

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶

نوع مقاله: پژوهشی

مدیریت منابع با بارسپاری جزئی آگاه از روابط اجتماعی در رایانش لبه‌ای سیار توسعه‌یافته با ارتباطات دستگاه به دستگاه

محدثه پاک‌نیا*

دانشگاه تبریز، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، گروه علوم کامپیوتر
پست الکترونیکی: m.pakneia98@ms.tabrizu.ac.ir

جواد حاجی‌پور

استادیار گروه علوم کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
پست الکترونیکی: hajipour@tabrizu.ac.ir

شهریار لطفی

استاد گروه علوم کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
پست الکترونیکی: shahriar_lotfi@tabrizu.ac.ir

چکیده

شبکه اقدام به تخصیص منابع ارتباطی و پردازشی شبکه برای اجرای وظایف کاربران می‌کند. این راهکار با بهره‌گیری از پردازش موازی در سه منبع پردازشی مختلف، ایجاد شانس چندباره برای پردازش وظایف و تخصیص کارآمد منابع شبکه، ظرفیت سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین در روش ارائه‌شده روابط اجتماعی بین کاربران به عنوان بستری برای ایجاد انگیزه همکاری برای کمک‌رسانی به یکدیگر در نظر گرفته شده است. بررسی نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که راهکار پیشنهادی قادر است تعداد وظایف تکمیل شده را تا حدود ۲۳ درصد نسبت به راهکار مرجع افزایش دهد. همچنین راهکار پیشنهادی برای وظایف بیدرنگ، کارایی بهتری نسبت به دو راهکار مرجع از خود نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رایانش لبه‌ای سیار، ارتباطات دستگاه به دستگاه، وظایف محاسباتی، مهلت زمانی اجرای وظایف، بارسپاری وظایف محاسباتی

در سال‌های اخیر، ترکیب رایانش لبه‌ای سیار با ارتباطات دستگاه به دستگاه، به عنوان رویکردی مناسب برای پاسخ به درخواست‌های برنامه‌های کاربردی که نیازمند مقدار زیاد پردازش در مدت کم هستند، توجه زیادی به خود جلب کرده است. این فناوری‌ها امکان بارسپاری وظایف محاسباتی دستگاه‌های کاربر را به منابع محاسباتی موجود در لبه شبکه فراهم می‌کند. اگرچه کارهای زیادی در این باره صورت گرفته اما همچنان پاسخ‌دهی به درخواست‌های برنامه‌های بیدرنگ نیاز به بهبود دارد. در این مقاله یک راهکار جدید و ابتکاری برای تصمیم‌گیری درباره نحوه پردازش و بارسپاری وظایف دستگاه‌ها و مدیریت منابع محاسباتی و ارتباطی شبکه با هدف افزایش تعداد وظایف تکمیل‌شده ارائه شده است. راهکار پیشنهادی با در نظر گرفتن پویایی و مهلت اجرای وظایف، محدودیت منابع محاسباتی و انرژی دستگاه‌های کاربر و محدودیت منابع محاسباتی و ارتباطی

۱- مقدمه

با پیشرفت فناوری، دستگاه‌های بی‌سیم، مانند حسگرهای اینترنت اشیا^۱ و گوشی‌های تلفن همراه، در زمینه‌های مختلف و محیط‌های متنوع مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد و استفاده از این دستگاه‌ها محدود به تماس، جمع‌آوری و ارسال داده نیست؛ این دستگاه‌ها دارای برنامه‌های کاربردی نظیر پردازش تصویر^۲، پردازش زبان طبیعی^۳، بازی‌های برخط^۴ و غیره نیز هستند که نیازمند منابع محاسباتی قدرتمندی هستند ولی خود دستگاه‌ها لزوماً دارای این توانایی نیستند. بنابراین یکی از راه‌حل‌های ارائه شده برای این مسئله، بارگیری^۵ محاسبات به مراکز محاسبات ابری^۶ است. در این روش وظایف محاسباتی^۷ دستگاه‌ها جهت پردازش به سرویس‌دهنده‌های ابری ارسال می‌شوند و پس از پردازش داده‌های محاسباتی در سمت ابر، نتایج به دستگاه‌ها بازگردانده می‌شوند [۱]. با این حال ممکن است برنامه‌های کاربردی دارای محدودیت زمانی، قادر به تحمل تاخیر^۸ ناشی از فاصله طولانی بین سرویس‌دهنده ابر مرکزی و دستگاه‌های مبدأ نباشند.

رایانش لبه‌ای سیار^۹ در سال‌های اخیر به عنوان راهکاری مفید پیشنهاد شده است که خدمات رایانش در ابر را در لبه شبکه‌های بی‌سیم و نزدیک به کاربران فراهم می‌کند، به طوری که کاربران محدود به منابع محاسباتی و انرژی می‌توانند وظایف خود را برای پردازش به سرویس‌دهنده‌های رایانش لبه‌ای سیار ارسال و پس از پردازش، نتایج را دریافت کنند [۲]. اما با توجه به افزایش سریع تعداد کاربران و برنامه‌های کاربردی، سرویس‌دهنده‌های رایانش لبه‌ای سیار برای ارائه خدمات رضایت‌بخش به کاربران تحت فشار قرار می‌گیرند.

این مسئله باعث توجه به استفاده از منابع محاسباتی

بیکار لبه شبکه و فناوری ارتباطات دستگاه به دستگاه^{۱۰} شده است. ارتباطات دستگاه به دستگاه امکان ارتباط دو دستگاه نزدیک به هم را بدون واسطه ایستگاه پایه^{۱۱} فراهم می‌کند [۳]. کاربران با استفاده از ارتباطات دستگاه به دستگاه می‌توانند از منابع محاسباتی بیکار دستگاه‌های نزدیک به خود بدون واسطه ایستگاه پایه استفاده کنند.

در سال‌های اخیر کارهای زیادی در این زمینه صورت گرفته است که با توجه به اهداف مطرح شده در مقاله‌ها به چهار دسته مهم قابل تقسیم‌بندی هستند. دسته اول راهکارهایی هستند که هدف اصلی آن‌ها کاهش تاخیر است، در این پژوهش‌ها مسئله برنامه‌ریزی با هدف کاهش تاخیر اجرای وظایف کاربران مدل‌سازی شده است و محدودیت‌های مسئله شامل محدودیت انرژی دستگاه‌های کاربر و محدودیت منابع ارتباطی و محاسباتی شبکه می‌شود [۴-۸]. دسته دوم دارای هدف کاهش مصرف انرژی دستگاه‌های کاربر و در عین حال توجه به محدودیت زمان پاسخ‌گویی به وظایف دستگاه‌ها و محدودیت منابع ارتباطی و محاسباتی شبکه است [۹-۱۲]. دسته سوم از راهکارها دارای هدف کاهش هم‌زمان مصرف انرژی دستگاه‌های کاربر و تاخیر اجرای وظایف هستند؛ این پژوهش‌ها همواره سعی می‌کنند تعادلی مابین کاهش تاخیر و کاهش مصرف انرژی دستگاه‌ها برقرار کنند و یکی را قربانی دیگری نکنند و در عین حال محدودیت‌های مربوط به منابع ارتباطی و محاسباتی شبکه را در نظر داشته باشند [۱۳-۱۷]. در نهایت دسته چهارم راهکارهایی با هدف افزایش ظرفیت سیستم و سود کاربران هستند؛ منظور از افزایش ظرفیت سیستم، پیشینه‌سازی تعداد دستگاه‌های پشتیبانی شده توسط سیستم و وظایف تکمیل شده تحت محدودیت‌های انرژی دستگاه‌ها و مدت زمان پاسخ‌گویی است [۱۸-۲۲]. از بررسی و مقایسه این راهکارها پیدا است که بیشتر پژوهش‌ها نواقص و فرض‌های غیرواقعی در ارائه الگوریتم خود دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- 1-Internet of Things
- 2-Image processing
- 3-Natural language processing
- 4-Online games
- 5-Offloading
- 6-Cloud computing centers
- 7-Computational tasks
- 8-Delay
- 9-Mobile Edge Computing (MEC)

10-Device to Device communication (D2D)

11-Base station

لذا دستگاه‌های کاربر در صف خود چندین وظیفه داشته و قادر به پردازش آن‌ها نباشند؛ در نتیجه مایل به بارسپاری وظایف محاسباتی خود به سایر منابع پردازشی از جمله منابع بیکار دستگاه‌های اطراف و سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار خواهند بود. مسئله مورد مطالعه در این مقاله، تصمیم‌گیری درباره نحوه پردازش، بارسپاری وظایف کاربران و تعیین اندازه داده برای پردازش در هر یک از منابع پردازشی با هدف افزایش تعداد وظایف تکمیل‌شده کاربران است به طوری که پویایی ایجاد وظایف در صف، مهلت اجرای وظایف، محدودیت منابع محاسباتی و انرژی دستگاه‌ها، محدودیت منابع ارتباطی و محاسباتی شبکه و محدودیت تمایل همکاری و کمک کردن کاربران در نظر گرفته شود. برای دستیابی به هدف ذکر شده، راهکار ابتکاری جدیدی با نام روش بارسپاری جزئی آگاه از روابط اجتماعی^{۱۴} ارائه شده است که محدودیت‌های ذکر شده را در نظر می‌گیرد و از روابط اجتماعی کاربران به عنوان بستری برای ایجاد انگیزه همکاری در دستگاه‌ها برای کمک‌رسانی به سایر کاربران استفاده می‌کند. این راهکار، اندازه داده‌های محاسباتی برای پردازش موازی در هر یک از منابع پردازشی محلی، کاربران کمک‌کننده سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار را به صورت مناسبی تعیین کرده و پس از تصمیم‌گیری در این مورد، منابع ارتباطی و پردازشی سیستم را تخصیص می‌دهد که مانع هدر رفت آن‌ها و افزایش ظرفیت منابع اختصاصی به کاربران می‌شود. علاوه بر این، در صورت عدم امکان پردازش وظیفه یک کاربر در بازه زمانی مورد بررسی، دوباره شانس پردازش را برای آن در بازه‌های بعدی لحاظ می‌کند. این نحوه تصمیم‌گیری‌ها، ظرفیت سیستم را بهبود می‌دهد؛ از جمله، در شرایطی که دستگاه‌ها به خاطر استفاده از روش‌های برداشت انرژی محدودیت باتری ندارند در شبکه‌ای ۲۵ کاربری با وظایف دارای مهلت ۷ بازه زمانی، تا ۲۳ درصد افزایش در تعداد وظایف تکمیل‌شده نسبت به راهکار مرجع به وجود می‌آید. همچنین

اکثر کارهای پیشین، الگوریتم‌های پیشنهادی خود را برای حالت یک کاربر دارای چندین وظیفه و یا چندین کاربر دارای یک وظیفه ارائه داده بودند. اگرچه تصمیم‌گیری برای بارسپاری وظایف در این حالت ساده است اما به دور از واقعیت است. لذا نیاز است راهکاری برای حالت چندین کاربر با چندین وظیفه ارائه شود [۴-۲۲، ۲۰].

