزینه اجرای وظایف در منابع، از یک تابع هزینه استفاده می‌شود که مقدار آن بر اساس هزینه اجرای وظایف و هزینه لازم برای انتقال داده‌ها بین ماشین‌های مجازی تعیین می‌گردد. به طور کلی برای محاسبه هر یک از اهداف، باید یک تابع اختصاصی برای آن هدف در تابع تناسب تجمیعی گنجانده شود. سپس با ترکیب مقادیر محاسبه‌شده برای هر یک از اهداف، مقدار نهایی تابع تناسب برای راه‌حل مورد نظر به دست می‌آید.

اولین و مهم‌ترین هدف در مسئله زمان‌بندی پیشنهادی، کاهش زمان اتمام وظایف[1] است. زمان اتمام وظایف، شامل زمان انتظار برای دسترسی به منبع[2]، زمان لازم برای اجرا[3]، زمان لازم برای برقراری ارتباط با سرور راه دور[4] و زمان لازم برای ارسال داده‌ها[5] است.

در مسئله زمان‌بندی پیشنهادی، اولین و مهم‌ترین هدف کاهش زمان اتمام وظایف است. زمان اتمام وظایف شامل چندین عامل است که باید در نظر گرفته شود. این عوامل عبارتند از

- مدت زمانی که یک وظیفه باید در انتظار آزاد شدن منبع بماند تا بتواند کار خود را آغاز کند، زمان انتظار برای دسترسی به منابع نامیده می‌شود.
- مدت زمانی که یک وظیفه برای کامل کردن اجرا نیاز دارد، به عنوان زمان لازم برای اجرا شناخته می‌شود.
- زمان لازم برای برقراری ارتباط با سرور راه دور: در مواردی که یک وظیفه نیاز به ارسال و دریافت اطلاعات از سرور راه دور دارد، زمان لازم برای برقراری ارتباط را مشخص می‌کند.
- زمان لازم برای ارسال داده‌ها: زمانی که یک وظیفه نیاز به ارسال داده به منبع دیگری دارد، زمان لازم برای ارسال داده را مشخص می‌کند.

بنابراین بر اساس (۲) داریم

$$T_{total}(i) = T_{exp} + T_{exe} + T_{comm} + T_{trans} \quad , \quad \forall i = 1,2,\ldots,Tasks \quad (2)$$

رابطه فوق برای هر وظیفه محاسبه می‌شود و مقدار آن به‌عنوان هدف اول از تابع تناسب چندهدفه پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. در تابع تناسب پیشنهادی، مصرف انرژی در محیط‌های داده‌ای و ابری به‌عنوان هدف

1. T_{total}
2. T_{exp}
3. T_{exe}
4. T_{comm}
5. T_{trans}

دوم در نظر گرفته شده است. برای محاسبه این هدف، کل انرژی مصرفی[1] در مرکز داده یا محیط محاسبات ابری شامل انرژی لازم برای اجرای وظیفه، انرژی لازم برای چرخه ماشین‌های مجازی بیکار و انرژی لازم برای انتقال اطلاعات محاسبه می‌شود. هر ماشین مجازی تنها می‌تواند در یکی از سه حالت مشغول[2]، بیکار[3] و یا در حال انتقال اطلاعات[4] باشد؛ بنابراین مصرف انرژی آنها بسته به حالتی که در آن قرار دارند متفاوت خواهد بود. هدف روش پیشنهادی به حداقل رساندن مصرف کل انرژی با تمرکز بر کاهش مصرف انرژی برای ماشین‌های بیکار بر اساس زمان‌بندی بهینه است. به عبارت دیگر با استفاده از تکنیک‌های مرتب‌سازی چندهدفه، توازنی میان اهداف مختلف برقرار شده و راه‌حلی بهینه برای زمان‌بندی وظایف با کمترین مصرف انرژی و کمترین میزان مصرف انرژی توسط ماشین‌های بیکار پیدا خواهد شد؛ بنابراین بر اساس (۳) داریم

$$E_{total}(i) = E_{exe} + E_{idle} + E_{trans} \ , \ \forall i = ۱,۲,\ldots,Tasks \qquad (۳)$$

رابطه فوق نیز برای هر راه‌حل محاسبه شده و مقدار آن به‌عنوان هدف دوم از تابع تناسب رویکرد حریصانه چندمعیاره پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. هدف سوم در تابع تناسب پیشنهادی، مهلت یا اولویت وظیفه است. اولویت یک وظیفه بر اساس تفاضل بین حداکثر مهلت تعیین‌شده[5] و حداقل زمان اتمام تخمینی است. حداقل زمان اتمام تخمینی یک وظیفه در یک منبع برابر با نسبت تعداد دستورالعمل‌های یک وظیفه[6] قدرت پردازشی ماشین مجازی[7] در زمان لازم برای اجرای وظیفه است.

در تابع تناسب پیشنهادی، هدف سوم مهلت یا اولویت[8] وظیفه است. اولویت یک وظیفه بر اساس تفاضل بین حداکثر مهلت تعیین‌شده و حداقل زمان اتمام تخمینی آن وظیفه تعیین می‌شود. حداقل زمان اتمام تخمینی یک وظیفه در یک منبع، برابر با نسبت تعداد دستورالعمل‌های یک وظیفه به قدرت پردازشی ماشین مجازی در زمان لازم برای اجرای وظیفه است. بنابراین با فرض اینکه تخمین زمان اجرای یک دستورالعمل در یک منبع مشخص باشد، می‌توان زمان اجرای کل وظیفه را تخمین زد. با توجه به اینکه مهلت انجام وظایف ممکن است در مراکز داده ابری مختلف متفاوت باشد، با محاسبه اولویت هر وظیفه بر اساس تفاضل بین حداکثر مهلت تعیین‌شده و حداقل زمان اتمام تخمینی آن، رویکرد حریصانه چندمعیاره پیشنهادی می‌تواند تلاش کند تا وظایف با اولویت بالاتر را در اولویت قرار دهد و به این ترتیب مهلت‌های تعیین‌شده برای آنها را رعایت کند. در نتیجه با توجه به اینکه وظایف با مهلت‌های کوتاه‌تر اولویت بالاتری دارند، رویکرد حریصانه چندمعیاره می‌تواند تلاش کند تا وظایف با مهلت‌های کوتاه‌تر را در اولویت قرار دهد و به این ترتیب مهلت‌های تعیین‌شده برای آنها را رعایت کند. بنابراین اولویت وظایف بر اساس (۴) تعیین می‌شود

$$P(i) = D_i - T_{exe} \times \frac{ins_i}{cap_M} \ , \ \forall i = ۱,۲,\ldots,Task \qquad (۴)$$

با توجه به اینکه اولویت هر یک از وظایف بر اساس تفاضل بین حداکثر مهلت تعیین‌شده و حداقل زمان اتمام تخمینی آن تعیین می‌شود، وظایفی که اولویت بیشتری دارند، باید در ابتدا زمان‌بندی شوند تا مهلت تعیین‌شده برای آنها منقضی نشود. با استفاده از رویکرد حریصانه چندمعیاره می‌توان به دنبال یافتن زمان‌بندی مناسبی برای وظایف با توجه به مهلت‌های تعیین‌شده و همچنین اولویت‌های آنها بر اساس تفاضل بین حداکثر مهلت تعیین‌شده و حداقل زمان اتمام تخمینی آنها بود. در این الگوریتم، مهلت‌های تعیین‌شده برای وظایف رعایت می‌شوند و همچنین با توجه به اولویت‌های وظایف، رویکرد حریصانه چندمعیاره سعی می‌کند وظایف با اولویت بالاتر را در اولویت قرار داده و آنها را در زمان‌بندی ابتدایی قرار دهد. بنابراین با اولویت‌دادن به وظایف با مهلت کوتاه‌تر و اولویت بالاتر، تلاش می‌شود تا زمان اتمام کل وظایف کاهش یابد و مهلت‌های تعیین‌شده برای آنها رعایت شود.

در تابع تناسب پیشنهادی، هدف چهارم هزینه اجرای وظایف است. هزینه اجرای وظایف شامل سه مؤلفه است:

۱) هزینه لازم برای اجرای یک وظیفه[9] که شامل هزینه مصرف منابع (مانند حافظه، پردازنده و غیره) برای اجرای وظیفه است.

۲) هزینه‌های لازم برای چرخه منابع بیکار[10] که شامل هزینه‌های ازدست‌رفته به دلیل بیکاری منابع در مراکز داده است. مثلاً اگر یک منبع در حالت بیکاری قرار گیرد، هزینه‌های ناشی از بیکاری آن منبع باید محاسبه شود.

