

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

نوع مقاله: پژوهشی

## بهینه‌سازی دوهدفه: مصرف انرژی و عملکرد هزینه با محدودیت‌ها در محاسبات مه

الهام دربانیان

دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات - دانشگاه قم - قم - ایران  
پست الکترونیکی: e.darbanian@stu.qom.ac.ir

محسن نیکرای\*

استادیار - دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات - دانشگاه قم - قم - ایران  
پست الکترونیکی: m.nickray@qom.ac.ir

### چکیده

محاسبه مه، تکامل محاسبات ابری است که به ارائه راه‌حل‌هایی برای چالش‌های رایانش ابری مانند تأخیر، آگاهی از موقعیت مکانی و پشتیبانی از تحرک در زمان واقعی کمک می‌کند. هدف از بهینه‌سازی یافتن مقادیر متغیرهایی است که مقدار یک تابع داده شده را به حداکثر یا حداقل می‌رسانند. بسیاری از مسائل بهینه‌سازی توسط برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) مدل‌سازی می‌شود. ما مدلی را طراحی کردیم که یک مسئله بهینه‌سازی برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط در محاسبات مه است. مدل ما دو هدف دارد: افزایش عملکرد هزینه و همچنین کاهش مصرف انرژی. سپس مسئله خود را با GEKKO که یک مجموعه بهینه‌سازی با پایتون است، حل کردیم. در مرحله بعدی، با استفاده از U-NSGA-II، NSGA-II، R-NSGA-II، NSGA-III، R-NSGA-III III مدل را با Pymoo حل نمودیم. Pymoo یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه در پایتون است. سرانجام، از روش TOPSIS برای مقایسه الگوریتم‌ها با شاخص‌های مختلف (مقادیر زمان اجرا و توابع هدف) استفاده کردیم.

### واژه‌های کلیدی: محاسبات مه، بهینه‌سازی، MINLP.

مصرف انرژی، عملکرد هزینه.

### مقدمه

اینترنت اشیاء، یکی از مؤثرترین فناوری است که جهش بزرگی را در جهان ایجاد کرده است. اینترنت اشیاء با حجم زیادی از داده‌ها سروکار دارد که پردازش و ذخیره چنین داده‌هایی به راحتی امکان‌پذیر نیست. بدیهی است محاسبات ابری نقش مهمی در توسعه اینترنت اشیاء دارند که خدمات پردازش و ذخیره‌سازی داده‌های زیادی را ارائه می‌دهند. با این حال، بسیاری از برنامه‌های آن از چالش‌های رایانش ابری مانند تأخیر، عدم پشتیبانی از جابه‌جایی و آگاهی از مکان رنج می‌برند. محاسبات مه، که تقریباً به‌عنوان تکامل محاسبات ابری است، به ارائه راه‌حل‌هایی برای این چالش‌ها کمک می‌کند [۱]. موضوعی به نام «بهینه‌سازی» مربوط به حداکثرسازی و حداقل‌سازی است. در واقع، هدف از بهینه‌سازی یافتن مقادیر متغیرهایی است که مقدار یک تابع داده شده را به حداکثر یا به حداقل برسانند [۲]. در موردی که کمیت مورد نظر برای بهینه‌سازی فقط با یک تابع هدف