برخی از کارهای پیشین از مزیت اجرای موازی^{۱۲} استفاده نکرده بودند؛ برخی دیگر تنها از اجرای موازی با دو منبع پردازشی مختلف، یعنی اجرای محلی^{۱۳} و اجرا در دستگاه کاربر کمک‌کننده و یا اجرای محلی و اجرا در سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار استفاده کرده بودند. درحالی‌که بهره‌گیری از پردازش موازی در سه منبع پردازشی مختلف می‌تواند باعث کاهش مدت زمان اجرای وظایف شود [۴-۸]، [۴، ۵]، [۱۴-۱۷]، [۱۹، ۲۱].

یکی از فرضیات غیرمعقول کارهای پیشین، در نظر گرفتن تمایل همکاری صددرصدی کاربران دارای پردازنده بیکار برای کمک‌رسانی به کاربران نیازمند به بارسپاری بود. اما در واقع با توجه به خودخواهی کاربران و همچنین مسائل امنیتی هیچ کاربری تمایل به همکاری بدون انگیزه ندارد؛ لذا نیاز است با بهره‌گیری از روابط بین کاربران بستری برای ایجاد انگیزه همکاری در کاربران ایجاد شود [۵-۸]، [۹-۱۲]، [۱۳-۱۶]، [۱۸، ۲۰-۲۲].

تخصیص منابع محاسباتی و ارتباطی پیش از تصمیم‌گیری درباره نحوه پردازش و بارسپاری وظایف از دیگر معایب کارهای پیشین بوده است؛ لذا نیاز است برای پیش‌گیری از هدر رفت منابع، راهکاری مناسب برای تخصیص منابع شبکه ارائه شود [۶].

از این رو، این مقاله قصد دارد با رفع معایب ذکر شده در بالا و افزودن مزایای جدید، راهکاری کارآتر در این زمینه ارائه کند. به طور معمول برنامه‌های کاربردی مورد استفاده کاربران لبه شبکه ممکن است به صورت متناوب و پویا وظیفه‌ای برای پردازش تولید کنند [۲۳] و

12- Parallel processing

13- Local computing

14-Social-Relationships-Aware Partial Offloading Method (SRAPOM)

بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر از جمله معایب این مقاله است. مولین لی و همکارانش در [۵]، وظایف کاربران را غیرقابل بخش بندی در نظر گرفته اند که می توانند یا به صورت محلی و یا در سرویس دهنده رایانش لبه ای پردازش شوند. با در نظر گرفتن امکان برداشت انرژی، یک مسئله بهینه سازی با هدف کمینه سازی تاخیر فرمول بندی شده است که برای حل آن یک راهبرد تصمیم گیری مارکوف ارائه گردیده است. بی توجهی به پردازش موازی، در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و استفاده نکردن از منابع کاربران کمک کننده از کاستی های این مقاله است. امبر سلیم و همکارانش در [۶]، با در نظر گرفتن بارسپاری جزئی و بهره گیری از طیف فرکانسی مشترک، به کاربران اجازه می دهند که وظایف خود را به دو بخش تقسیم کنند، یک بخش برای اجرای موازی در پردازنده محلی و دیگری در سرویس دهنده رایانش لبه ای یا دستگاه کاربر نزدیک به خود. هدف این پژوهش بهینه سازی کاهش تاخیر بارسپاری وظایف است، در حالی که محدودیت های انرژی دستگاه های کاربر، بارسپاری جزئی و استفاده مجدد از طیف فرکانسی مشترک را نیز در نظر گرفته است. به دلیل غیرمحدب بودن مسئله، این پژوهش یک راهکار ابتکاری برای حل آن ارائه کرده است. از معایب این مقاله می توان به در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر اشاره کرد. ژیانگ زی و همکارانش در مقاله [۷]، یک فرآیند زمان بندی اجرای وظایف محاسباتی را با هدف کمینه سازی متوسط زمان اجرای وظایف مورد بررسی قرار داده اند. این چارچوب تصمیم گیری به بررسی نحوه اجرای وظایف محاسباتی (اجرای محلی، بارسپاری به سرویس دهنده رایانش لبه ای سیار، یا بارسپاری به دستگاه کاربر نزدیک) و تخصیص منابع محاسباتی سرویس دهنده رایانش لبه ای سیار به هر وظیفه محاسباتی می پردازد و هدف آن به حداقل رساندن مدت زمان اجرای

وقتی انرژی دستگاه ها محدود و مهلت اجرای وظایف ۲ بازه زمانی است، راهکار پیشنهادی حدود ۱۲۰ درصد نسبت به راهکار مرجع بهبود ایجاد می کند. این بیانگر آن است که راهکار پیشنهادی کارآیی بالاتری برای وظایف بیدرنگ دارد. علاوه بر آن در شرایطی که مهلت وظایف ۴ بازه زمانی است، نسبت تعداد وظایف تولید شده بر تکمیل شده در راهکار پیشنهادی تا حدود ۴۴ درصد در مقایسه با راهکار مرجع کاهش می یابد. این نتایج نشان می دهد که راهکار ارائه شده می تواند بهبود زیادی در جهت افزایش کارایی بارسپاری وظایف محاسباتی با مهلت اجرای کم ایجاد کند. اهمیت این مسئله از آن جهت است که استفاده از برنامه های کاربردی بیدرنگ در سیستم های سلامت، سیستم های امنیتی، واقعیت افزوده و غیره رو به رشد است و در آینده، استفاده از راهکاری کارا برای افزایش ظرفیت سیستم رایانش لبه ای در پاسخ دهی به این برنامه ها ضروری خواهد بود. در ادامه، ساختار مقاله بدین صورت سازمان دهی شده است. در بخش ۲ کارهای مرتبط ارائه شده است. در بخش ۳ مدل سیستم مورد مطالعه توضیح داده شده است. در بخش ۴ راهکار پیشنهادی شرح داده شده است. در بخش ۵ ارزیابی صورت گرفته روی راهکار پیشنهادی و در بخش ۶ نتیجه گیری ارائه شده است.

۲- کارهای مرتبط

همان طور که بیان شد، اهداف مطرح شده در مقاله ها به چهار دسته مهم قابل تقسیم بندی هستند. دسته اول شامل پژوهش هایی است که هدف اصلی آنها کمینه سازی تاخیر اجرای وظایف است [۴-۸]. رویدونگ ژانگ و همکارانش در [۴]، یک طرح مبتنی بر مزایده برای تخصیص منابع محاسباتی پیشنهاد کرده اند و به منظور ایجاد انگیزه در دستگاه های کاربر برای به اشتراک گذاری منابع محاسباتی بیکار خود، طرح تشویقی مناسبی براساس خرید و فروش خدمات پردازشی، برای آنها در نظر گرفته اند. بی توجهی به پردازش موازی، در نظر نگرفتن تحرک کاربران و

مقاله [۱۱]، راهکار بارسپاری وظایف محاسباتی با توجه به محدودیت زمان اجرای وظایف و منابع محاسباتی برای کاهش مصرف انرژی دستگاه‌ها ارائه کرده‌اند. مسئله بهینه‌سازی به صورت دو مرحله‌ای است؛ مرحله اول برای بهینه‌سازی تعداد وظایف محاسباتی اجرا شده و مرحله دوم برای کمینه‌سازی انرژی با حفظ حداکثر تعداد وظایف اجرا شده مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل غیرقطعی بودن مسئله بهینه‌سازی، ابتدا یک الگوریتم برای بهینه‌سازی تعداد وظایف اجرا شده و سپس یک الگوریتم تکمیلی برای کمینه‌سازی انرژی پیشنهاد شده است. از کاستی‌های این مقاله می‌توان به بی‌توجهی به پردازش موازی، در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر اشاره کرد. جیافا چن و همکارانش در مقاله [۱۲]، روشی برای تخصیص منابع با بهره‌گیری از فناوری برداشت انرژی ترکیبی برای بهبود بهره‌وری انرژی کل سیستم پیشنهاد کرده‌اند. به دلیل پیچیده بودن مسئله بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی دستگاه‌های کاربر تحت محدودیت مهلت زمانی اجرای وظایف، یک راه حل زیر بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات کوانتومی پیشنهاد شده است. در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر از معایب این راهکار به شمار می‌آیند.

دسته سوم شامل پژوهش‌هایی است که دارای هدف کاهش هم‌زمان مصرف انرژی دستگاه‌های کاربر و تاخیر اجرای وظایف هستند و محدودیت‌های منابع محاسباتی و ارتباطی را نیز در نظر می‌گیرند [۱۳-۱۷]. رونگ چای و همکارانش در مقاله [۱۳]، به چالش مهم ایجاد تعادل بین مصرف انرژی و تاخیر اجرای وظایف پرداخته‌اند. مسئله بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی هزینه کلی اجرای وظایف تعریف شده است که مجموع وزن دار تاخیر اجرا و مصرف انرژی دستگاه‌ها را به عنوان هدف در نظر می‌گیرد تا

وظایف محاسباتی است. بی‌توجهی به پردازش موازی، در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر از کاستی‌های این مقاله است. امیرسلیم و همکارانش در [۸]، یک طرح بارسپاری وظایف محاسباتی ارائه کرده‌اند که تحرک دستگاه‌های سیار، توزیع منابع، ویژگی‌های وظایف محاسباتی و محدودیت انرژی دستگاه‌های کاربر را در نظر می‌گیرد و تاخیر کل بارسپاری وظایف یک دستگاه کاربر، شامل تاخیر اجرای محلی، بارسپاری و اجرای از راه دور را کمینه می‌کند. بی‌توجهی به پردازش موازی، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی وظایف تنها یک کاربر از جمله معایب این مقاله است.

دسته دوم از پژوهش‌ها قصد دارند مصرف انرژی دستگاه‌های کاربر را کاهش داده و در عین حال به محدودیت زمانی پاسخ‌گویی به وظایف دستگاه‌ها و محدودیت منابع ارتباطی و محاسباتی شبکه توجه کنند [۹-۱۲]. شاوین کائو و همکارانش در [۹]، با در نظر گرفتن مهلت اجرای وظایف، یک مسئله بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن مصرف انرژی در دستگاه‌های نیازمند و کمک‌کننده فرمول‌بندی کرده‌اند و بر این اساس به خاطر غیرمحدب بودن مسئله، یک راهکار بارسپاری وظایف محاسباتی بر اساس روش دوگان لاگرانژ ارائه شده است. بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران، در نظر نگرفتن تنها یک کاربر با یک وظیفه و در نظر نگرفتن تحرک کاربران از کاستی‌های این مقاله است. چانگ وانگ و همکارانش در [۱۰]، با در نظر گرفتن محدودیت‌های تاخیر، راهکاری برای بارسپاری وظایف با هدف کاهش مصرف انرژی دستگاه‌ها مطرح کرده‌اند. به دلیل غیر قابل حل بودن مسئله بهینه‌سازی مدل‌سازی شده در زمان چندجمله‌ای، الگوریتمی بر اساس نظریه بازی^{۱۰} برای حل آن ارائه شده است. بی‌توجهی به پردازش موازی، در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر از جمله معایب این مقاله است. یوان کای و همکارانش در

نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر از معایب این راهکار است. یوهان یانگ و همکارانش در [۱۷]، چالش‌های پویایی شرایط شبکه و تحرک کاربران را بررسی کرده‌اند، چرا که این موارد بر کیفیت خدمات‌رسانی به دستگاه‌های کاربر تأثیر می‌گذارند؛ همچنین بی‌انگیزگی کاربران دارای منابع محاسباتی بیکار مورد بحث واقع شده و ایجاد تمایل همکاری در آن‌ها از طریق امتیازدهی انجام شده است. از کاستی‌های این روش می‌توان به بی‌توجهی به پردازش موازی و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر اشاره کرد.