۳) هزینه لازم برای انتقال اطلاعات[11] که شامل هزینه انتقال داده‌ها بین مراکز داده مختلف است. مثلاً اگر وظیفه‌ای باید از یک منبع به منبع دیگر منتقل شود، هزینه انتقال اطلاعات باید در محاسبه هزینه کل اجرای وظیفه در نظر گرفته شود.

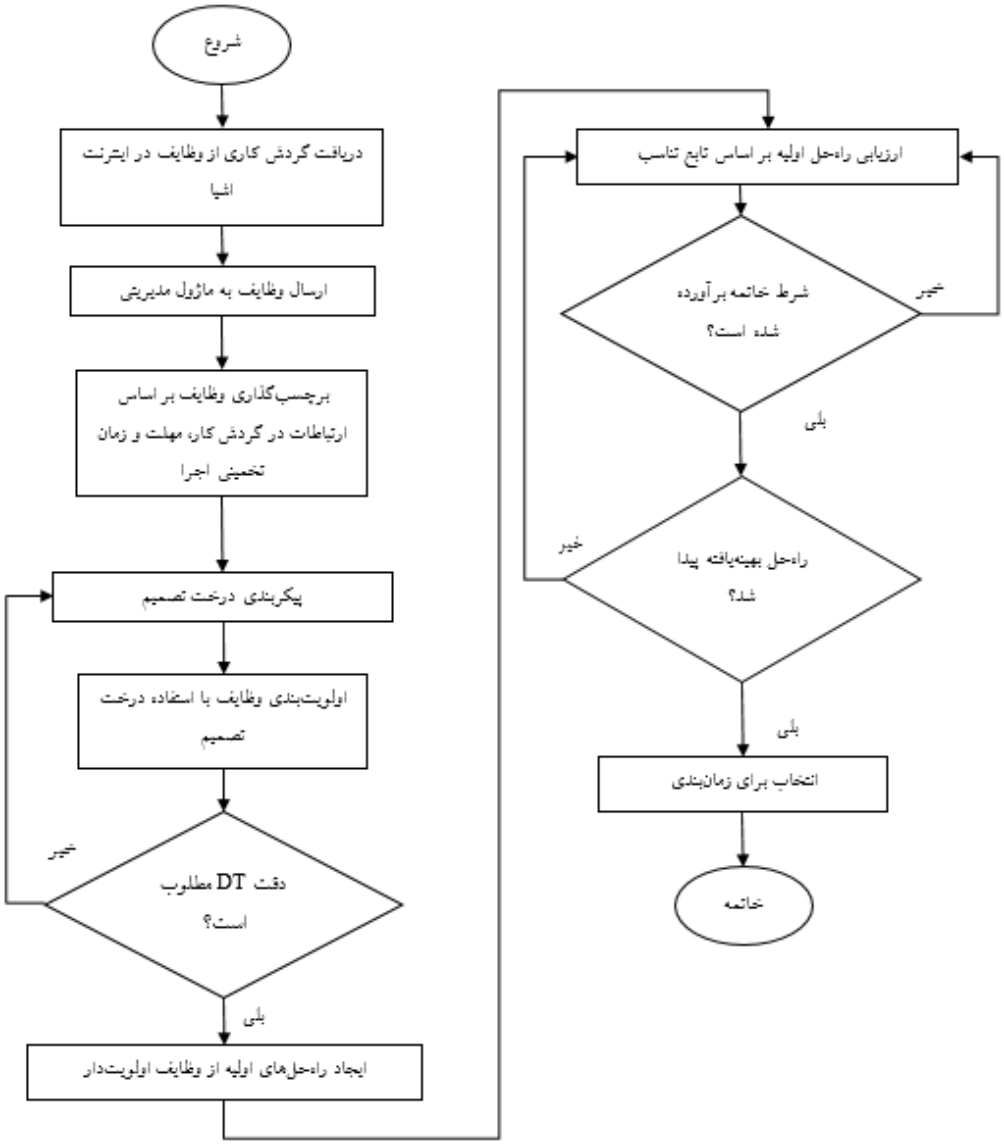
با توجه به اینکه هزینه لازم برای چرخه منابع بیکار با کاهش زمان بیکاری منابع کاهش می‌یابد، در نتیجه با زمان‌بندی نزدیک به بهینه، هزینه کل اجرای گردش کار در محیط ابر کاهش می‌یابد. بنابراین با استفاده از رویکرد حریصانه چندمعیاره می‌توان به دنبال یافتن زمان‌بندی مناسبی برای وظایف با توجه به هزینه‌های مختلف هر وظیفه بود. در این الگوریتم، سعی می‌شود با بهینه‌سازی هزینه‌های مختلف، زمان‌بندی مناسبی برای وظایف تعیین شود. بنابراین بر اساس (۵) داریم

$$C_{total}(i) = C_{exe} + C_{idle} + C_{trans} \ , \ \forall i = ۱,۲,\ldots,Task \qquad (۵)$$

با توجه به اهداف فوق، تابع تناسب تجمعی می‌بایستی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی در جستجوی راه‌حلی باشد که حداقل زمان اتمام وظایف، حداقل انرژی مصرفی و حداقل هزینه لازم برای اجرا را در قبال حداکثر اولویت‌بندی به دست آورد. بر این اساس تابع تناسب تجمعی پیشنهادی به صورت (۶) قابل تعریف است

$$\begin{aligned} F = \min\Big(&\sum_{i=۱}^{Tasks} Wt_i T_{total} + \sum_{i=۱}^{Tasks} We_i E_{total} + \\ &\sum_{i=۱}^{Tasks} Wc_i C_{total} - \sum_{i=۱}^{Tasks} Wp_i P\Big) \\ &\text{Subject to} \\ &\sum_{i=۱}^{Tasks} T_{total} \le T_{sequent} \ , \ \sum_{i=۱}^{Tasks} E_{total} \le E_{single} \ , \\ &\sum_{i=۱}^{Tasks} C_{total} \le C_{single} \ , \ \sum_{i=۱}^{Tasks} W_{t_i} + W_{e_i} + W_{c_i} + W_{p_i} = ۱ \ , \\ &D_i \ge T_{exe_i} \end{aligned} \qquad (۶)$$

1. E_{total}
2. E_{exe}
3. E_{idle}
4. E_{trans}
5. D_i
6. Ins_i
7. Cap_m
8. Priority
9. C_{exe}
10. C_{idle}
11. C_{trans}



شکل ۲: فلوچارت روش پیشنهادی.

در (۶) w_{t_i}، w_{e_i}، w_{c_i} و w_{p_i} به ترتیب نشان‌دهنده وزن تأثیر اهداف زمان، انرژی، هزینه و اولویت در مقدار تناسب برای هر یک از راه‌حل‌ها هستند. مجموع وزن‌ها همواره برای هر یک از راه‌حل‌ها باید برابر با ۱ باشد.

برای اعمال محدودیت‌های زمان اتمام، انرژی و هزینه اجرای کلی، می‌توان از محدودیت در رویکرد حریصانه چندمعیاره استفاده کرد. بر این اساس در هر مرحله از الگوریتم، راه‌حل جدیدی که به دنبال آن هستیم با بررسی تمامی محدودیت‌های مسأله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

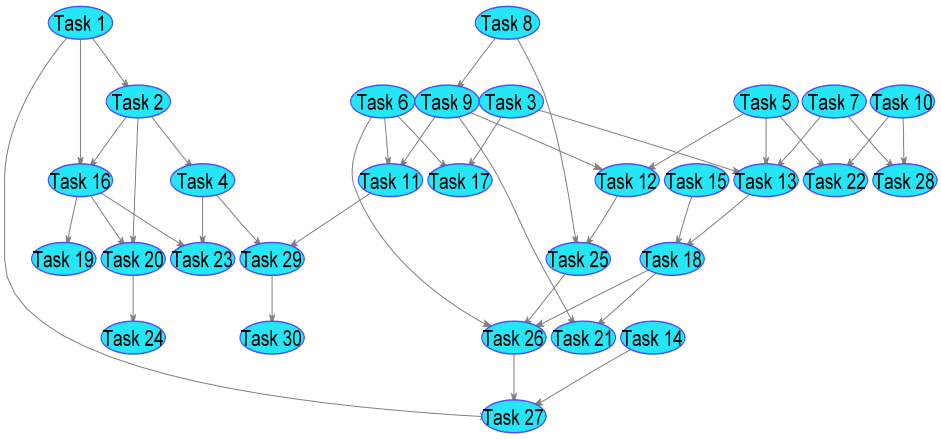
به عنوان مثال، اگر زمان اتمام یک وظیفه بیشتر از زمان اتمام گردش کار در یک منبع واحد باشد، آن وظیفه نمی‌تواند در آن منبع اجرا شود و باید به منبع دیگری انتقال داده شود. برای اعمال محدودیت‌های هزینه اجرای کلی و انرژی نیز مشابه عمل می‌شود. در روش پیشنهادی برای انتخاب بهترین راه‌حل از روش انتخاب بهترین حل با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر مفهوم پارتو[1] استفاده می‌شود. در این روش، حل‌هایی که در مجموع بهترین تعادل بین مقادیر مختلف تابع تناسب را دارند، به عنوان حل بهینه انتخاب می‌شوند. مثلاً راه‌حلی که زمان اتمام، انرژی و هزینه اجرای کلی کمتری نسبت به سایر راه‌حل‌ها دارد، به عنوان یکی از راه‌حل‌های بهتر انتخاب می‌شود. در شکل ۲ فلوچارت روش پیشنهادی نشان داده شده است.