1- optimization

\* نویسنده مسئول

بیان شود، از این مسئله به عنوان یک مسئله تک‌هدفه<sup>۲</sup> یاد می‌شود. در غیراین صورت، یک مسئله چندهدفه<sup>۳</sup> است که باید همزمان بهینه شوند [۳]. بسیاری از مسائل مهندسی و بهینه‌سازی علوم شامل روابط ترکیبی و غیرخطی است. چنین مسائل بهینه‌سازی توسط برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط<sup>۴</sup>، که ترکیبی از قابلیت‌های برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۵</sup> و برنامه‌ریزی غیرخطی<sup>۶</sup> است، مدل‌سازی می‌شوند [۴]. در مقاله [۵]، الگوریتم‌های تکاملی<sup>۷</sup> چندهدفه از مرتب‌سازی و به اشتراک گذاری نامشخص استفاده می‌کنند. آنها عمدتاً دارای مشکلاتی مانند پیچیدگی محاسباتی، عدم رویکرد نخبه‌گرایی و نیاز به تعیین پارامتر اشتراک هستند. همچنین، یک الگوریتم چندهدفه<sup>۸</sup> مبتنی بر مرتب‌سازی غیر مغلوب چندهدفه پیشنهاد شده است که الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامحدود (NSGA-II) نامیده می‌شود. این الگوریتم مشکلات ذکر شده در بالا را کاهش می‌دهد. همچنین، این الگوریتم، در بیشتر موارد، در مقایسه با الگوریتم تکاملی پارتو و الگوریتم تکاملی قدرت-پارتو، در مقایسه با جبهه بهینه واقعی پارتو، می‌تواند گسترش بهتری از راه‌حل‌ها و همگرایی بهتر پیدا کند. علاوه بر این، تعریف تسلط برای رفع مشکلات محدود چندهدفه اصلاح شده است. برای توسعه الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۹</sup> برای مدیریت سه تا پانزده هدف و حل مسائل بهینه‌سازی، یک الگوریتم تکاملی چندهدفه مبتنی بر نقطه مرجع که از NSGA-II پیروی می‌کند، پیشنهاد شده و NSGA-III نامیده می‌شود. تمرکز این الگوریتم برای اعضای جمعیتی که مغلوب نیستند، اما نزدیک به مجموع‌های از منابع مرجع عرضه شده هستند، است [۶]. در مقاله [۷]، یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی یکپارچه<sup>۱۰</sup>، به نام U-NSGA-III، ایجاد شده است، که تغییر در یک روش بهینه‌سازی تک‌هدفه

2- uni-objective or single-objective

3- multi-objective

4- mixed-integer nonlinear programming (MINLP)

5- mixed-integer linear programming (MILP)

6- nonlinear programming (NLP)

7- evolutionary algorithms (EA)

8- multi-objective EA (MOEA)

9- unlimited sorting genetic algorithm II (NSGA-II)

10- evolutionary multi-objective optimization (EMO)

11- unified evolutionary optimization algorithm (U-NSGA-III)

تکاملی است. U-NSGA-III مسائل بهینه‌سازی تک، چند و چندین هدف<sup>۱۲</sup> را حل می‌کند (با دو تا ده هدف). یکی از ویژگی‌های این الگوریتم، توانایی یک الگوریتم بهینه‌سازی برای حل انواع مسائل به‌طور مساوی و گاه بهتر، با ویژگی اضافه شده از کنترل اندازه جمعیت است. بسته به تعداد اهداف، U-NSGA-III سعی می‌کند چندین راه‌حل بهینه پارتو پیدا کند. در مقاله [۸]، ترکیب روش‌های EMO با یک رویکرد تصمیم‌گیری چند معیار کلاسیک، یک سری راه‌حل در نزدیکی منطقه مورد نظر تصمیم‌گیرنده وجود دارد که R-NSGA-II<sup>۱۳</sup> نامیده می‌شود. رویکرد نقطه مرجع، یک روش معمول در تصمیم‌گیری چندمعیاره است، که در آن یک یا چند نقطه مرجع (بهینه‌سازی دو تا ده هدف با دو تا پنج نقطه مرجع) توسط تصمیم‌گیرنده از قبل مشخص می‌شود. هدف از انجام چنین کار بهینه‌سازی شناسایی منطقه بهینه پارتو است که نزدیک به نقاط مرجع است. نکته اصلی این مقاله استفاده از رویکرد دموگرافیک یک روش الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی چندهدفه در یافتن بیش از یک راه‌حل در کل مرز بهینه پارتو نیست که مورد توجه تصمیم‌گیرنده باشد. حتی اگر نقاط مرجع ارائه شده به مرز بهینه پارتو نزدیک نباشند، روش پیشنهادی می‌تواند نزدیک‌ترین راه‌حل‌های بهینه پارتو را به نقاط مرجع پیدا کند. در مقاله [۹]، یک نقطه مرجع پیشنهادی مبتنی بر NS-GA-II ارائه شده است تا تأکید یکنواخت‌تری در دستیابی به راه‌حل برای همه نقاط آمیزش پیشنهادی داشته باشد. روش‌های پیشنهادی برای یک هدف بهینه‌سازی کامل، که روش R-NSGA-III نامیده می‌شوند کاملاً مفید بودند. این مطالعه از چند طریق، قابل گسترش است. به دلیل فقدان راه‌حل‌های عملی یا فقدان راه‌حل‌های بهینه پارتو، ممکن است همه راه‌حل‌ها به راه‌حل‌های بهینه پارتو منجر نشوند. چنین نقاط مرجع غیر عملکردی را می‌توان در نزدیکی سایر نقاط مرجعی که قبلاً راه‌حل‌های غیر مغلوب پیدا کرده‌اند شناسایی و جابجا کرد. روش R-NSGA-III می‌تواند برای