در نهایت، هدف دسته چهارم پژوهش‌ها، افزایش ظرفیت سیستم، یعنی تعداد دستگاه‌های قابل پشتیبانی توسط سیستم، و سود کاربران است [۱۸-۲۱]. بینگهوی هه و همکارانش در [۱۸]، یک مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع ارتباطی و محاسباتی مدل‌سازی کرده‌اند که به دلیل غیرخطی و عدد صحیح بودن آن، این مسئله به دو مسئله فرعی تجزیه شده است. مسئله فرعی اول سعی دارد با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع لبه شبکه، تا جای ممکن، از آن‌ها استفاده کمتری بکند؛ مسئله فرعی دوم، تعداد دستگاه‌هایی را که سیستم می‌تواند براساس راه‌حل‌های مسئله فرعی اول پشتیبانی کند، بیشینه‌سازی می‌کند. معایب این مقاله، در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر است. جونزو هو و همکارانش در مقاله [۱۹]، با بهره‌گیری از روابط اجتماعی بین کاربران، طرحی برای بارسپاری وظایف محاسباتی و تخصیص منابع پیشنهاد کرده‌اند. مسئله بهینه‌سازی مورد مطالعه، به دو زیرمسئله فرعی تقسیم شده است؛ مسئله اول به صورت یک مسئله تطابق برای انتخاب کاربر کمک‌کننده و مسئله دوم برای بهینه‌سازی بارسپاری وظایف، فرمول‌بندی شده است که به ترتیب با الگوریتم مجارستانی و الگوریتم تکرارشونده

مقصد بارسپاری و تخصیص بهینه منابع را تعیین کند. این مسئله، به دو زیر مسئله بارسپاری محاسبات و تخصیص منابع تقسیم می‌شود که به ترتیب با الگوریتم کاهن-مانکرس و روش دوگان لاگرانژ قابل حل هستند. در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر از معایب این مقاله است. رامتین رنجی و همکاران در [۱۴]، روشی برای بارسپاری وظایف با در نظر گرفتن بهره‌وری انرژی و کاهش تاخیر ارائه داده‌اند. در این روش الگوریتمی دو مرحله‌ای برای یافتن مقصد بارسپاری وظایف تعریف شده است که مرحله اول آن برای بارسپاری وظایف محاسباتی حساس به تاخیر و مرحله دوم آن برای بارسپاری وظایف محاسباتی دستگاه‌های کاربر با محدودیت انرژی است. از کاستی‌های این روش می‌توان به بی‌توجهی به پردازش موازی، در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر اشاره کرد. جینگلی و همکارانش در [۱۵]، روشی برای خدمات‌رسانی پویا با در نظر گرفتن تحرک کاربران و برای کمینه‌سازی هزینه کل، شامل هزینه بارسپاری و اجرای وظایف محاسباتی، هزینه محاسبات و هزینه تاخیر ارتباطات ارائه کرده‌اند. به دلیل غیر قابل حل بودن مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده، مسئله اصلی به زیرمسئله تقسیم شده و یک الگوریتم ابتکاری برای حل هر زیر مسئله ارائه شده است. بی‌توجهی به مزیت پردازش موازی، در نظر نگرفتن انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر از کاستی‌های این مقاله است. هایپینگ وانگ و همکاران در [۱۶]، با بهره‌گیری از بارسپاری جزئی روشی برای کاهش تاخیر و مصرف انرژی ارائه کرده‌اند. هدف مسئله بهینه‌سازی مطرح شده، کمینه‌سازی مجموع وزن‌دار تاخیر پردازش موازی در سه منبع پردازشی و انرژی مصرفی برای پردازش و ارسال وظایف، غیرمحدب است. به همین دلیل یک طرح بهینه‌سازی دو مرحله‌ای جایگزین پیشنهاد شده است. در

از معایب این راهکار است. جدول ۱ مقایسه‌ای از کارهای مرتبط را ارائه می‌دهد.

با توجه به مطالب این بخش، معایب راهکارهای مقاله‌های سال‌های گذشته، در بخش ۱ جمع‌بندی شده است و در این مقاله، برای بهبود کارایی سیستم و افزایش تعداد وظایف تکمیل‌شده کاربران، مسئله‌ی تصمیم‌گیری درباره نحوه پردازش، بارسیاری وظایف کاربران و تعیین اندازه داده برای پردازش در هر یک از منابع پردازشی، در نظر گرفته شده است. این مسئله و راهکار ارائه شده برای آن، پویایی ایجاد وظایف در صف، مهلت اجرای وظایف، محدودیت منابع محاسباتی و انرژی دستگاه‌ها، محدودیت منابع ارتباطی و محاسباتی شبکه و محدودیت تمایل همکاری و کمک کردن کاربران را در نظر می‌گیرد.

۳- مدل سیستم مورد مطالعه

با توجه به شکل ۱، سیستم در نظر گرفته شده در این مقاله، شبکه‌ای متشکل از یک ایستگاه پایه به همراه سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار متصل به منبع انرژی نامحدود است که در مرکز محیط مستقر شده است. تعدادی دستگاه مثل دستگاه اینترنت اشیا و تلفن همراه، به صورت تصادفی در اطراف ایستگاه پایه جای‌گرفته‌اند. مجموعه کاربران را با U و تعداد کاربران را با $I = |U|$ نشان می‌دهیم. ایستگاه پایه به عنوان کنترل‌کننده مرکزی، اطلاعات عمومی و به‌روز شبکه از جمله ظرفیت منابع ارتباطی و محاسباتی، تعداد، مکان، ویژگی دستگاه‌ها و وظایف محاسباتی آن‌ها و همچنین میزان روابط اجتماعی کاربران با یکدیگر را جمع‌آوری می‌کند. دستگاه‌های کاربر از طریق ارتباطات سلولی با ایستگاه پایه در ارتباط هستند و اطلاعات خود را از این طریق در اختیار کنترل‌کننده مرکزی قرار می‌دهند. فرض می‌شود که شرایط شبکه از لحاظ تعداد و مکان قرارگیری کاربران در طول کار سیستم ثابت می‌ماند. با این حال با به‌روزرسانی دوره‌ای اطلاعات شبکه می‌توان مدل سیستم مورد مطالعه را در شبکه‌هایی

با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ حل می‌شوند. معایب این مقاله مشابه مقاله [۱۸] است با این تفاوت که در این مقاله به ایجاد انگیزه همکاری توجه شده است. مینگلی تانگ و همکارانش در [۲۰] یک سیستم با روش دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس متعامد^{۱۶} را در نظر گرفته و وظایف بدون قابلیت بخش‌بندی را مطالعه کرده و دو مسئله بهینه‌سازی فرمولبندی کرده‌اند؛ مسئله اول با هدف بیشینه‌سازی تعداد وظایف تکمیل‌شده کاربران و مسئله دوم با هدف کمینه‌سازی مصرف انرژی کاربران است، که مسئله دوم با الگوریتم جابه‌جایی راهبردهای بارسیاری و بر اساس نتایج مسئله اول حل می‌شود. بی‌توجهی به پردازش موازی، در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و بررسی تنها یک وظیفه از هر کاربر از کاستی‌های این مقاله است. محمد آصف و همکاران در [۲۱]، طرحی برای بارسیاری محتوای ویدئویی ارائه کرده‌اند. هدف این مقاله کاهش بارکاری سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار با بهره‌گیری از منابع دستگاه‌های کمک‌کننده است و از این رو دو مسئله متمایز، بیشینه‌سازی واسپاری با توجه به محدودیت تاخیر و کمینه‌سازی تاخیر، بیان شده است که به روش ابتکاری حل شده‌اند. در نظر نگرفتن تحرک کاربران و بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران از معایب این راهکار است. نادین عباس و همکاران در [۲۲]، یک مسئله بهینه‌سازی بارسیاری با هدف بیشینه‌سازی تعداد کارهای تکمیل‌شده و در عین حال کمینه‌سازی مصرف انرژی و هزینه پولی در شبکه‌های ناهمگن رایانش لبه‌ای پیشنهاد کرده‌اند. در این مقاله، کاربر می‌تواند وظیفه محاسباتی با قابلیت بخش‌بندی خود را به چندین کمک‌کننده و سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای ارسال کند. با توجه به غیر قابل حل بودن مسئله یک رویکرد تکرارشونده و سلسله مراتبی برای تخصیص منابع در نظر گرفته شده است. در نظر نگرفتن تحرک کاربران، بی‌توجهی به ایجاد انگیزه همکاری در کاربران و در نظر نگرفتن تنها یک وظیفه برای هر کاربر

جدول (۱): مقایسه کارهای مرتبط

سال انتشار	هدف	تعدد وظایف هر کاربر	تعدد کاربران	تحرك کاربران	انگیزه همکاری کاربران	نوع بارسپاری	
۲۰۱۹	کمیته سازی تاخیر	خیر	بله	خیر	بله	کامل	[۴]
۲۰۱۹	کمیته سازی تاخیر	خیر	بله	خیر	خیر	کامل	[۵]
۲۰۲۰	کمیته سازی تاخیر	خیر	بله	خیر	خیر	جزئی ۱۲	[۶]
۲۰۲۰	کمیته سازی تاخیر	خیر	بله	خیر	خیر	کامل	[۷]
۲۰۲۰	کمیته سازی تاخیر	بله	خیر	بله	خیر	کامل	[۸]
۲۰۱۸	کمیته سازی مصرف انرژی کاربران	خیر	خیر	خیر	خیر	کامل- جزئی ۳	[۹]
۲۰۱۹	کمیته سازی مصرف انرژی کاربران	خیر	بله	خیر	خیر	کامل	[۱۰]
۲۰۱۹	کمیته سازی مصرف انرژی و بیشینه سازی تعداد وظایف تکمیل شده	خیر	بله	خیر	خیر	کامل	[۱۱]
۲۰۲۰	بیشینه سازی بهره‌وری انرژی کاربران	خیر	بله	خیر	خیر	جزئی ۳	[۱۲]
۲۰۱۹	کمیته سازی هم‌زمان تاخیر و مصرف انرژی کاربران	خیر	بله	خیر	خیر	جزئی ۳	[۱۳]
۲۰۲۰	کمیته سازی هم‌زمان تاخیر و مصرف انرژی کاربران	خیر	بله	خیر	بله	کامل	[۱۴]
۲۰۲۱	کمیته سازی هم‌زمان تاخیر و مصرف انرژی کاربران	خیر	بله	بله	خیر	کامل	[۱۵]
۲۰۲۱	کمیته سازی هم‌زمان تاخیر و مصرف انرژی کاربران	بله	خیر	خیر	خیر	جزئی ۳	[۱۶]
۲۰۲۱	کمیته سازی هم‌زمان تاخیر و مصرف انرژی کاربران	خیر	بله	بله	بله	کامل	[۱۷]
۲۰۱۹	بیشینه سازی تعداد دستگاه‌های پشتیبانی شده توسط سیستم	خیر	بله	خیر	خیر	جزئی ۳	[۱۸]
۲۰۱۹	بیشینه سازی سود کاربران	خیر	بله	خیر	بله	جزئی ۲	[۱۹]
۲۰۲۰	بیشینه سازی تعداد دستگاه‌های پشتیبانی شده توسط سیستم	خیر	بله	خیر	خیر	کامل	[۲۰]
۲۰۲۳	بیشینه سازی ظرفیت سیستم	بله	بله	خیر	خیر	جزئی ۲	[۲۱]
۲۰۲۲	بیشینه سازی تعداد دستگاه‌های پشتیبانی شده توسط سیستم	خیر	بله	خیر	خیر	جزئی - متعدد	[۲۲]

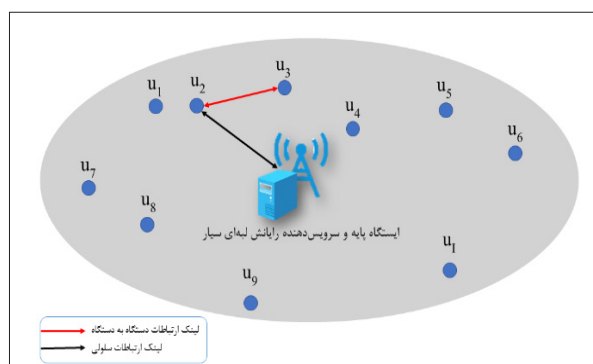
۱- اعداد کنار کلمه جزئی به تعداد مقاصد بارسپاری اشاره دارند.