1. Pareto

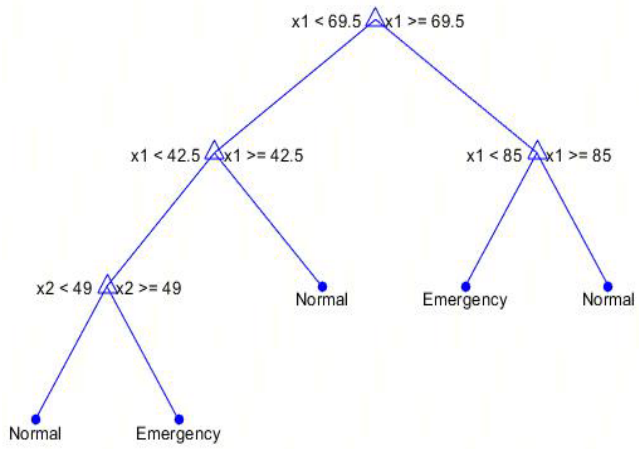
٤- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

٤-١ تعیین اولویت وظایف در جریان کاری

با توجه به این که بیشتر وظایف در محیط ابری به صورت قطعه‌قطعه از یک برنامه یکپارچه اجرا می‌شوند، برای اجرای روش پیشنهادی لازم است وظایف ارسالی به محیط ابری به صورت دسته‌های مرتبط با یکدیگر مدیریت شوند. یک گردش کار می‌تواند برخی وظایف را با یکدیگر مرتبط کرده و ترتیب و اولویت اجرای آنها را تعیین کند. همچنین باید به انتقال داده‌ها از یک وظیفه به وظیفه دیگر برای اجرای آنها توجه شود. ترتیب اجرای وظایف و تأخیر در اجرای آنها نیز باید مدیریت گردد. نتایج کارهایی که در یک گردش کار با هم ترکیب می‌شوند، برای دستیابی به یک هدف خاص استفاده می‌شوند. با این حال باید توجه داشت که تجمیع نتایج بستگی به رعایت اولویت‌های موجود در وظایف و ترتیب اجرای آنها دارد که نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایند اجرای کلی گردش کار ایفا می‌کند. طبق شکل ۳ می‌توان رابطه بین وظایف در یک گردش کار ارسال‌شده از پلتفرم ابری به محیط رایانش ابری را مشاهده کرد.



شکل ۳: نمونه‌ای از جریان کاری ارسالی به رایانش ابری.



شکل ۴: اولویت‌بندی وظایف بر اساس درخت تصمیم.

در شکل ۳، اگر به نمودار گردش کار توجه کنیم، بیش از ۵۰ وظیفه در گردش کار فعلی وجود دارد که هر کدام در واقع یک بخش اساسی و پیچیده از یک کار بزرگ‌تر را بر عهده دارند و با بیش از ۳۸ وظیفه دیگر در گردش کار مرتبط هستند. وظایف در نمودار گردش کار بر اساس ارتباط آنها به اولویت‌های مختلف تقسیم شده‌اند. با توجه به اینکه گردش کار در سناریوی پیشنهادی به‌صورت تصادفی تولید می‌شود، با هر بار اجرای روش پیشنهادی، اولویت وظایف تغییر می‌کند. طبق گراف گردش کار، حداکثر تعداد وظایف وابسته به هر وظیفه ۳ عدد است. همچنین برخی از کارها وظایف صفر دارند و وظایف مستقلی هستند که برای اجرای آنها نیاز به اطلاعات و داده‌های وظایف دیگر ندارند. اجرای این وظایف در هر زمان و در هر ماشین مجازی، به شرطی که مهلت تعیین‌شده برای آنها رعایت شود، مجاز است.

۴-۲ اولویت‌بندی وظایف بر اساس درخت تصمیم

همان طور که یادآوری شد، روش درخت تصمیم به‌عنوان یکی از پرطرفدارترین الگوریتم‌های یادگیری، مشکل اولویت‌بندی را در روش‌های پیشنهادی حل می‌کند. این روش با تلاش برای ارائه یک روش ساده و راحت برای قطعه‌بندی داده‌ها بر اساس مجموعه‌ای از شرایط در درخت، پیگیری می‌شود. ایده اصلی این روش، تعریف ریشه و فرزندان اولیه بر اساس یک شرایط خاص و تقسیم‌بندی درخت به شاخه‌ها بر اساس این شرایط است. این شرایط باید با دقت انتخاب شوند، چرا که شرایط مختلف نتایج متفاوتی را ایجاد می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بهترین انتخاب شرط بر اساس بررسی آنتروپی ویژگی‌ها به منظور یافتن اهمیت هر ویژگی برای اعمال شرط روی آن است.

جدول ۲: پیکربندی درخت تصمیم.

پارامتر	مقدار
تعداد ویژگی‌های ورودی	۳
شاخه‌ها	۲
تعداد کلاس‌ها	۲
حداکثر عمق درخت	۵
معیار تقسیم‌بندی	Information Gain
روش تقسیم	ویژگی بهترین تفکیک
حداقل تعداد تقسیم	۲
حداقل تعداد برگ	۱
حداکثر تعداد برگ	۲

در این مقاله در ابتدا با توجه به ارتباطات بین وظایف، تعداد وظایف وابسته به هر وظیفه مشخص شده و به‌عنوان ویژگی ورودی اول X_1 برچسب‌گذاری می‌شود. همچنین مهلت اجرای هر وظیفه و زمان تخمینی بر اساس تعداد دستورالعمل‌های هر وظیفه به عنوان ورودی دوم و سوم X_2 و X_3 برچسب‌گذاری می‌شوند. سپس با استفاده از روش طبقه‌بندی درخت تصمیم اقدام به طبقه‌بندی وظایف در دو کلاس وظایف فوری و وظایف عادی می‌نماید. پیکربندی درخت تصمیم مورد استفاده در روش پیشنهادی در جدول ۲ نشان داده شده است.

در هر سطح از درخت بر اساس ویژگی‌های ذکرشده از جمله مهلت اجرای وظایف، ارتباطات بر اساس گردش کاری و تعداد دستورالعمل‌های وظایف، شرایط تعیین می‌شود که به اولویت‌بندی وظایف منتهی می‌شود. در شکل ۴، درخت تصمیم نهایی برای تعیین اولویت وظایف آمده است. همان طور که در شکل نمایش داده شده است، وظایف در گردش کار بر اساس تعداد وظایف مرتبط، تعداد دستورالعمل‌ها و مهلت اجرا اولویت‌بندی می‌شوند. وظایفی که بر اساس ترکیب این سه معیار، بیشترین اولویت را دارند، به عنوان وظایف فوری مشخص می‌شوند. همچنین کارهایی که اولویت نسبتاً کمتری دارند در کلاس نرمال قرار می‌گیرند. جدول ۳ وظایف مربوط به هر دسته اولویت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۳ نمایش‌داده شده‌است، وظایف به کلاس‌های مختلف در درخت تصمیم تعلق می‌گیرند و اولویت‌بندی وظایف در هر درخت، براساس ویژگی‌های آنها تعیین‌می‌شود. در ادامه، به زمان‌بندی و اولویت‌بندی وظایف خواهیم پرداخت.

۴-۳ پیاده‌سازی رویکرد حریصانه چندمعیاره

پیاده‌سازی روش پیشنهادی در نرم‌افزار Matlab نسخه ۲۰۲۱ انجام

جدول ۳: تخصیص وظایف به کلاس‌ها.