12- mono-, multi-, and many-objective

13- non-r dominance sorting genetic algorithm II (R-NSGA-II)

اطمینان از حداقل فاصله بین راه‌حل‌های نهایی در فضای متغیر اصلاح شود.

نوآوری و دستاوردهای این کار پژوهشی به‌طور خلاصه به شرح زیر است:

- ما یک مدل محاسباتی (مدل دوهدفه) پیشنهاد می‌دهیم که در محیط محاسبات مه، با محدودیت‌های تأخیر خدمات، مصرف انرژی را به حداقل و عملکرد هزینه را به حداکثر می‌رساند.
- سپس مسئله خود را با GEKKO حل کردیم که یک مجموعه بهینه‌سازی برای پایتون است.
- در مرحله بعدی، با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II، NSGA-III، R-NSGA-II، و R-NSGA-III مدل را با استفاده از Pymoo حل کردیم. Pymoo یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه در پایتون است.
- سرانجام، از روش TOPSIS برای مقایسه نتایج الگوریتم‌ها با شاخص‌های مختلف (مقادیر زمان اجرا و توابع هدف) استفاده کردیم.

## ۲. کارهای مرتبط

وو و همکاران [۱۰] تصمیم مشترک بارگذاری و چارچوب بهینه‌سازی تخصیص منابع را برای محاسبات لبه همراه<sup>۱۴</sup> با الگوریتم‌های ROP<sup>۱۵</sup> و IBBA<sup>۱۶</sup> پیشنهاد کردند. ROP بر اساس روش نقطه داخلی و IBBA بر اساس الگوریتم انشعاب و تحدید است که کل انرژی مصرفی را به حداقل می‌رساند و تمام نیازهای تأخیر برای کاربران تلفن همراه را برآورده می‌کند. چن و همکاران [۱۱] به یک سیستم عمومی محاسبات ابر همراه<sup>۱۷</sup> متشکل از چندین کاربر و یک کارساز ابر از راه دور پرداختند تا تصمیمات مربوط به بارگذاری و تخصیص منابع ارتباطی را به دست آورند. آن‌ها از یک برنامه درجه دوم محدود چهار درجه‌ای

غیرقابل محذب<sup>۱۸</sup>، الگوریتم چندکاربره بارگیری چندکاره<sup>۱۹</sup> و یک الگوریتم چندکاربره بارگیری چندکاره سه مرحله‌ای با الگوریتم نقطه دسترسی محاسبات استفاده کردند. چن و همکاران [۱۲] یک سیستم محاسبات ابر همراه را با چند کاربر، یک نقطه دسترسی محاسبات<sup>۲۰</sup> و یک کارساز ابر از راه دور مطالعه کرده‌اند. آنها برای به حداقل رساندن کل وزن هزینه انرژی، محاسبات و حداکثر تأخیر در بین همه کاربران، رویکرد جدیدی را برای بارگذاری کار مشترک و تخصیص منابع محاسبات و ارتباطات، الگوریتم ابتکاری کارآمد با استفاده از SDR<sup>۲۱</sup> و رویکرد جدید نقشه برداری تصادفی پیشنهاد کردند. دوو و همکاران [۱۳] با بهینه‌سازی مشترک تصمیم‌گیری درباره بارگذاری و تخصیص منابع با استفاده از الگوریتم تخصیص منابع و بارگذاری محاسبات<sup>۲۲</sup>، الگوریتم روش دوبخشی برای تخصیص منابع محاسباتی<sup>۲۳</sup>، انصاف حداقل-حداکثر<sup>۲۴</sup> را در سیستم محاسبات مه / ابری بررسی کرده‌اند. دوو و همکاران [۱۴] چارچوبی را برای بهینه‌سازی بارگذاری محاسبات، تخصیص منابع محاسباتی، تخصیص الگوی بلوک منبع<sup>۲۵</sup>، تخصیص توان انتقال و چارچوب الگوریتم عمومی با پیچیدگی کم FAJORA<sup>۲۶</sup> پیشنهاد داده‌اند تا آن را به چندین زیر مسئله تجزیه کند. ترن و همکاران [۱۵] یک راهبرد جامع برای بارگذاری کار مشترک و تخصیص منابع در یک شبکه چند سلولی محاسبات لبه همراه ارائه دادند. برای بهینه‌سازی مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط، آنها مسئله اصلی را به یک مسئله تخصیص منابع با تصمیم بارگیری کار ثابت و یک مسئله بارگذاری کار فرموله کردند. همچنین یک الگوریتم ابتکاری جدید برای مسئله بارگیری کار در زمان چند جمله‌ای پیشنهاد دادند. ونگ و همکاران [۱۶]، یک شبکه محاسباتی تعاونی