صف میانگیرش قرار دهد. هر وظیفه قابلیت پخش پذیری دارد یعنی برای پردازش شدن، داده‌های آن می‌تواند به چند بخش تقسیم شده و هر بخش توسط منبعی جدا پردازش شود. در شروع هر بازه زمانی، کاربرانی که در آن بازه مشغول اجرای وظیفه‌ای از قبل نیستند، به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱. کاربرانی که در میانگیر^{۱۷} خود وظیفه‌ای برای اجرا ندارند و مجموعه دستگاه‌های کمک‌کننده U^A ، را تشکیل می‌دهند ($U^A \subset U$).

۲. کاربرانی که در میانگیر خود وظیفه‌ای برای اجرا دارند و می‌توانند آن را به صورت کاملاً محلی در مهلت زمانی وظیفه پردازش کنند.

با تغییرات آهسته نیز به کار برد. همچنین فرض شده است زمان به بازه‌های با اندازه یکسان Δ تقسیم شده است.



شکل (۱): مدل سیستم مورد مطالعه

در ابتدای هر بازه زمانی، کاربر $i \in U$ ممکن است وظیفه‌ای با مهلت اجرای T_i بازه زمانی تولید کند و در

میزان مصرف انرژی دستگاه i برای اجرای محلی وظیفه خود برابر است با:

$$E_i^{local} = L_i^{local} C_i e_i, \quad i \in \mathcal{U}^n \quad (2)$$

که در آن e_i بیانگر میزان مصرف انرژی دستگاه کاربر i به ازای هر چرخه پردازنده با واحد ژول بر چرخه است. در حالت اجرا در دستگاه کاربر کمک‌کننده، کاربر بخشی از داده‌های محاسباتی وظیفه خود را از طریق ارتباط دستگاه به دستگاه به کاربر کمک‌کننده که دارای منابع محاسباتی بیکار است، بارسیاری می‌کند. کاربر کمک‌کننده پس از پردازش داده‌های محاسباتی کاربر نیازمند، نتایج را به آن باز می‌گرداند. تاخیر اجرای وظیفه در دستگاه کاربر کمک‌کننده، حاصل جمع تاخیر ارسال داده‌های محاسباتی و تاخیر پردازش داده‌های محاسباتی در پردازنده کمک‌کننده است. تاخیر ارسال داده‌های محاسباتی از کاربر نیازمند i به کاربر کمک‌کننده h_i برابر است با:

$$D_i^{d2d-offloading} = \frac{L_i^{d2d}}{r_{ih_i}}, \quad i \in \mathcal{U}^n, \quad h_i \in \mathcal{U}^k \quad (3)$$

که در آن L_i^{d2d} بیانگر اندازه داده محاسباتی بارسیاری‌شده به کاربر کمک‌کننده h_i و r_{ih_i} بیانگر نرخ کنونی ارسال داده از کاربر i به کاربر کمک‌کننده h_i با واحد بیت بر ثانیه است و از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r_{ih_i} = \frac{B}{M} \log_2 \left(1 + \frac{P g_{ih_i}}{N} \right), \quad i \in \mathcal{U}^n, \quad h_i \in \mathcal{U}^k \quad (4)$$

که در آن B پهنای باند کل سیستم، M مجموع تعداد ارتباطات سلولی و دستگاه به دستگاه کنونی، P توان ارسال دستگاه کاربر، g_{ih_i} بهره کانال^{۱۸} کنونی بین دستگاه i و h_i و N توان نویز^{۱۹} را نشان می‌دهد. همانطور که در مدل سیستم مورد مطالعه اشاره شد، فرض شده است که شرایط کانال در طول زمان تغییر زیادی ندارد. مقدار بهره کانال از رابطه $g_{ih_i} = d_{ih_i}^{-\alpha}$ به دست می‌آید که در آن d_{ih_i} فاصله بین دستگاه i و کمک‌کننده h_i شاخص

۳. کاربرانی که در میانگیر خود وظیفه‌ای برای اجرا دارند ولی به دلیل محدودیت منابع محاسباتی و انرژی خود، خودشان به تنهایی نمی‌توانند آن وظیفه را در مهلت زمانی‌اش، به صورت کاملاً محلی پردازش کنند. این کاربران نیازمند بارسیاری هستند و با مجموعه \mathcal{U}^n نشان داده می‌شوند ($\mathcal{U}^n \subset \mathcal{U}$). این دسته از کاربران برای پردازش وظایف خود می‌توانند از سه منبع پردازشی مختلف یعنی پردازنده محلی، پردازنده دستگاه کاربر کمک‌کننده و سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار استفاده کنند و نتایج را از آن‌ها بگیرند.

کاربران نیازمند، اطلاعات وظیفه خود را برای کنترل‌کننده مرکزی ارسال می‌کنند و کنترل‌کننده با توجه به اطلاعاتی که در دست دارد و با در نظر گرفتن تاخیر اجرا و مصرف انرژی، در مورد نحوه پردازش و بارسیاری وظایف کاربران تصمیم می‌گیرد. منابع ارتباطی شبکه (پهنای باند)، براساس تصمیم‌های گرفته‌شده توسط کنترل‌کننده مرکزی، به صورت مساوی بین ارتباطات سلولی و ارتباطات دستگاه به دستگاه تقسیم می‌شود. در ادامه، نحوه محاسبه تاخیر پردازش و بارسیاری وظایف و انرژی مصرفی دستگاه در سه حالت پردازش محلی، پردازش در دستگاه کاربر کمک‌کننده و پردازش در سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار توضیح داده می‌شوند. روابط مورد استفاده براساس مفاهیم پایه‌ای مربوط به رایانش در ابر و مرجع [۲۰] می‌باشند.

در پردازش محلی، تمام یا بخشی از وظیفه کاربر در پردازنده خودش پردازش می‌شود. تاخیر اجرای وظیفه در این حالت برابر است با:

$$D_i^{local} = \frac{L_i^{local} C_i}{f_i}, \quad i \in \mathcal{U}^n \quad (1)$$

که در آن L_i^{local} بیانگر اندازه داده محاسباتی محلی وظیفه کاربر i با واحد بیت، C_i نشان‌دهنده تعداد چرخه‌های پردازشی لازم برای پردازش هر بیت داده محاسباتی وظیفه کاربر i با واحد چرخه بر بیت و f_i بیانگر ظرفیت محاسباتی کاربر i با واحد چرخه بر ثانیه است. همچنین

است که براساس $d_{i0}^{-\alpha} = g_{i0}$ و مشابه رابطه (۴) به دست می‌آید که در آن d_{i0} فاصله بین دستگاه i و سرویس‌دهنده است.

زمان پردازش و وظیفه محاسباتی کاربر i در سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار برابر است با:

$$D_i^{mec-computing} = \frac{L_i^{mec} C_i}{f_{0i}}, i \in \mathcal{U}^n \quad (9)$$

که در آن f_{0i} ظرفیت محاسباتی اختصاص یافته از سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار به کاربر i است. مشابه روش اجرا در دستگاه کاربر کمک‌کننده، به دلیل کوچک‌بودن نتایج داده‌های پردازش‌شده، از محاسبه تاخیر ارسال از سرویس‌دهنده به کاربر نیازمند صرف‌نظر می‌کنیم؛ لذا تاخیر کل اجرای وظیفه در سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار برابر است با:

$$D_i^{mec} = D_i^{mec-offloading} + D_i^{mec-computing}, i \in \mathcal{U}^n \quad (10)$$

میزان مصرف انرژی دستگاه نیازمند برای ارسال داده‌های محاسباتی به سرویس‌دهنده برابر است با:

$$E_i^{mec-offloading} = \frac{P L_i^{mec}}{r_{i0}}, i \in \mathcal{U}^n \quad (11)$$

با توجه به این‌که سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار به منبع انرژی نامحدود متصل است، از محاسبه میزان مصرف انرژی برای پردازش وظیفه کاربر در سرویس‌دهنده صرف‌نظر می‌کنیم.

با توجه به این‌که وظایف دستگاه‌ها قابل‌بخش‌بندی هستند و هر کاربر می‌تواند وظیفه خود را به سه بخش برای اجرای محلی، اجرا در دستگاه کمک‌کننده و اجرا در سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار تقسیم کند، این سه بخش قابل‌پردازش به صورت موازی و هم‌زمان در سه منبع پردازشی مختلف است. در نتیجه، تاخیر کل اجرای وظیفه کاربر نیازمند به بارسپاری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_i = \max(D_i^{local}, D_i^{d2d}, D_i^{mec}), i \in \mathcal{U}^n \quad (12)$$

مسئله مورد بررسی در این مقاله، تصمیم‌گیری در مورد نحوه پردازش وظایف با در نظر گرفتن قابلیت‌ها و

اتلاف مسیر^{۲۰} و β شاخص محوشدگی^{۲۱} را نشان می‌دهد. همچنین مقدار N از رابطه $N = N_0 \frac{B}{M}$ به دست می‌آید که در آن N_0 چگالی توان نوفه است. تاخیر پردازش داده‌های محاسباتی در پردازنده کاربر کمک‌کننده برابر است با:

$$D_i^{d2d-computing} = \frac{L_i^{d2d} C_i}{f_{h_i}}, i \in \mathcal{U}^n, h_i \in \mathcal{U}^k \quad (5)$$

که در آن f_{h_i} ظرفیت محاسباتی کمک‌کننده h_i است. این نکته قابل ذکر است که به دلیل کوچک‌بودن نتایج داده‌های پردازش‌شده، از تاخیر ارسال نتایج از کاربر کمک‌کننده به کاربر نیازمند صرف‌نظر می‌کنیم؛ لذا تاخیر کل اجرای وظیفه در دستگاه کاربر کمک‌کننده برابر است با:

$$D_i^{d2d} = D_i^{d2d-offloading} + D_i^{d2d-computing}, i \in \mathcal{U}^n \quad (6)$$