وظیفه	کلاس	وظیفه	کلاس	وظیفه	کلاس	وظیفه	کلاس	وظیفه	کلاس
۱	Normal	۱۱	Emergency	۲۱	Normal	۳۱	Normal	۴۱	Normal
۲	Normal	۱۲	Normal	۲۲	Normal	۳۲	Normal	۴۲	Normal
۳	Normal	۱۳	Normal	۲۳	Normal	۳۳	Normal	۴۳	Normal
۴	Normal	۱۴	Normal	۲۴	Emergency	۳۴	Normal	۴۴	Normal
۵	Normal	۱۵	Normal	۲۵	Normal	۳۵	Normal	۴۵	Emergency
۶	Normal	۱۶	Emergency	۲۶	Normal	۳۶	Normal	۴۶	Normal
۷	Emergency	۱۷	Normal	۲۷	Normal	۳۷	Emergency	۴۷	Normal
۸	Normal	۱۸	Normal	۲۸	Normal	۳۸	Normal	۴۸	Normal
۹	Normal	۱۹	Emergency	۲۹	Normal	۳۹	Normal	۴۹	Normal
۱۰	Normal	۲۰	Normal	۳۰	Normal	۴۰	Normal	۵۰	Normal

جدول ۴: نمونه‌ای از راه‌حل‌های اولیه در رویکرد حریصانه چندمعیاره.

راه‌حل	درایه ۱	درایه ۲	درایه ۳	درایه ۴
P۱	(۳/۱۲)	(۲۰/۲)	(۸/۶)	(۳/۱)
P۲	(۸/۱۰)	(۳/۴)	(۲۰/۴)	(۲۰/۱۱)
P۳	(۷/۴)	(۸/۱۵)	(۳/۲)	(۷/۴)
P۴	(۲۰/۱۱)	(۷/۳)	(۷/۷)	(۸/۶)
P۵	(۲/۱)	(۱۰/۱۰)	(۱۱/۱۴)	(۱۲/۸)
P۶	(۱۱/۳)	(۵/۱۱)	(۳۰/۶)	(۲/۷)
P۷	(۵/۷)	(۱۱/۵)	(۱۰/۹)	(۳۰/۱۵)
P۸	(۱۲/۴)	(۳۰/۶)	(۲۶/۱)	(۱۰/۳)
P۹	(۱۰/۱۵)	(۲۶/۷)	(۱۲/۸)	(۱۱/۱۴)
P۱۰	(۳۰/۱۱)	(۲/۳)	(۵/۱۰)	(۲۶/۱۱)

شده است. با توجه به اولویت‌بندی وظایف در مرحله قبل، وظایفی که بر اساس استراتژی ارائه‌شده در فصل قبل به‌عنوان جمعیت اولیه ورودی به ماژول زمان‌بندی و رویکرد حریصانه چندمعیاره استفاده می‌شوند، انتخاب می‌شوند. در این استراتژی، هر راه‌حل به عنوان یک بردار در نظر گرفته شده که درایه‌های آن به صورت زوج‌مرتب هستند. عدد اول نشان‌دهنده وظیفه و عدد دوم نشان‌دهنده ماشین مجازی است که باید آن وظیفه را اجرا کند. همچنین اندیس درایه بردار به‌عنوان اولویت اجرا در نظر گرفته می‌شود و اولین درایه از هر بردار به‌عنوان اولین وظیفه‌ای است که به ماشین مجازی مورد نظر تخصیص می‌یابد. در نتیجه، اولویت وظایفی که در مرحله قبل بر اساس طبقه‌بندی به دست آمده بود، حفظ خواهد شد. در جدول ۴، نمونه‌ای از راه‌حل‌های اولیه مورد استفاده در روش پیشنهادی نشان داده شده است.

جدول ۴ موجب ایجاد راه‌حل‌های اولیه در رویکرد حریصانه چندمعیاره می‌شود. در این روش، راه‌حل‌های اولیه به صورت بردارهایی ارائه شده‌اند که طول هر بردار با تعداد وظایف موجود در گردش کار ورودی برابر است. همچنین مقادیر داخل هر یک از درایه‌های بردار نشان‌دهنده وظیفه‌ای است که به ماشین مجازی مورد نظر اختصاص یافته و اندیس هر درایه، حق تقدم اجرای آن را معین می‌کند.

پس از تنظیم جمعیت اولیه در رویکرد حریصانه چندمعیاره پیشنهادی، نوبت به ارزیابی جمعیت اولیه بر اساس تابع تناسب چندهدفه پیشنهادی می‌رسد. این تابع تناسب از همجوشی چهار پارامتر زمان اجرا، هزینه اجرا، انرژی مصرفی و اولویت وظایف تشکیل شده است. هر راه‌حل بر اساس این چهار هدف بررسی می‌شود و راه‌حلی که کمترین مقدار را برای تابع تناسب ارائه دهد، به‌عنوان راه‌حل بهینه در مخزن راه‌حل‌های غالب ذخیره می‌شود. راه‌حل‌های غالب ذخیره‌شده در مخزن رتبه‌بندی می‌شوند و در نهایت پس از ۱۰۰ مرتبه تکرار، بهترین راه‌حل یافته‌شده که توازنی بین اهداف چهارگانه در روش پیشنهادی برقرار کند، به‌عنوان راه‌حل نهایی انتخاب خواهد شد.

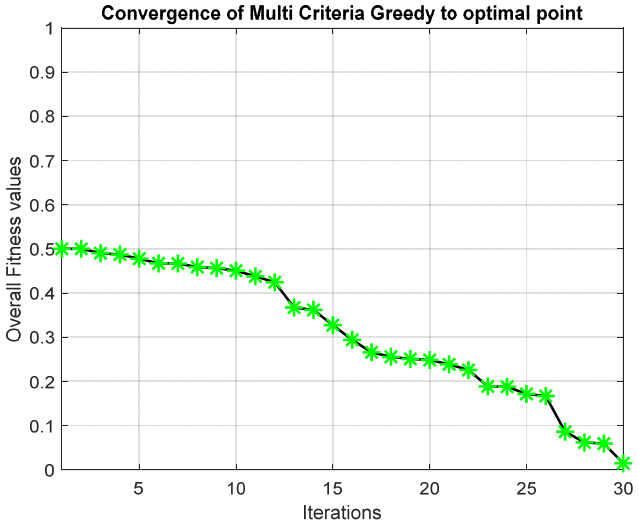
این روش به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه شناخته می‌شود که می‌تواند راه‌حل‌های بهینه را برای چهار هدف مختلف در زمینه محاسبات ابری به دست آورد. در این روش با افزایش تعداد تکرارها، مقادیر تابع تناسب راه‌حل‌ها به‌تدریج به سمت مقدار بهینه همگرا می‌شوند. این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تکرار، مقادیر تابع تناسب با توجه به ماهیت کمینه‌سازی آن، رفته‌رفته کمتر می‌شود و به سمت صفر متمایل می‌گردد؛ بنابراین روش پیشنهادی با استفاده از راه‌حل‌های بهینه به مرور زمان به سمت بهینه‌سازی تابع تناسب چندمعیاره حرکت می‌کند.

همچنین شکل ۵ همگرایی رویکرد حریصانه چندمعیاره را به سمت مقادیر بهینه نشان می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به مرور زمان به یافتن راه‌حل‌های بهینه نزدیک‌تر می‌شود و می‌تواند بهبود کیفیت نتایج را برای مسئله مورد نظر فراهم کند.

شکل ۵ نمودار همگرایی رویکرد حریصانه چندمعیاره را به سمت مقادیر بهینه برای مسئله مورد نظر نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر آن است که روش پیشنهادی با بهره‌گیری از رویکرد حریصانه چندمعیاره و فرایند بهینه‌سازی، به مرور زمان به راه‌حل‌های بهینه نزدیک‌تر می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش تعداد تکرارها، راه‌حل‌های بهبودیافته و بهینه‌تری به دست می‌آیند. با نتایج به‌دست‌آمده و نمودار همگرایی می‌توان نتیجه گرفت که این روش برای حل مسائل بهینه‌سازی چندمعیاره به دلیل گرایش به سمت راه‌حل‌های بهینه و بهره‌گیری از رویکرد حریصانه چندمعیاره، در بهبود کیفیت نتایج و همگرایی سریع به سمت راه‌حل‌های بهینه مؤثر است. در ادامه برای ارزیابی روش پیشنهادی می‌توان از معیارهای متعددی استفاده کرد.

٤-٤ ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی

در بخش قبلی ایده پیشنهادی برای اولویت‌بندی وظایف و زمان‌بندی آنها در بستر اینترنت اشیا- مه- ابر مطرح شد. این ایده شامل ترکیب درخت تصمیم به‌منظور اولویت‌بندی وظایف بر اساس ویژگی‌های مختلف و رویکرد حریصانه چندمعیاره برای زمان‌بندی وظایف است. این روش با توجه به درخت تصمیم، وظایف را بر اساس میزان اولویت و ویژگی‌های مختلف طبقه‌بندی می‌کند. سپس با استفاده از رویکرد حریصانه چندمعیاره،



شکل ۵: همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به سمت مقادیر بهینه.