18- quadratically constrained quadratic program (QCQP)  
19- MultiUser Multi-Task Offloading (MUMTO)  
20- Computing Access Point (CAP)  
21- Semi Definite Relaxation  
22- Computation Offloading And Resource Allocation (CORA)  
23- Bisection Method For Computation Resource Allocation (BCRA)  
24- min-max fairness  
25- Resource Block (RB)  
26- Framework Fireworks Algorithm Based Joint Computation Offloading And Resource Allocation Algorithm (FAJORA)

14- Mobile Edge Computing  
15- Relaxing Optimization Policy  
16- Index Branch-and-Bound Algorithm  
17- Mobile Cloud Computing (MCC)

سه لایه با استفاده از همکاری عمودی بین دستگاه‌ها، گره های لبه‌ای و سرویس‌دهنده‌های ابری با روش جهت متناوب ضرایب<sup>۲۷</sup> و تفاوت برنامه‌نویسی توابع محدب در نظر گرفته‌اند. لی و همکاران [۱۷] بر بهینه‌سازی محاسبه و تخصیص منابع ارتباطی در شبکه‌های اینترنت اشیا بی‌سیم مبتنی بر محاسبات مه با دسترسی چندگانه غیرمتعامد<sup>۲۸</sup> متمرکز شدند. طرح پیشنهادی آنها تصمیم بهینه برای انتخاب حالت محاسبات مناسب را بهینه کرده است. مسئله بهینه‌سازی فرموله شده یک مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط است و سپس الگوریتم ژنتیک بهبود یافته<sup>۲۹</sup> برای حل آن با پیچیدگی کم معرفی شده است. باروس و همکاران [۱۸] از محاسبات مه با تأخیر کم برای انجام کنترل انرژی الکتریکی در میکروشبکه استفاده کردند. محاسبات مه ارائه شده خدمات مدیریتی از جمله کنترل کننده محاسبات مشتق یکپارچه متناسب<sup>۳۰</sup> و الگوریتم‌های برنامه‌ریزی برای لوازم خانگی به منظور کاهش مبلغ قبض با استفاده از مشتق یکپارچه متناسب است. کاراتاس و همکاران [۱۹]، محاسبات ابر و مه برای قرار دادن و سرویس‌دهی کارآمد داده‌های اینترنت اشیا، راهبردهای قرار دادن داده‌ها و الگوریتم‌هایی برای کاهش تأخیر متوسطی که توسط برنامه‌های کاربردی وابسته به رده‌بندی داده‌ها به انواع مختلف با استفاده از واحدهای محاسباتی مه<sup>۳۱</sup> ارائه داده‌اند. نگوین و همکاران [۲۰] الگوریتم بهینه با پیچیدگی کم برای بارگذاری محاسبات مشترک و تخصیص منابع برای سیستم محاسبات ابری متحرک مبتنی بر چند-ورودی چند-خروجی<sup>۳۲</sup> با در نظر گرفتن اطلاعات حالت کانال-عالی<sup>۳۳</sup> و اطلاعات حالت کانال-غیرعالی<sup>۳۴</sup> ایجاد کردند. الگوریتم‌های بهینه و با پیچیدگی کم برای حل برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط اساسی ارائه شده است. ونگ و همکاران [۲۱] بهینه‌سازی