میزان مصرف انرژی برای ارسال داده‌های محاسباتی از کاربر نیازمند i به کاربر کمک‌کننده h_i برابر است با:

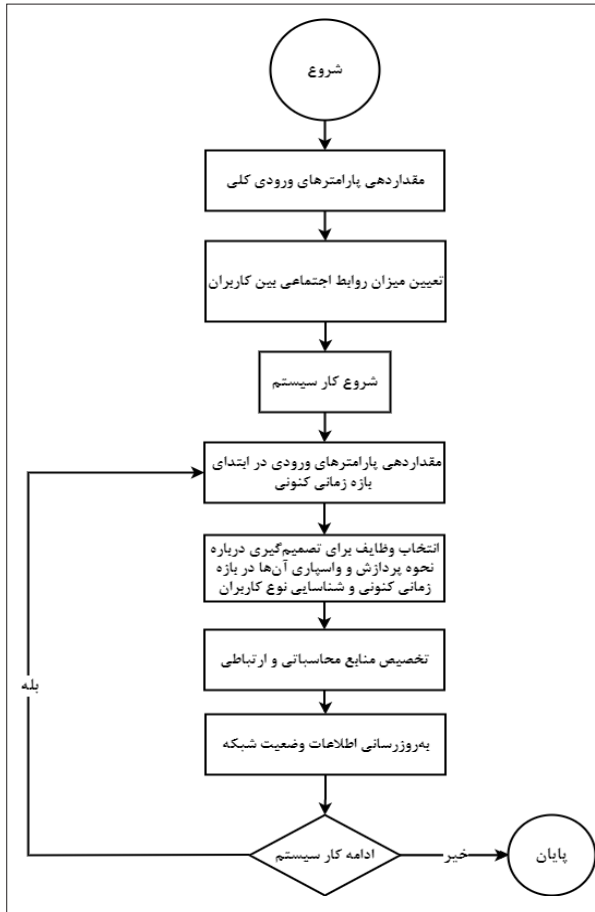
$$E_i^{d2d-offloading} = \frac{P L_i^{d2d}}{r_{ih_i}}, i \in \mathcal{U}^n, h_i \in \mathcal{U}^k \quad (7)$$

و میزان مصرف انرژی کمک‌کننده h_i برای پردازش وظیفه کاربر i ، $E_{h_i}^{d2d-computing}$ ، به صورت مشابه با رابطه شماره (۲) به دست می‌آید.

در حالت اجرا در سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار، کاربر، تمام یا بخشی از داده‌های محاسباتی وظیفه خود را از طریق ارتباط سلولی به سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار بارسپاری می‌کند و نتایج پردازش را از آن می‌گیرد. برای سادگی در بیان روابط ریاضی، از اندیس 0 برای اشاره به سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار استفاده شده است. تاخیر ارسال از کاربر نیازمند i به سرویس‌دهنده برابر است با:

$$D_i^{mec-offloading} = \frac{L_i^{mec}}{r_{i0}}, i \in \mathcal{U}^n \quad (8)$$

که در آن L_i^{mec} بیانگر اندازه داده محاسباتی بارسپاری‌شده به سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار و r_{i0} بیانگر نرخ کنونی ارسال داده از کاربر i به سرویس‌دهنده



شکل (۲): کارنمای مربوط به راهکار SRAPOM

از برنامه‌های کاربردی مرتبط، اطلاعات دوستان کاربران را از شبکه‌های اجتماعی جمع‌آوری می‌کنند و در اختیار کنترل‌کننده مرکزی می‌گذارند. سپس، کنترل‌کننده مرکزی، ماتریس روابط اجتماعی بین کاربران، S ، را تشکیل می‌دهد؛ در صورتی که رابطه مستقیم دوستی بین کاربر i و کاربر j ($i, j \in \mathcal{U}$) وجود داشته باشد، درایه سطر i و ستون j این ماتریس، s_{ij} ، یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. روشن است که ماتریس S متقارن بوده و اندازه آن $I \times I$ است. پس از تشکیل ماتریس روابط اجتماعی بین کاربران، با اعمال الگوریتم دایکسترا^{۲۲} برای هر گره، ماتریس متقارن S' که کوتاه‌ترین فاصله روابط اجتماعی بین کاربران را نشان می‌دهد، به دست می‌آید. مقدار درایه سطر i و ستون j ماتریس S' ، یعنی s'_{ij} ، فاصله یا نزدیکی رابطه بین کاربر i و j را بیان می‌کند؛ هرچه این مقدار کمتر باشد، روابط بین

محدودیت‌های ذکر شده در بالا است به گونه‌ای که تعداد وظایف تکمیل شده کاربران، افزایش یابد.

۴- راهکار بارسپاری جزئی آگاه از روابط اجتماعی

راهکار ارائه شده در این مقاله که به اختصار با نام "SRAPOM" اشاره می‌شود، برای تصمیم‌گیری درباره نحوه پردازش و بارسپاری وظایف، مراحل نشان داده شده در شکل ۲ را طی می‌کند که در ادامه، شرح داده می‌شوند. پارامترهای ورودی کلی و ثابت در طول مدت کار شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای ورودی کلی راهکار SRAPOM

نماد	توضیح
I	تعداد کاربران
(x_i, y_i)	مختصات مکانی کاربر i
f_i	ظرفیت محاسباتی کاربر i
E_i	میزان انرژی باقیمانده دستگاه کاربر i
F	ظرفیت محاسباتی سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای
C_i	تعداد چرخه‌های لازم پردازنده برای پردازش هر بیت از وظیفه کاربر i
e_i	میزان مصرف انرژی دستگاه کاربر i به ازای هر چرخه پردازنده
P	توان ارسال کاربران
B	بهنای باند کل سیستم
N_0	چگالی توان نویز
α	شاخص اتلاف مسیر
β	شاخص محوشدگی
d_{max}^{d2d}	بیشترین فاصله مجاز برای ارتباط دستگاه به دستگاه
s_{max}^{d2d}	دورترین روابط اجتماعی مجاز برای کمک‌رسانی
R	فهرست دوستان کاربران

تعیین میزان روابط اجتماعی بین کاربران

پیش از شروع پردازش وظایف، کنترل‌کننده مرکزی مستقر در ایستگاه پایه اطلاعات به‌روز شبکه و کاربران را جمع‌آوری می‌کند. یکی از اطلاعات مورد نیاز، فهرست دوستان هر کاربر است. دستگاه‌های کاربران با استفاده

22-Dijkstra's algorithm

بعدی، محاسبه تاخیر صف^{۳۳} برای وظایف انتخاب شده است که برابر با فاصله زمانی بین تولید وظیفه تا آغاز پردازش و بارسپاری آن است. تاخیر صف از اختلاف بازه زمانی کنونی و بازه زمانی تولید وظیفه کاربر i به دست می آید:

$$D_i^{que} = t^n - t_i^g, i \in U^n \quad (13)$$

که در آن t^n و t_i^g به ترتیب بیانگر بازه زمانی کنونی و بازه زمانی تولید وظیفه انتخاب شده کاربر i است. پیش از شروع تصمیم گیری برای پردازش، تاخیر صف از مهلت زمانی اجرای وظیفه کاربر i کسر می شود تا مهلت زمانی باقی مانده به دست آید:

$$\tau_i' = \tau_i - D_i^{que}, i \in U^n \quad (14)$$

با توجه به این که مهلت زمانی اجرای وظایف براساس تعداد بازه زمانی است، این مهلت زمانی برحسب ثانیه برابر است با:

$$\tau_i^{sec} = 1\tau_i', i \in U^n \quad (15)$$

کنترل کننده مرکزی با توجه به اطلاعاتی که دارد، کاربرانی را که درحال پردازش وظیفه ای نباشند و همچنین وظیفه تولید شده ای در بازه زمانی کنونی در صف میانگیر خود نداشته باشند، به عنوان مجموعه کاربران کمک کننده، U^k شناسایی می کند. کاربرانی که در بازه زمانی کنونی وظایفی برای پردازش در میانگیر خود دارند، اولین وظیفه از صف میانگیر خود را برای پردازش خارج می کنند. این کاربران به دو دسته کاربران بی نیاز و کاربران نیازمند تقسیم می شوند. اگر برای کاربر i روابط (۱۶) و (۱۷) برقرار باشند، کاربر جزو دستگاه های بی نیاز به بارسپاری به شمار می آید:

$$L_i C_i e_i \leq E_i, i \in U^n \quad (16)$$

$$\frac{L_i C_i}{f_i} \leq \tau_i^{sec}, i \in U^n \quad (17)$$

به عبارت دیگر، در صورتی که دستگاهی منابع محاسباتی و انرژی کافی برای پردازش کل وظیفه خود در پردازنده محلی خود داشته باشد، نیازی به بارسپاری

کاربران صمیمی تر خواهد بود. با توجه به این نکته که در سیستم مورد مطالعه زمان به بازه های تقسیم شده است، در ادامه، راهکار SRAPOM برای یک بازه زمانی توضیح داده می شود. در انتهای هر بازه زمانی وضعیت شبکه به عنوان پارامترهای ورودی به بازه زمانی بعدی انتقال پیدا می کند تا بر اساس این وضعیت، تصمیم گیری های جدید صورت گیرد. این روند تا زمانی که کار شبکه ادامه پیدا می کند، برقرار است.

پارامترهای ورودی در ابتدای بازه زمانی کنونی

پارامترهای ورودی که در ابتدای هر بازه زمانی مقداردهی و به روزرسانی می شوند، شامل وضعیت میانگیر وظایف کاربران، اندازه داده محاسباتی و مهلت زمانی اجرای وظیفه هر کاربر است. در ابتدای هر بازه زمانی با یک احتمال، کاربر ممکن است وظیفه ای برای اجرا در دستگاه خود تولید کند. وظایف تولید شده در میانگیر کاربران به صف می شوند تا به ترتیب درباره نحوه پردازش و بارسپاری آن ها تصمیم گیری شود.

انتخاب وظایف برای تصمیم گیری درباره نحوه پردازش و بارسپاری آن ها در بازه زمانی کنونی و شناسایی نوع کاربران

در این مرحله وظایف کاربران برای پردازش و بارسپاری انتخاب می شوند و بر این اساس نوع کاربران شناسایی می گردد. مرحله اول در این بخش انتخاب وظایف از میانگیر کاربران است. در ابتدای هر بازه زمانی، کاربران که مشغول اجرا و پردازش وظیفه ای نباشند، در صورتی که در بازه زمانی کنونی وظایف تولید شده ای در میانگیر خود داشته باشند، اطلاعات مربوط به اولین وظیفه در صف میانگیر خود را به کنترل کننده مرکزی ارسال می کنند. این اطلاعات عبارت از بازه زمانی که وظیفه در آن تولید شده، مهلت زمانی اجرای وظیفه و اندازه داده محاسباتی وظیفه هستند. کنترل کننده لیستی از اطلاعات دریافتی ایجاد می کند تا در ادامه درباره نحوه پردازش و بارسپاری وظایف مورد نظر تصمیم گیری کند. مرحله

بین کمک‌کننده‌های اطراف کاربر نیازمند، نزدیک‌ترین دستگاهی که تمامی شرایط زیر را دارا باشد به عنوان کاربر کمک‌کننده h_i برای دستگاه i انتخاب می‌شود:

۱. فاصله بین کاربر $i \in U^n$ و کمک‌کننده $h_i \in U^k$ از حداکثر فاصله مجاز برای ارتباط دستگاه به دستگاه (d_{max}^{d2d}) بیشتر نباشد $(d_{ih_i} \leq d_{max}^{d2d})$.