وظایف به روشی زمان‌بندی می‌شوند که معیارهای مختلفی مانند زمان تکمیل، هزینه پردازش و انرژی مصرفی بهینه باشد. این روش می‌تواند بهینه‌کردن زمان‌بندی وظایف در بستر اینترنت اشیا- مه- ابر را در نظر بگیرد و بهبود کارایی و کاربردی‌بودن این بستر را بهبود بخشد. در زمینه زمان‌بندی وظایف در ابر و تخصیص منابع ابری به وظایف در بستر اینترنت اشیا- مه- ابر، معیارهای ارزیابی مختلفی برای ارزیابی دقت و کارایی روش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از معیارهای معمول در این زمینه عبارتند از:

۱) زمان تکمیل وظایف[1] که مدت زمان لازم برای تکمیل همه وظایف را در نظر می‌گیرد.

۲) هزینه لازم برای اجرای وظایف در منابع ابری که به میزان هزینه مورد نیاز برای پردازش وظایف در منابع ابری اشاره دارد.

۳) انرژی مورد نیاز برای پردازش وظایف که به میزان انرژی مورد نیاز برای اجرای وظایف در منابع ابری اشاره دارد.

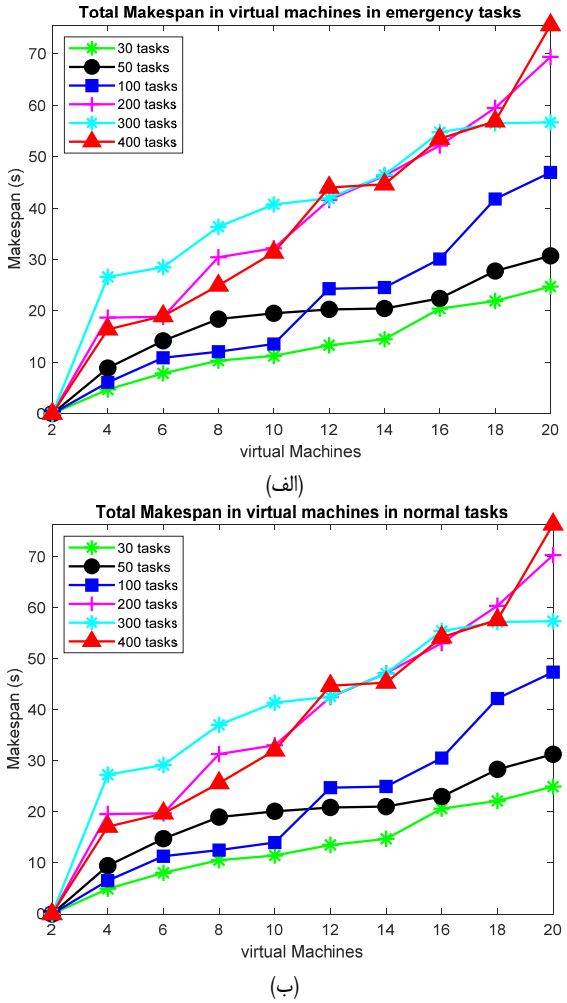
۴) قابلیت اطمینان در منابع ابری که به میزان قابلیت اطمینان و عدم اختلال در منابع ابری اشاره دارد.

برای ارزیابی روش پیشنهادی می‌توان از معیارهای ارزیابی فوق استفاده کرد و نتایج به‌دست‌آمده را با دیگر روش‌های پیشین مقایسه کرد. همچنین می‌توان با استفاده از معیارهای مختلف، پارامترهای مختلف روش پیشنهادی را بهینه کرد و بهبود کیفیت نتایج را ارتقا داد. در شکل ۶ برای سناریوهایی با تعداد وظایف متفاوت، نمودار زمان اتمام وظایف رسم شده است.

با توجه به شکل ۶ مشخص است که با افزایش تعداد وظایف، مقدار معیار زمان تکمیل وظایف نیز به صورت صعودی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش تعداد وظایف، زمان لازم برای پردازش و تکمیل آنها نیز افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش تعداد انتقال داده‌ها و زمان لازم برای اجرا وظایف است. با این حال در روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های اولویت‌دهی و رویکردهای حریصانه چندمعیاره، تلاش شده است که با بهینه‌کردن زمان‌بندی وظایف در محیط اینترنت اشیا- مه- ابر، زمان لازم برای پردازش و تکمیل آنها کاهش یابد.

همان طور که اشاره شد، معیار دیگری که در روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است، هزینه تکمیل وظایف در ماشین‌های مجازی

1. Makespan

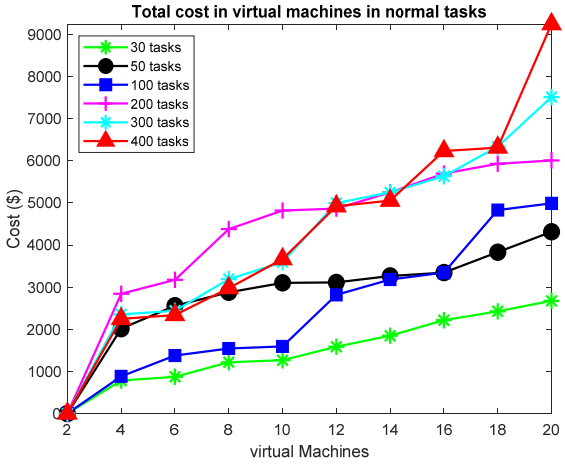


شکل ۶: نمودار زمان تکمیل وظایف در محیط ابر برای سناریوهای مختلف در وظایف نرمال و فوری.

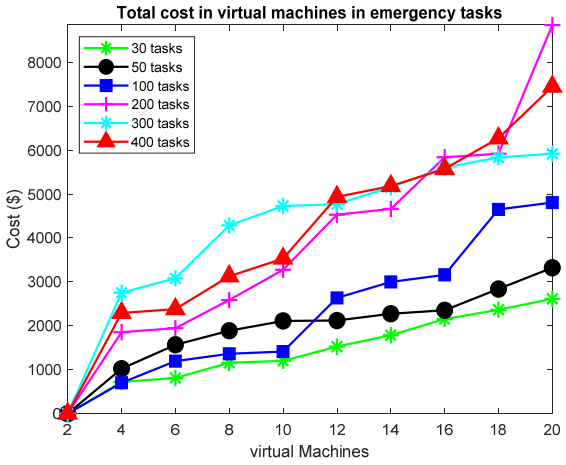
است. در شکل ۷ نمودار هزینه لازم برای تکمیل وظایف در ماشین‌های مجازی در سناریوهای مختلف نشان داده شده است.

با مراجعه به شکل ۷ می‌توان نتایج مربوط به هزینه تکمیل وظایف در محیط ابر را برای سناریوهایی با تعداد وظایف مختلف مشاهده کرد. همان طور که اشاره شد، با افزایش تعداد وظایف، هزینه لازم برای تکمیل آنها به مقدار زیادی افزایش نمی‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی با بهینه‌سازی زمان‌بندی وظایف در ماشین‌های مجازی با توجه به توان پردازشی هر ماشین، به‌خوبی محدودیت‌های مربوط به هزینه را برای وظایف در نظر گرفته است. به عبارت دیگر، روش پیشنهادی بهینه‌سازی‌شده برای زمان‌بندی وظایف در محیط ابر، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به هزینه سعی می‌کند هزینه اجرای وظایف را کاهش دهد. معیار دیگری که در روش پیشنهادی بر روی آن تمرکز شده است، انرژی لازم برای اجرای وظایف در ماشین‌های مجازی و مراکز داده ابری است.