۲. در صورتی کاربر h_i به عنوان کمک‌کننده برای بارسپاری وظایف کاربر نیازمند i انتخاب می‌شود که فاصله کاربر نیازمند با سرویس‌دهنده رایش لبه‌ای بیشتر از ضریبی از فاصله کاربر نیازمند با کمک‌کننده باشد؛ یعنی $d_{ih_i} \leq \theta d_{i0}$ که در آن θ ضریب فاصله بین کاربر نیازمند و سرویس‌دهنده رایش لبه‌ای سیار است.

۳. بین کاربر i و کمک‌کننده h_i رابطه یک‌به‌یک وجود داشته باشد. به بیان دیگر، کاربر h_i پیش از این در بازه زمانی کنونی با کاربر دیگر برای ارتباط دستگاه به دستگاه جفت نشده باشد.

۴. فاصله روابط اجتماعی بین دو کاربر از حداکثر فاصله روابط اجتماعی مجاز بین کاربران برای کمک‌رسانی (S_{max}^{d2d}) بیشتر نباشد $(s'_{ih_i} \leq S_{max}^{d2d})$. دلیل در نظر گرفتن این امر، آن است که در حالت معمول کاربران تمایلی به اشتراک‌گذاری منابع محاسباتی خود با دستگاه‌های نیازمند ندارند؛ اما در صورتی که کاربر نیازمند از دوستان نزدیک کمک‌کننده باشد، این بی‌تمایلی از بین خواهد رفت.

در صورتی که در اطراف کاربر نیازمند i کاربر کمک‌کننده h_i با شرایط ذکرشده وجود داشته باشد، درایه‌های متناظر در ماتریس تصمیم با مقدار $z_{ih_i} = 1$ به‌روزرسانی می‌شود. سپس کنترل‌کننده مرکزی با توجه به میزان انرژی دستگاه کمک‌کننده و مهلت زمانی اجرای وظیفه کاربر نیازمند، بیشترین اندازه داده محاسباتی را که کاربر کمک‌کننده می‌تواند پردازش کند را طبق رابطه زیر به‌دست می‌آورد:

$$L_i^{d2dmax} = \min \left(\frac{E_{h_i}}{C_i e_{h_i}}, \frac{r_{ih_i} f_{h_i} \tau_i^{sec}}{f_{h_i} + (r_{ih_i} C_i)} \right), i \in U^n, h_i \in U^k \quad (19)$$

این رابطه از ترکیب روابط (۲) و (۵) به‌دست آمده

وظیفه خود به سایر منابع محاسباتی ندارد. در غیر این صورت، جزو کاربران نیازمند به بارسپاری به‌شمار می‌آید.

تخصیص منابع پردازشی و ارتباطی

با توجه به محدودیت ظرفیت محاسباتی سرویس‌دهنده رایش لبه‌ای سیار نسبت به تعداد کاربران و وظایف تولیدشده، همواره اولویت پردازش به ترتیب در منابع پردازنده محلی، پردازنده کاربر کمک‌کننده و سرویس‌دهنده رایش لبه‌ای سیار است. کنترل‌کننده مرکزی بر اساس ظرفیت محاسباتی و میزان انرژی دستگاه کاربر نیازمند i ، حداکثر اندازه داده محاسباتی را که کاربر می‌تواند به‌صورت کاملاً محلی در مهلت زمانی اجرای وظیفه پردازش کند، به عنوان اندازه داده محاسباتی پردازش محلی در نظر می‌گیرد که برابر است با:

$$L_i^{local} = \min \left(\frac{\tau_i^{sec} f_i}{C_i}, \frac{E_i}{C_i e_i} \right), i \in U^n \quad (18)$$

مقدار L_i^{local} وابسته به ظرفیت محاسباتی و انرژی باقی‌مانده دستگاه کاربر i است. این کاربر، L_i^{local} بیت را از داده اصلی جدا می‌کند و باقی‌مانده داده محاسباتی را برای پردازش از راه دور کنار می‌گذارد که طول آن برابر $L'_i = L_i - L_i^{local}$ است.

برای بیان تصمیم‌گیری در مورد بارسپاری داده‌های وظایف، ماتریس Z با ابعاد $|U^n| \times |U^k| + 1$ به نام ماتریس تصمیم در نظر گرفته شده است که درایه سطر i و ستون j آن با z_{ij} بیان می‌شود که از ۰ شروع می‌شود. در صورتی که تصمیم‌گیری شود کاربر نیازمند $i \in U^n$ وظیفه خود را به کاربر کمک‌کننده $h_i \in U^k$ بارسپاری کند، $z_{ih_i} = 1$ و در غیر این صورت $z_{ih_i} = 0$ خواهد بود. به‌طور مشابه اگر کاربر i اقدام به بارسپاری وظیفه خود به سرویس‌دهنده رایش لبه‌ای سیار بکند $z_{i0} = 1$ و در غیر این صورت $z_{i0} = 0$ خواهد بود.

برای تخصیص منابع پردازشی کاربران کمک‌کننده در جهت کمک به پردازش وظایف کاربران نیازمند، از

دقیق ارسال داده را به دست آورد، برای محاسبه تقریبی در رابطه (۱۹) و r_{i0} در (۲۲)، ابتدا فرض می‌شود که پهنای باند اختصاصی برای هر ارتباط کاربر (ارتباط سلولی و ارتباط دستگاه به دستگاه) برابر $\frac{B}{2|U^n|}$ است؛ یعنی برای هر کاربر یک قسمت از پهنای باند برای ارتباط سلولی و یک قسمت برای ارتباط دستگاه به دستگاه جدا می‌شود. پس از تصمیم‌گیری درباره تخصیص منابع پردازشی و به دست آمدن تعداد ارتباطات سلولی و دستگاه به دستگاه، منابع ارتباطی به صورت مساوی بین ارتباطات سلولی و ارتباطات دستگاه به دستگاه تقسیم می‌شوند. در نتیجه داریم:

$$M = \sum_{i=0}^{|U^n|} \sum_{h_i=0}^{|U^h|+1} z_{ih_i}, \quad i \in U^n, \quad h_i \in U^h \quad (23)$$

و لذا پهنای باند اختصاصی برای هر یک از ارتباطات سلولی و دستگاه به دستگاه است.

به روزرسانی اطلاعات وضعیت شبکه

در این مرحله وضعیت شبکه و کاربران بر اساس تصمیمات گرفته شده به روزرسانی می‌شوند. تصمیم‌گیری‌های بازه زمانی بعدی بر اساس این اطلاعات خواهد بود. اگر کنترل کننده مرکزی به دلیل پیدا نکردن کاربر کمک کننده یا ظرفیت محدود سرویس دهنده رایانش لبه‌ای سیار، نتواند تصمیم مناسبی برای پردازش و بارسپاری یک وظیفه بگیرد، وظیفه مورد نظر به میانگیر کاربر بازگردانده می‌شود تا در بازه زمانی بعدی دوباره مورد تصمیم‌گیری قرار گیرد. این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که مهلت باقی مانده اجرای وظیفه بیشتر از یک بازه باشد و از این طریق، شانس چندباره برای اجرای وظیفه ایجاد می‌شود. با توجه به موازی بودن پردازش در سه منبع پردازشی مختلف، تاخیر اجرای وظیفه کاربر نیازمند و به دنبال آن مدت زمان مشغول بودن کاربر بر اساس حد بالای رابطه شماره (۱۲) به دست می‌آید. چون تصمیم‌گیری‌ها در آغاز هر بازه زمانی انجام می‌گیرد، در

است و نشان می‌دهد که محدودیت انرژی کاربر کمک کننده و مدت زمان لازم برای بارسپاری و پردازش داده‌های محاسباتی کاربر نیازمند در دستگاه کاربر کمک کننده، تعیین کننده مقدار L_i^{d2dmax} است. اگر کاربر نیازمند، کمک کننده‌ای با شرایط ذکر شده در اطراف خود نداشته باشد، $L_i^{d2dmax} = 0$ خواهد بود. مقدار داده محاسباتی وظیفه کاربر i برای پردازش در منبع کاربر کمک کننده از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_i^{d2d} = \min(L_i', L_i^{d2dmax}), \quad i \in U^n \quad (20)$$

در صورتی که مقدار به دست آمده از (۲۰) از L_i' کمتر باشد، لازم خواهد بود تا بقیه داده کاربر i به سرویس دهنده رایانش لبه‌ای سیار بارسپاری شود. پس، مقدار داده محاسباتی وظیفه کاربر i برای پردازش در منبع سرویس دهنده رایانش لبه‌ای سیار از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_i^{mec} = L_i' - L_i^{d2d}, \quad i \in U^n \quad (21)$$

در ادامه، تخصیص منابع پردازشی سرویس دهنده رایانش لبه‌ای سیار صورت می‌گیرد. با توجه به اندازه داده محاسباتی باقی مانده از وظیفه کاربر نیازمند i و مهلت اجرای آن، ظرفیت محاسباتی مورد نیاز کاربر i از منابع سرویس دهنده رایانش لبه‌ای برابر است با:

$$f_{0i}^{request} = \frac{L_i^{mec} C_i}{\tau_i^{sec} - \frac{L_i^{mec}}{r_{i0}}}, \quad i \in U^n \quad (22)$$

در صورتی که سرویس دهنده رایانش لبه‌ای سیار منبع محاسباتی آزاد با ظرفیت محاسبه شده داشته باشد ($f_{0i}^{request} \leq F'$)، این ظرفیت را به کاربر $i \in U^n$ تخصیص می‌دهد و این مقدار از کل ظرفیت محاسباتی سرویس دهنده کسر می‌شود، یعنی $F' = F' - f_{0i}^{request}$ که در آن F' ظرفیت محاسباتی آزاد سرویس دهنده است. همچنین درایه‌های متناظر در ماتریس تصمیم با مقدار $z_{i0} = 1$ به روزرسانی می‌شود.

با توجه به این نکته که پیش از تخصیص منابع ارتباطی نمی‌توان مقدار M در نتیجه پهنای باند اختصاصی و نرخ

$$E_{h_i} = E_{h_i} - E_{h_i}^{d2d-computing}, h_i \in \mathcal{U}^k \quad (28)$$

در انتهای هر بازه زمانی انرژی باقی‌مانده از کاربران بررسی می‌شود؛ کاربرانی که انرژی لازم برای پردازش کاملاً محلی یک وظیفه با اندازه داده محاسباتی متوسط نداشته باشند، جزء دستگاه‌هایی با انرژی ناکافی شناخته شده و از دوره پردازشی کنار گذاشته می‌شوند.