در شکل ۸ می‌توان نتایج مربوط به انرژی لازم برای تکمیل وظایف در محیط ابر را برای سناریوهای مختلف مشاهده کرد. در این شکل، انرژی لازم برای تکمیل وظایف در محیط ابر در سناریوهایی با تعداد وظایف مختلف و تعداد ماشین‌های مجازی ثابت، نشان داده شده است. از دیگر نتایج مهمی که می‌توان از شکل ۸ برداشت کرد، این است که با افزایش تعداد وظایف، انرژی لازم برای تکمیل آنها به‌صورت نسبی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، روش پیشنهادی با بهینه‌سازی زمان‌بندی وظایف

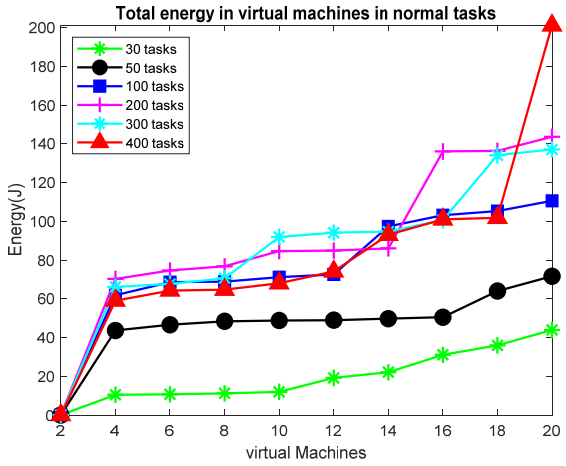


(ب)

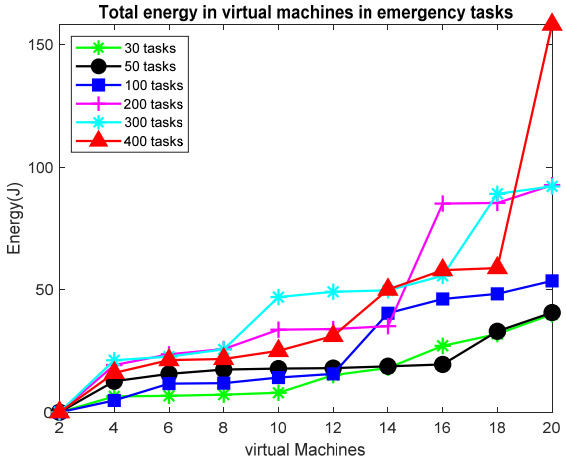


(الف)

شکل ۷: نمودار هزینه تکمیل وظایف در محیط ابر برای سناریوهای مختلف در وظایف نرمال و فوری.

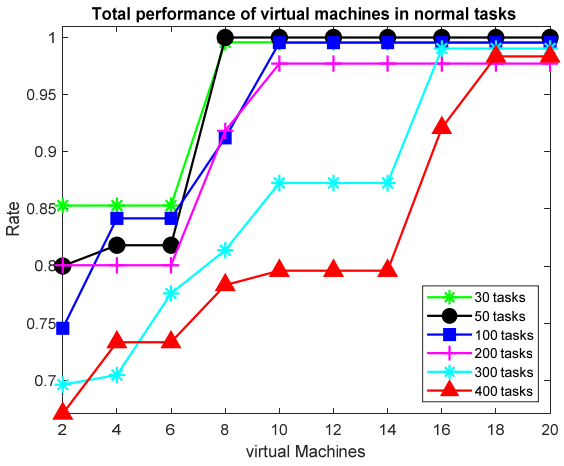


(ب)

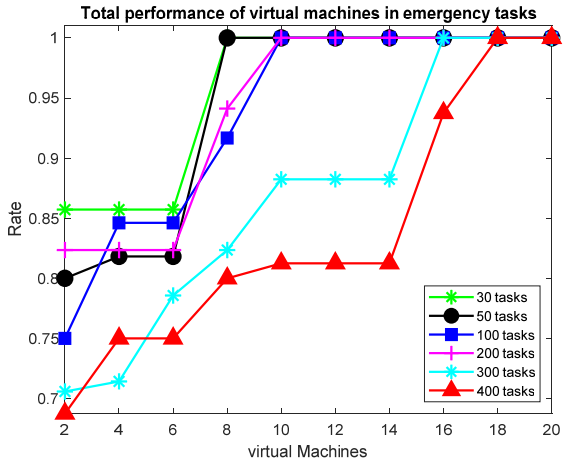


(الف)

شکل ۸: نمودار انرژی تکمیل وظایف در محیط ابر برای سناریوهای مختلف در وظایف نرمال و فوری.



(ب)



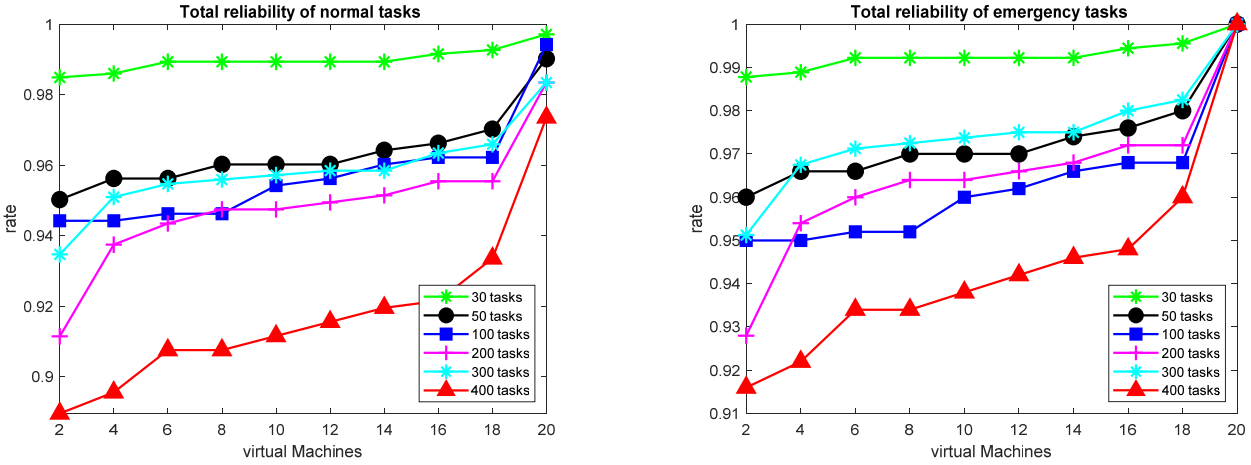
(الف)

شکل ۹: نمودار بازدهی ماشین‌های مجازی در محیط ابر برای سناریوهای مختلف در وظایف نرمال و فوری.

در ماشین‌های مجازی با توجه به توان پردازشی هر ماشین، به‌خوبی محدودیت‌های مربوط به انرژی را برای وظایف در نظر گرفته است. به عبارت دیگر با افزایش تعداد وظایف، روش پیشنهادی سعی می‌کند بهینه‌ترین زمان‌بندی را برای اجرای وظایف در نظر بگیرد و به این ترتیب، مقدار انرژی لازم برای تکمیل آنها به صورت معقولی افزایش می‌یابد. این نتایج نشان‌دهنده قدرت روش پیشنهادی در کاهش انرژی لازم برای پردازش وظایف در مراکز داده ابری است.

در روش پیشنهادی، بازدهی ماشین‌های مجازی نیز به‌عنوان یکی از معیارهای ارزیابی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۹، نمودار بازدهی ماشین‌های مجازی در روش پیشنهادی در سناریوهای با تعداد وظایف مختلف نشان داده شده است.

در شکل ۹، نمودار بازدهی ماشین‌های مجازی در روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف را می‌توان مشاهده کرد. همان طور که اشاره شد، بازدهی ماشین‌های مجازی نشان‌دهنده میزان استفاده از ماشین‌های



(الف) (ب)

شکل ۱۰: نمودار قابلیت اطمینان در محیط ابر برای سناریوهای مختلف در وظایف نرمال و فوری.

جدول ۵: میانگین مقادیر معیارهای ارزیابی.

Criteria	Status	۳۰ Tasks	۵۰ Tasks	۱۰۰ Tasks	۲۰۰ Tasks	۳۰۰ Tasks	۴۰۰ Tasks
Makespan (S)	Emergency	۱۲٫۹۷	۱۸٫۲۶	۲۰٫۰۲	۳۶٫۶۳	۳۶٫۹۱	۳۸٫۸۵
	Normal	۱۳٫۱۰	۱۸٫۷۲	۲۱٫۴۲	۳۷٫۲۷	۳۷٫۷۲	۳۹٫۴۷
Cost ($)	Emergency	۱۴۸۸٫۱	۲۱۴۱٫۳	۲۴۵۴٫۹	۴۱۲۸٫۷	۴۲۹۴٫۳	۴۲۹۸
	Normal	۱۴۳۴٫۱	۱۹۵۰٫۳	۲۱۹۳	۳۹۴۷	۴۲۱۳٫۳	۴۰۷۴٫۷
Energy (J)	Emergency	۱۶٫۰۵۷۶	۱۹٫۳۵۰۲	۲۴٫۶۷۳۷	۴۳٫۴۷۳۸	۴۴٫۰۴۵۶	۴۵٫۲۴۵۵
	Normal	۱۹٫۶۵۷۶	۴۷٫۲۵۰۲	۷۵٫۹۷۳۷	۸۲٫۷۴۵۶	۸۵٫۷۴۵۵	۸۹٫۳۷۳۸
Performance (rate)	Emergency	۹۵٫۷۱	۹۴٫۳۶	۹۳٫۵۹	۹۴٫۱۲	۸۶٫۷۶	۸۳٫۶۳
	Normal	۹۵٫۲۹	۹۳٫۳۸	۹۳٫۱۴	۹۱٫۳۸	۸۵٫۸۲	۸۱٫۹۶
Reliability (rate)	Emergency	۹۹٫۲۸	۹۷٫۳۲	۹۶٫۲۸	۹۶٫۴۸	۹۷٫۴۹	۹۴٫۴۰
	Normal	۹۸٫۹۹	۹۶٫۳۴	۹۵٫۷	۹۴٫۸۲	۹۵٫۸۳	۹۱٫۷۵

مجازی برای پردازش وظایف است. در شکل ۹، مقادیر مربوط به بازدهی ماشین‌های مجازی نزدیک به بهینه هستند و توزیع بار متعادل بین ماشین‌های مجازی را در محیط محاسبات ابری نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که برخی از ماشین‌های مجازی بازدهی تقریباً ۱۰۰٪ دارند و برخی دیگر به دلیل انتظار برای انتقال داده‌ها، اجرای وظایف یا سرویس‌های محوله، دارای راندمان کمتری هستند. این امر نشان می‌دهد که در برخی موارد، انتقال داده‌ها و اجرای وظایف بر روی ماشین‌های مجازی ممکن است زمان بیشتری صرف کند. در نتیجه، این شرایط می‌تواند منجر به کاهش بازدهی ماشین‌های مجازی شود. با این وجود، نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی بازدهی ماشین‌های مجازی نشان می‌دهند روش پیشنهادی به‌خوبی محدودیت‌های مربوط به مصرف انرژی و بهینه‌سازی استفاده از ماشین‌های مجازی را در نظر گرفته و باعث بهبود بازدهی ماشین‌های مجازی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می‌شود.

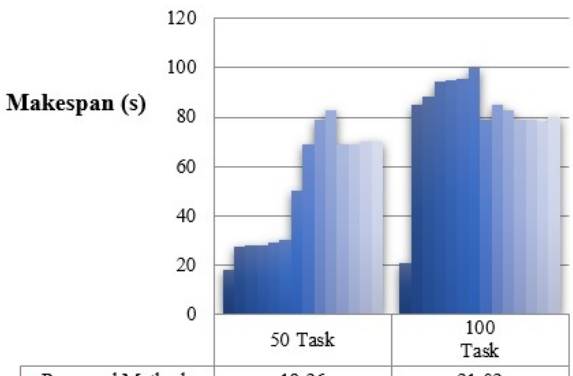
در روش پیشنهادی معیار دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است، قابلیت اطمینان است. در شکل ۱۰، نمودار قابلیت اطمینان روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. با مراجعه به شکل ۱۰، نمودار قابلیت اطمینان در روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف را می‌توان دید. همان طور که در نمودار مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی دارای قابلیت اطمینان بالایی است و در تمامی سناریوهای بررسی‌شده، توانسته مهلت اجرای وظایف را حفظ کند. این نشان می‌دهد که این روش با توجه به اولویت‌بندی وظایف و مهلت اجرای هر وظیفه می‌تواند با تأمین قابلیت اطمینان مناسب، بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود عملکرد در محاسبات ابری را فراهم کند.

نهایتاً در جدول ۵ میانگین مقادیر معیارهای ارزیابی شامل زمان اتمام وظایف، هزینه لازم برای اجرای وظایف، انرژی مصرف‌شده در مراکز داده ابری برای اتمام وظایف، بازدهی ماشین‌های مجازی در طول اجرای وظایف و قابلیت اطمینان ماشین‌های مجازی با توجه به مهلت ارائه‌شده برای هر وظیفه در ازای سناریوهای مختلف نمایش داده است.

با توجه به مقادیر میانگین معیارهای ارزیابی در جدول ۵ می‌توان به توانایی روش پیشنهادی در اولویت‌بندی وظایف بر اساس درخت تصمیم و زمان‌بندی بر اساس رویکرد حریصانه چندمعیاره پی برد. به طور کلی، روش پیشنهادی با استفاده از درخت تصمیم و رویکرد حریصانه چندمعیاره، قابلیت اولویت‌بندی وظایف را بر اساس مهلت اجرا و ویژگی‌های وظایف بهبود می‌بخشد. با این روش، وظایف با مهلت اجرای کمتر، بیشترین اولویت را برای اجرا پیدا می‌کنند تا زمان پاسخ آنها به حداقل برسد. همچنین در صورتی که دو وظیفه با مهلت و اولویت یکسان باشند، روش پیشنهادی با توجه به سایر ویژگی‌های وظایف مانند تعداد دستورالعمل‌ها، وظیفه‌ای را که با استفاده از کمترین منابع می‌تواند اجرا شود، به‌عنوان اولویت بیشتر انتخاب می‌کند. این امر منجر به بهبود کارایی و کاهش مصرف انرژی در محیط محاسبات ابری می‌شود.

۵-۴ مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های پیشین

در این بخش از مقاله برای اعتبارسنجی نتایج و اثبات بهبود عملکرد روش پیشنهادی، به مقایسه آن با روش‌های پیشین پرداخته خواهد شد. در



	50 Task	100 Task
Proposed Method	18.26	21.02
CR-PSO [23]	27.3	85
PSO-COGENT [23]	27.8	88.3
IPSO [23]	28.2	94.5
PSO [23]	29.3	95.1
CRO [23]	30	95.5
Ad-PSO [24]	50	100
Baseline [28]	69	79
MA [28]	79	85
BA [28]	83	83
LIP [28]	69	79
LIP-RS [28]	69	79
CIP [28]	70	78

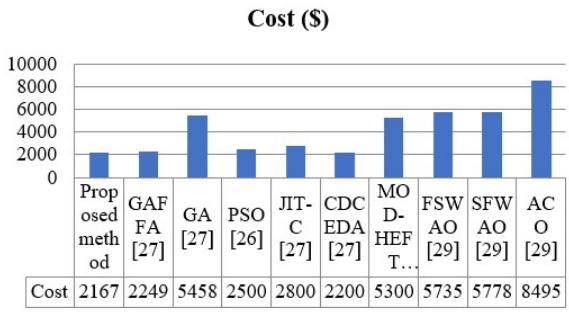
شکل ۱۱: مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های پیشین از نظر زمان اتمام وظایف.

مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های پیشین، معیار زمان تکمیل کار می‌تواند به‌عنوان یکی از معیارهای ارزیابی مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۱۱ روش پیشنهادی را با روش‌های پیشین [۲۳]، [۲۴] و [۲۸] از نظر زمان تکمیل وظایف در شرایط مساوی مقایسه می‌کنیم. با مراجعه به شکل ۱۱ می‌توان مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های پیشین را از نظر معیار زمان تکمیل وظایف انجام داد. با توجه به شکل مشخص است که روش پیشنهادی از نظر زمان تکمیل وظایف نسبت به روش‌های پیشین نتایج بهتری کسب کرده است.

با بهره‌گیری از معیار هزینه اجرای وظایف در منابع می‌توان روش‌های مختلف زمان‌بندی و تعیین پارامترهای کیفیت سرویس را با یکدیگر مقایسه کرد. در شکل ۱۲ مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های پیشین [۲۶]، [۲۷] و [۲۹] با استفاده از معیار هزینه اجرای وظایف در منابع نشان داده شده است. با توجه به شکل، روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین در کاهش هزینه اجرای وظایف در منابع بهبود داشته است. روش پیشنهادی با استفاده از رویکرد حریصانه چندمعیاره، به‌دلیل اینکه به چندین معیار هم‌زمان توجه می‌کند، عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های تک‌معیاره دارد. این روش با توجه به ویژگی‌های مختلف وظایف می‌تواند راه‌حل مناسبی را برای زمان‌بندی و اولویت‌بندی آنها پیدا کند و بهبود عملکرد کل سیستم را فراهم کند. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که روش پیشنهادی با استفاده از درخت تصمیم و رویکرد حریصانه چندمعیاره، توانایی بالایی در اولویت‌بندی وظایف و زمان‌بندی آنها در محیط محاسبات ابری دارد و می‌تواند بهبود عملکرد و کاهش مصرف انرژی در این محیط را فراهم کند.

۵- نتیجه‌گیری

در مقالات رایانش ابری، سرویس‌های ذخیره‌سازی و پردازش داده از طریق اینترنت به دستگاه‌های متصل ارائه می‌شوند. این فناوری به



شکل ۱۲: مقایسه هزینه اجرای وظایف در منابع در روش پیشنهادی با روش‌های پیشین.