۵- ارزیابی

در این بخش، برای بررسی کارایی راهکار SRAPOM، عملکرد آن با راهکاری براساس روش پیشنهادشده در مرجع [۶] (که برای سادگی در بیان مطالب با نام راهکار مرجع [۶] به آن اشاره خواهد شد) و راهکار پایه‌ای (فقط پردازش محلی) مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته برای شبکه‌ای به شعاع ۳۰۰ متر انجام شده است که در آن احتمال تولید وظیفه برای هر کاربر ۱،۰ و احتمال وجود روابط اجتماعی بین دو کاربر ۳،۰ است. بقیه پارامترهای شبیه‌سازی، طبق جدول شماره ۲ تنظیم شده است، مگر آنکه در ادامه به گونه دیگری بیان شود. اغلب این پارامترها براساس مدل سیستمی که در [۶، ۲۰] تعریف شده است، در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که برای مقاردهی تصادفی پارامترها در بازه داده‌ای مشخص شده، از توزیع یکنواخت^{۲۴} استفاده شده است به غیر از پارامتر β که با توزیع ریلی^{۲۵} با مقیاس ۱ مقاردهی می‌شود. توزیع ریلی از ترکیب دو توزیع نرمال مستقل از هم با واریانس یکسان حاصل می‌شود و برای مدل‌سازی بهره‌کنال‌های بی‌سیم استفاده می‌شود که در آن‌ها بین فرستنده و گیرنده خط دید مستقیمی وجود نداشته باشد [۲۴].

شکل ۳ میانگین نتایج راهکار SRAPOM، راهکار مرجع [۶] و راهکار پایه‌ای را برای ۲۰ شبیه‌سازی مختلف با مدت ۲۰۰۰ بازه زمانی از شبکه ۲۵ کاربری با وظایف دارای مهلت ۷ بازه زمانی نشان می‌دهد. حرف g و c در

صورتی که کاربری وظیفه خود را در اواسط یک بازه زمانی به پایان برساند، تا پایان بازه زمانی مورد نظر به‌عنوان کاربر مشغول لحاظ خواهد شد. در نتیجه تعداد بازه‌های زمانی مشغول بودن آن برابر است با:

$$\left\lceil \frac{\max(D_i^{local}, D_i^{d2d}, D_i^{mec})}{1} \right\rceil, i \in \mathcal{U}^n \quad (24)$$

کاربر کمک‌کننده نیز به مدت برابر با حد بالای مدت زمان پردازش وظیفه کاربر نیازمند در پردازنده خود (رابطه شماره ۵)، به عنوان کاربر مشغول لحاظ می‌شود؛ لذا تعداد بازه‌های زمانی مشغول بودن کاربر کمک‌کننده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\left\lceil \frac{D_i^{d2d-computing}}{1} \right\rceil, i \in \mathcal{U}^n \quad (25)$$

همچنین تعداد بازه‌های زمانی که ظرفیت محاسباتی اختصاصی سرویس‌دهنده به کاربر نیازمند i از دسترس خارج می‌شود از حد بالای مدت زمان پردازش وظیفه کاربر نیازمند i در سرویس‌دهنده (رابطه شماره ۹)) به دست می‌آید که برابر است با:

$$\left\lceil \frac{D_i^{mec-computing}}{1} \right\rceil, i \in \mathcal{U}^n \quad (26)$$

کاربران و ظرفیت محاسباتی اختصاصی سرویس‌دهنده در مدت زمانی که مشغول هستند، نمی‌توانند پردازش وظیفه دیگری را بر عهده بگیرند.

میزان کل انرژی مصرفی کاربر نیازمند تا پایان مدت زمان مشغول بودن، از مجموع انرژی مصرفی برای پردازش داده‌های محاسباتی در پردازنده محلی خود و انرژی مصرفی برای بارسیاری داده‌های محاسباتی به دست می‌آید:

$$E_i^{consumed} = E_i^{local} + E_i^{d2d-offloading} + E_i^{mec-offloading}, i \in \mathcal{U}^n \quad (27)$$

$E_i^{consumed}$ در پایان بازه زمانی مشغول بودن کاربر از انرژی باقی‌مانده دستگاه کاربر کسر می‌شود. همچنین مصرف انرژی کاربر کمک‌کننده با توجه به رابطه شماره (۲) به دست می‌آید و در پایان بازه زمانی مشغول بودن کاربر کمک‌کننده از انرژی دستگاه آن کسر می‌شود:

(۲): جدول پارامترهای شبکه شبیه‌سازی شده

پارامترها	بازه مقداری	پارامترها	بازه مقداری	پارامترها	بازه مقداری
L_i	[1.0, 2] (Mbit)	B	7.5 (MHz)	پارامترها	بازه مقداری
C_i	[500, 1500] (cycle/bit)	A	3	e_i	[1.0, 2] (pJ/cycle)
f_i	[1, 2] (Gcycle/s)	B	[0, 1]	E_i	[5, 6] (J)
F	40(Gcycle/s)	Θ	1.1	P	251.0 (W)
s_{max}^{d2d}	2	N_0	-174 (dbm/Hz)	I	1.0 (s)
d_{max}^{d2d}	50 (m)				

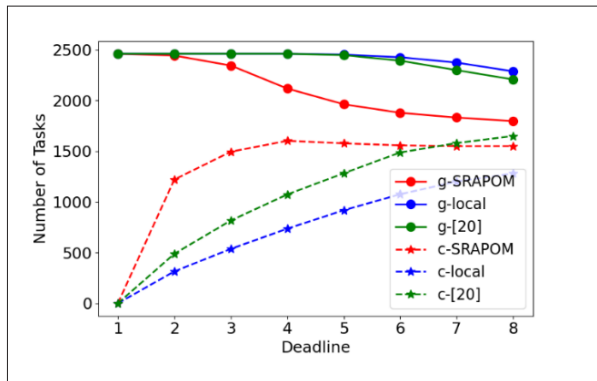
راهنمای شکل‌ها، به ترتیب وظایف تولیدشده و تکمیل‌شده را مشخص می‌کنند. لازم به ذکر است که در این آزمایش انرژی تمامی دستگاه‌ها نامحدود در نظر گرفته شده است که برای شبیه‌سازی مواریدی است که دستگاه‌ها از طریق روش‌هایی مثل برداشت انرژی از امواج الکترومغناطیسی، انرژی خورشیدی و انتقال بی‌سیم انرژی، امکان شارژ شدن پیوسته باتری دستگاه خود را دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد وظایف تکمیل‌شده با استفاده از راهکار SRAPOM همواره بیشتر از تعداد وظایف تکمیل‌شده با استفاده از دو راهکار دیگر است. علت آن این است که راهکار SRAPOM با بهره‌گیری از مزیت پردازش موازی در سه منبع پردازشی، ایجاد شانس چندباره برای پردازش وظایف و تخصیص کارآمد منابع محاسباتی و ارتباطی شبکه، ظرفیت سیستم و تعداد وظایف تکمیل‌شده کاربران را افزایش می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد در شرایط ذکر شده پس از ۲۰۰۰ بازه زمانی، راهکار SRAPOM حدود ۲۳ درصد نسبت به راهکار مرجع [۶] و حدود ۷۳ درصد نسبت به راهکار پایه‌ای بهبود داشته است.

شکل ۴ میانگین نتایج ۲۰ اجرای مختلف راهکار SRAPOM، راهکار مرجع [۶] و راهکار پایه‌ای را در مدت ۱۰۰۰ بازه زمانی با مهلت اجرای وظایف از ۱ تا ۸ بازه زمانی و در شرایطی که انرژی دستگاه‌ها محدود و مطابق با جدول ۲ است، نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود وقتی مهلت اجرای وظایف، کمتر یا برابر با ۶ بازه زمانی است،

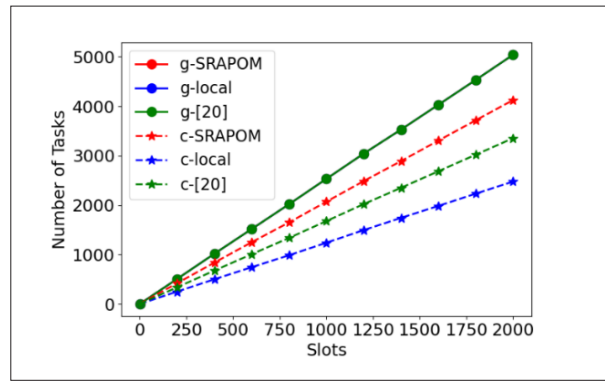
راهکار SRAPOM نسبت به دو راهکار دیگر تعداد وظایف بیشتری تکمیل می‌کند.

از جمله، وقتی مهلت اجرای وظایف ۲ بازه زمانی است، راهکار SRAPOM حدود ۱۲۰ درصد نسبت به راهکار مرجع [۶] و حدود ۳۴۰ درصد نسبت به راهکار پایه‌ای بهبود داشته است. این بیانگر آن است که راهکار پیشنهادی کارآیی بالاتری برای وظایف بیدرنگ دارد. وقتی مهلت اجرای وظایف بیشتر می‌شود، تعداد وظایف تولیدشده و به دنبال آن تعداد وظایف تکمیل‌شده راهکار SRAPOM از راهکار مرجع [۶] کمتر می‌شود که علت آن در ادامه شرح داده خواهد شد.

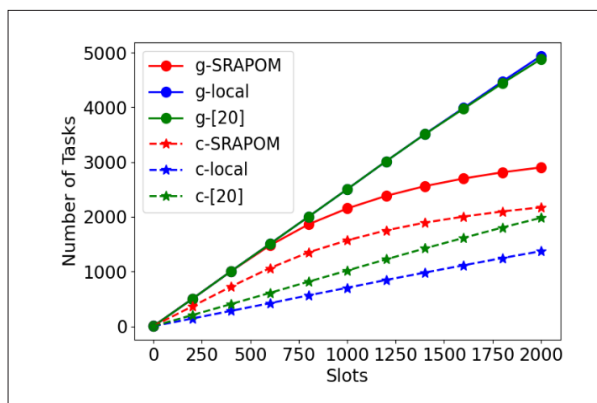
شکل‌های (۵ و ۶) آزمایش شکل ۳ را برای حالت دستگاه‌های با انرژی محدود، وقتی مهلت وظایف به ترتیب ۴ و ۷ بازه زمانی است، تکرار می‌کنند. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با گذشت زمان، وظایف تولیدشده در راهکار SRAPOM افزایش می‌یابد اما سرعت این افزایش از بازه زمانی ۶۰۰ به بعد کم می‌شود. علت آن این است که با ادامه کار سیستم، انرژی دستگاه‌ها کاهش می‌یابد و برخی از دستگاه‌ها خاموش می‌شوند؛ لذا تعداد دستگاه‌های فعالی که اقدام به تولید وظیفه می‌کنند کمتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود تعداد وظایف تکمیل‌شده راهکار SRAPOM نسبت به دو راهکار دیگر بیشتر است. علاوه بر این، در انتهای ۲۰۰۰ بازه زمانی، نسبت تعداد وظایف تولیدشده بر تکمیل‌شده در راهکار SRAPOM حدود ۴۴ درصد نسبت به راهکار مرجع [۶] و در حدود ۶۹ درصد نسبت به راهکار پایه‌ای کاهش داشته است. در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود که تعداد وظایف تکمیل‌شده راهکار SRAPOM تا بازه زمانی ۱۰۰۰ بیشتر از دو راهکار دیگر است اما از بازه زمانی ۱۰۰۰ به بعد تعداد وظایف تکمیل‌شده راهکار پیشنهادی از راهکار مرجع [۶] پایین‌تر می‌آید. علت آن این است که با توجه به هدف مسئله، راهکار SRAPOM همواره سعی می‌کند بیشترین تعداد وظایف را با توجه به محدودیت‌های زمانی وظایف و انرژی دستگاه‌ها، در ابتدای



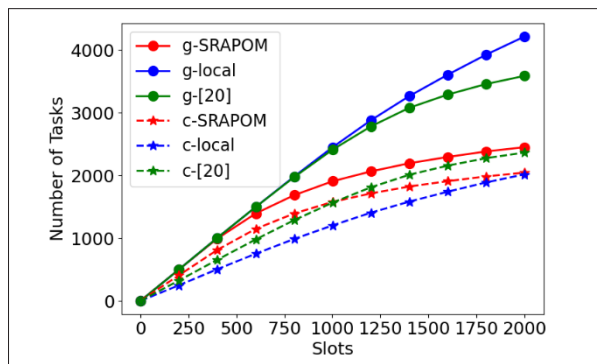
شکل (۴): تعداد وظایف تولیدشده و تکمیل‌شده در مهلت‌های متفاوت؛ میانگین ۲۰ اجرای مختلف با ۱۰۰۰ بازه زمانی و ۲۵ کاربر با انرژی محدود



شکل (۳): تعداد وظایف تولیدشده و تکمیل‌شده با گذشت زمان؛ میانگین ۲۰ اجرای مختلف ۲۵ کاربر با انرژی نامحدود



شکل (۵): تعداد وظایف تولیدشده و تکمیل‌شده با گذشت زمان، وقتی مهلت وظایف ۴ است؛ میانگین ۲۰ اجرای مختلف ۲۵ کاربر با انرژی محدود



شکل (۶): تعداد وظایف تولیدشده و تکمیل‌شده، وقتی مهلت وظایف ۷ است؛ میانگین ۲۰ اجرای مختلف ۲۵ کاربر با انرژی محدود

نحوه پردازش و بارسپاری وظایف بود که در راهکار پیشنهادی با به تعویق انداختن این مرحله به پس از تصمیم‌گیری درباره نحوه پردازش و بارسپاری وظایف، از هدر رفت منابع پیش‌گیری شد.

کار تکمیل‌کننده؛ بدیهی است که تکمیل تعداد بالای وظایف، انرژی بیشتری در سیستم مصرف خواهد کرد. بنابراین انرژی اکثر دستگاه‌ها در راهکار پیشنهادی پس از بازه زمانی ۱۰۰۰ به پایان می‌رسد و روند نمودار ثابت می‌ماند اما در دو راهکار دیگر به دلیل پایین بودن تعداد وظایف تکمیل‌شده، کاربران فعال به کار خود ادامه می‌دهند.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، این مقاله توانست با رفع معایب و مشکلات ذکر شده در بخش ۱ و افزودن مزایای جدید، راهکاری کارآتر در این زمینه ارائه کند. مشکل مطرح شده اول در مورد راهکارهای مرتبط، عدم ارائه راهکار برای حالت چندین کاربر با چندین وظیفه بود، که در این مقاله حالت چندکاربری در نظر گرفته شد که هر کاربر دارای صفی از وظایف متفاوت بود. مشکل دوم، بی‌توجهی به بهره‌گیری از پردازش موازی بود، که در راهکار پیشنهادی با توجه به این که وظایف قابلیت بخش‌بندی داشتند، کاربر تا جای ممکن وظیفه خود را اجرا می‌کرد و بخش باقی‌مانده آن را برای اجرای از راه دور به کاربر کمک‌کننده و سرویس‌دهنده رایانش لبه‌ای سیار بارسپاری می‌کرد. مشکل سوم عدم ایجاد انگیزه همکاری در کاربران کمک‌کننده بود که در راهکار پیشنهادی با بهره‌گیری از روابط اجتماعی بین کاربران، کاربران کمک‌کننده مایل به کمک‌رسانی به کاربران نیازمند با روابط اجتماعی نزدیک بودند. در نهایت مشکل آخر، تخصیص منابع پردازشی و ارتباطی پیش از تصمیم‌گیری درباره

qiu Li, Heng Qi. "D2D-Assisted Computation Offloading for Mobile Edge Computing Systems with Energy Harvesting". In 20th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT), Gold Coast, QLD, Australia, 2019.

[6] Umber Saleem, Yu Liu, Sobia Jangsher, Xiaoming Tao, Yong Li. "Latency Minimization for D2D-Enabled Partial Computation Offloading in Mobile Edge Computing". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 4, pp. 4472-4486, 2020.

[7] Zhigang Xie, Xin Song, Siyang Xu. "Peer-to-Peer Enhanced Task Scheduling for D2D Enabled MEC Network". IEEE Access, pp. 138236-138250, 2020.

[8] Umber Saleem, Yu Liu, Sobia Jangsher, Yong Li, Tao Jiang. "Mobility-Aware Joint Task Scheduling and Resource Allocation for Cooperative Mobile Edge Computing". IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 1, pp. 360-374, 2020.

[9] Xiaowen Cao, Feng Wang, Jie Xu, Rui Zhang, Shuguang Cui. "Joint Computation and Communication Cooperation for Energy-Efficient Mobile Edge Computing". IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 3, pp. 4188-4200, 2018.

[10] Chang Wang, Jinghui Qin, Xiaoxing Yang, Wushao Wen. "Energy-Efficient Offloading Policy in D2D Underlay Communication Integrated with MEC Service". In HP3C '19: Proceedings of the 3rd International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications, 2019.

[11] Yuan Kai, Junyuan Wang, Huiling Zhu. "Energy Minimization for D2D-Assisted Mobile Edge Computing Networks". In ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), Shanghai, China, 2019.

[12] Jiafa Chen, Yisheng Zhao, Zhimeng Xu, Haifeng Zheng. "Resource Allocation Strategy for D2D-Assisted Edge Computing System With Hybrid Energy Harvesting". IEEE Access, vol. 8, pp. 192643-192658, 2020.

[13] Rong Chai, Junliang Lin, Minglong Chen, Qianbin Chen. "Task Execution Cost Minimization-Based Joint Computation Offloading and Resource Allocation for Cellular D2D MEC Systems". IEEE Systems Journal, vol. 13, no. 4, pp. 4110-4121, 2019.

[14] Ramtin Ranji, Ali Mohammed Mansoor, Asmiza Abdul Sani. "EEDOS: an Energy-Efficient and Delay-Aware Offloading Scheme Based on Device to Device Collaboration in Mobile Edge Computing". Telecommunication Systems, vol. 73, pp. 171-182, 2020.

[15] Jing Li, Weifa Liang, Mengyu Chen, Zichuan Xu. "Mobility-Aware Dynamic Service Placement in D2D-Assisted MEC Environments". In IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2021.

[16] Haipeng Wang, Zhipeng Lin, Tiejun Lv. "Energy and Delay Minimization of Partial Computing Offloading for D2D-Assisted MEC Systems". In IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2021.

[17] Yuhan Yang, Chengnian Long, Jing Wu, Shaoliang Peng,

۶- نتیجه گیری

مسئله مطرح شده در این مقاله تصمیم‌گیری درباره نحوه پردازش و بارسپاری وظایف دستگاه‌ها و مدیریت منابع محاسباتی و ارتباطی شبکه به‌منظور افزایش ظرفیت سیستم بود. این پژوهش توانست با ارائه روشی مناسب در جهت افزایش ظرفیت سیستم و تعداد وظایف تکمیل‌شده کاربران، راهکاری با کارایی مناسب برای مسئله ارائه دهد. راهکار پیشنهادی در دوره‌های پردازشی کوتاه و در برابر وظایف بیدرنگ توانست کارایی مناسب‌تری نسبت به راهکار برگرفته از روش پیشنهاد شده در مرجع [۶] و راهکار پایه‌ای پردازش محلی داشته باشد. علت این برتری راهکار پیشنهادی نسبت به دو راهکار دیگر، بهره‌گیری راهکار پیشنهادی از مزیت پردازش موازی در سه منبع پردازشی مختلف، ایجاد انگیزه همکاری در کاربران کمک‌کننده، تخصیص کارآمد منابع و ایجاد شانس چندباره در تصمیم‌گیری نحوه پردازش و بارسپاری وظایف بود. اثر این موارد بر تعداد وظایف تکمیل‌شده کاربران مشاهده شد. در نتیجه هدف اصلی که افزایش ظرفیت سیستم در شبکه‌های مبتنی بر ترکیب رایانش لبه‌ای سیار و ارتباطات دستگاه به دستگاه بود، با به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی محقق شد.

مراجع

[۱] حدیقه رحیمی، محمد مهدی بابایی‌پور، ادريس ناصری‌نژاد، رضا ابراهیمی‌آتانی. "رایانش ابری، بررسی ساختار، اهداف، مزایا و چالش‌ها". در دومین کنفرانس دستاوردهای نوین در مهندسی برق و کامپیوتر، تهران، ۱۳۹۳.

[2] Nasir Abbas, Yan Zhang, Amir Taherkordi, Tor Skeie. "Mobile Edge Computing: A Survey". IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 1, pp. 450-465, 2017.

[3] Arash Asadi, Qing Wang, Vincenzo Mancuso. "A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks". IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 1801-1819, 2014.

[4] Ruidong Zhang, Wenxiao Shi, Jiadong Zhang, Wei Liu. "An Auction Scheme for Computing Resource Allocation in D2D-Assisted Mobile Edge Computing". In 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2019.

[5] Molin Li, Tong Chen, Jiabin Zeng, Xiaobo Zhou, Ke-

Bo Li. "D2D-Enabled Mobile-Edge Computation Offloading for Multiuser IoT Network". IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 16, pp. 12490-12504, 2021.

[18] Yinghui He, Jinke Ren, Guanding Yu, Yunlong Cai. "D2D Communications Meet Mobile Edge Computing for Enhanced Computation Capacity in Cellular Networks". IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 3, pp. 1750-1763, 2019.

[19] Junxu Hou, Xiaoxiang Wang, Dongyu Wang, Yanwen Lan, Zhaolin Liu. "Computation Offloading Strategy in D2D-assisted Cellular Networks with Mobile Edge Computing". In 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China (ICCC Workshops), Changchun, China, 2019.

[20] Minglei Tong, Xiaoxiang Wang, Yulong Wang, Yanwen Lan. "Computation Offloading Scheme with D2D for MEC-enabled Cellular Networks". In 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops), Chongqing, China, 2020.

[21] Muhammad Asif Khan, Emna Baccour, Aiman Erbad, Ridha Hamila, Mounir Hamdi. "CODE: Computation Offloading in D2D-Edge System for Video Streaming". IEEE Systems Journal, vol. 17, no. 3, pp. 4014-4025, 2023.

[22] Nadine Abbas , Sanaa Sharafeddine , Azzam Mourad , Chadi Abou-Rjeily, Wissam Fawaz. "Joint computing, communication and cost-aware task offloading in D2D-enabled Het-MEC". Elsevier, vol. 209, 2022.

[23] Giorgio C. Buttazzo, Hard Real-Time Computing Systems, Springer New York, NY

[24] Tse, D., Viswanath, P., Fundamentals of Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005.