دستگاه‌ها اجازه می‌دهد که داده‌های حس‌شده را به سرورهای ابری ارسال کنند و از ظرفیت بالای پردازش و ذخیره‌سازی این سرورها استفاده کنند. به این ترتیب، دستگاه‌های متصل به اینترنت در واقع به سرویس‌های رایانش ابری وابسته شده و امکان دسترسی به داده‌های خود را در هر زمان و مکانی دارند. از سوی دیگر همان طور که اشاره شد، حجم بالای داده‌های ارسالی و وظایف پردازشی به ابر موجب ایجاد فضای رقابتی شده که نیازمند مدیریت مؤثر و زمان‌بندی مناسب است. برای دستیابی به این هدف، استفاده از الگوریتم‌های مدیریت منابع مانند تخصیص منابع و دسترسی چندگانه، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین برای کاهش تأخیر و افزایش کارایی می‌توان از شبکه‌های مبتنی بر سرعت بالا و پردازش موازی بهره برد. از این رو در این مقاله، رویکرد تخصیص منابع با استفاده از زمان‌بندی در بستر اینترنت اشیا- مه- ابر بر اساس ترکیب درخت تصمیم در راستای اولویت‌بندی وظایف و رویکرد حریصانه چندمعیاره ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی با تأکید بر اولویت‌بندی وظایف و ایجاد توازن میان اهداف مختلف بر اساس رویکرد حریصانه چندمعیاره، از نظر معیارهای ارزیابی نزدیک به بهینه عمل کرده و در مقایسه با روش‌های پیشین بهبود یافته است.

مراجع

[1] E. S. Lee, J. H. Kim, and S. Y. Park, "Cloud-based Asthma monitoring system using IoT sensors," *Healthcare Technology Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 123-128, Apr. 2021.

[2] M. A. Akkaş, R. Sokullu, and H. E. Cetin, "Healthcare and patient monitoring using IoT," *Internet of Things*, vol. 11, Article ID: 100173, Sept. 2020.

[3] N. Hossein Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, and B Zakeri, "Internet of Things (IoT) and the energy sector," *Energies*, vol. 13, no. 2, Article ID: 494, Jan.-2 2020.

[4] M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, T. Umer, and Y.B. Zikria, "Role of IoT technology in agriculture: a systematic literature review," *Electronics*, vol. 9, no. 2, Article ID: 319, Feb. 2020.

[5] W. Almobaideen and M. Altarawneh, "Fog computing: survey on decoy information technology," *International J. of Security and Networks*, vol. 15, no. 2, pp. 111-121, 2020.

[6] G. Javadzadeh and A. M. Rahmani, "Fog computing applications in smart cities: a systematic survey," *Wireless Networks*, vol. 26, no. 2, pp. 1433-1457, Feb. 2020.

[7] P. Habibi, M. Farhoudi, S. Kazemian, S. Khorsandi, and A. Leon-Garcia, "Fog computing: a comprehensive architectural survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 69105-69133, 2020.

[8] M. Haghi Kashani, A. M. Rahmani, and N. Jafari Navimipour, "Quality of service-aware approaches in fog computing," *International J. of Communication Systems*, vol. 33, no. 8, Article ID: e4340, May 2020.

[9] J. Singh, P. Singh, and S. S. Gill, "Fog computing: a taxonomy, systematic review, current trends and research challenges," *J. of Parallel and Distributed Computing*, vol. 157, no. C, pp. 56-85, Nov. 2021.

[10] W. T. Vambe, C. Chang, and K. Sibanda, "A review of quality of service in fog computing for the internet of things," *International J. of Fog Computing*, vol. 3, no. 1, pp. 22-40, Jan. 2020.

[11] Y. Yang, "Multi-tier computing networks for intelligent IoT," *Nature Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 4-5, Jan. 2019.
[12] Z. Chang, Z. Zhou, T. Ristaniemi, and Z. Niu, "Energy efficient optimization for computation offloading in fog computing system," in *Proc. 2017 IEEE Global Communications Conf.*, 6 pp., Singapore, 4-8 Dec. 2017.
[13] H. Sun, H. Yu, G. Fan, and L. Chen, "Energy and time efficient task offloading and resource allocation on the generic IoT-fog-cloud architecture," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 13, pp. 548-563, 2020.
[14] R. K. Naha, S. Garg, A. H. Cheong Chan, and S. K. Battula, "Deadline-based dynamic resource allocation and provisioning algorithms in fog-cloud environment," *Future Generation Computer Systems*, vol. 104, pp. 131-141, Mar. 2020.
[15] S. Azizi, M. Shojafar, J. Abawajy, and R. Buyya, "Deadline-aware and energy-efficient IoT task scheduling in fog computing systems: a semi-greedy approach," *J. of Network and Computer Applications*, vol. 201, Article ID: 103333, May 2022.
[16] Z. Zhou, H. Xie, and F. Li, "A novel task scheduling algorithm integrated with priority and greedy strategy in cloud computing," *J. of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 37, no. 4, pp. 4647-4655, Oct. 2019.
[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, pp. 413-413, 15 Nov. 2021.
[18] M. Sriraghavendra, *et al.*, "DoSP: a deadline-aware dynamic service placement algorithm for workflow-oriented IoT applications in fog-cloud computing environments," *Energy Conservation Solutions for Fog-Edge Computing Paradigms*, vol. 54, no. 4, pp. 21-47, Apr. 2022.
[19] S. Singh, P. Singh, and S. Tanwar, "Energy aware resource allocationvia MS-SLnO in cloud data center," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, no. 29, pp. 45541-45563, May 2023.
[20] E. Al-Masri, *et al.*, "Energy-efficient cooperative resource allocation and task scheduling for Internet of Things environments," *Internet of Things*, vol. 23, Article ID: 100832, Oct. 2023.
[21] P. A. Malla and S. Sheikh, "Analysis of QoS aware energy-efficient resource provisioning techniques in cloud computing," *International J. of Communication Systems*, vol. 36, no. 1, Article ID: e5359, 2023.
[22] K. Ajmera and T. K. Tewari, "Energy-efficient virtual machine scheduling in IaaS cloud environment using energy-aware green-particle swarm optimization," *International J. of Information Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 1927-1935, 2023.
[23] R. Jeyaraj, *et al.*, "Resource management in cloud and cloud-influenced technologies for internet of things applications," *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 12, pp. 1-37, 2023.
[24] S. K. Chowdhary and A. L. N. Rao, "QoS and reliability aware matched bald eagle task scheduling framework based on IoT-cloud in educational applications," *Cluster Computing*, vol. 27, no. 6, pp. 8141-8158, 2024.
[25] M. Afzali, A. Mohammad Vali Samani, and H. R. Naji, "An efficient resource allocation of IoT requests in hybrid fog-cloud environment," *The J. of Supercomputing*, vol. 80, no. 4, pp. 4600-4624, 2024.
[26] M. Nematollahi, A. Ghaffari, and A. Mirzaei, "Task and resource allocation in the internet of things based on an improved version of the moth-flame optimization algorithm," *Cluster Computing*, vol. 27, no. 2, pp. 1775-1797, Apr. 2024.
[27] S. Rac and M. Brorsson, "Cost-aware service placement and scheduling in the edge-cloud continuum," *ACM Trans. on Architecture and Code Optimization*, vol. 21, no. 2, pp. 1-24, 2024.
[28] I. Kaur and P. Mann, "A hybrid cost-effective genetic and firefly algorithm for workflow scheduling in cloud," In: D. Gupta, *et al.,* (eds) *International Conference on Innovative Computing and Communications. Advances in Intelligent Systems and Computing,* vol. 1166, Springer, Singapore, pp. 33-45, 2021.
[29] M. Kumar, J. K. Samriya, K. Dubey, and S. S. Gill, "QoS-aware resource scheduling using whale optimization algorithm for microservice applications," *Software: Practice and Experience*, vol. 54, no. 4, pp. 546-565, 2024.

شیوا رزاق‌زاده تحصیلات خود را سال ۱۳۸۷ در مقطع کارشناسی کامپیوتر گرایش سخت‌افزار، از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل و در سال ۱۳۸۹ کارشناسی ارشد را با گرایش معماری کامپیوتر از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز به پایان رسانده است. وی سال ۱۳۹۶ مقطع دکتری را در دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات به اتمام رساند. ایشان اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: محاسبات نرم و کاربردهای آن، شبکه‌های کامپیوتری ، رایانش مه–ابر–اینترنت اشیا.

سارا حسین‌پور در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی مهندسی تکنولوژی نرم‌افزار کامپیوتر خود را از دانشگاه غیرانتفاعی سبلان و در سال ۱۴۰۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل دریافت نمود. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند رایانش ابری، هوش مصنوعی و رباتیک می‌باشد.