27- Alternating Direction Method Of Multipliers (ADMM)

28- non-orthogonal multiple access (NOMA)

29- Improved Genetic Algorithm (IGA)

30- Proportional Integral Derivative (PID)

31- Fog Computing Unit (FCU)

32- multiple-input multiple-output (MIMO)

33- Perfect- Channel State Information (P-CSI)

34- imperfect-CSI (IPCSI)

تصمیم بارگذاری، قابلیت محاسبات محلی و تخصیص منابع محاسباتی گره مه را در نظر گرفتند. آنها این مسئله را به دو زیرمسئله مستقل تجزیه کردند و یک الگوریتم تصمیم برای بارگذاری حداقل تأخیر مبتنی بر الگوریتم مخلوط ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید<sup>۳۵</sup> برای حل این مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط با پیچیدگی کم طراحی شده است. مایا و همکاران [۲۲]، مسئله قرارگیری برون‌خط سرویس‌های اینترنت اشیا که از مقیاس‌گذاری افقی و عمودی پشتیبانی می‌کنند را در یک محیط محاسباتی لبه‌ای بررسی کرده‌اند. آنها یک مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط را فرموله کردند و برای حل آن یک روش خطی و مبتنی بر ژنتیک ارائه دادند. ژوو و همکاران [۲۳] مسئله منع را بررسی کردند و یک مسئله بهینه‌سازی آن را فرموله کردند تا مجموع وزنی تاخیرهای کاربران را مطابق با تعیین تکلیف به حداقل برسانند. همچنین الگوریتم مبتنی بر بازی ائتلاف<sup>۳۶</sup> پیشنهاد شده است. فام و همکاران [۲۴]، یک الگوی محاسبه لبه چند دسترسی با کمک وسیله نقلیه مقیاس‌پذیر<sup>۳۷</sup> پیشنهاد داده‌اند. آنها مسئله انتخاب گره مشترک و تخصیص منابع را ارائه داده و مسئله را به صورت برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط فرموله کرده و با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی جایگزین، راه حل را ارائه داده‌اند. بی و همکاران [۲۵] بهینه‌سازی مشترک جایگذاری پنهان سرویس، تصمیمات بارگذاری محاسبه و تخصیص منابع سیستم را مطالعه کردند. آنها مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط پیچیده را به یک مسئله خالص ۰-۱ برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح<sup>۳۸</sup> تبدیل کردند و الگوریتم‌های پیچیدگی کاهش یافته را پیشنهاد دادند. همچنین یک حداقل‌سازی متناوب را نیز طراحی کردند. فورتی و همکاران [۲۶]، یک روش اعلانی، SecFog، که می‌تواند برای ارزیابی کمی سطح امنیت استقرار برنامه‌های چند سرویس در

35- Hybrid of genetic and simulated annealing algorithm (HGSA)

36- coalition game based algorithm

37- Scalable Vehicle-Assisted Multi-Access Edge Computing (SVMEC)

38- Integer Linear Programming (ILP)

زیرساخت‌های ابر-مه استفاده شود ارائه دادند و فرمول برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط از مسئله قرار دادن سرویس‌های برنامه با هدف تأمین محدودیت تأخیر در انتها-به-انتها استفاده کردند. فرجی و همکاران [۲۷]، یک چارچوب محاسباتی توزیع شده برای مدیریت منابع خودمختار در زمینه محاسبات مه ارائه دادند. سپس، آنها از یک سیستم تأمین خدمات اینترنت اشیا مبتنی بر حلقه کنترل (پایش، تجزیه و تحلیل، برنامه ریزی، اجرا و دانش) با یک روش یادگیری تقویت کننده و پشتیبانی از روش رگرسیون برداری استفاده کردند. ونگ و همکاران [۲۸]، یک مسئله بهینه‌سازی مشترک را به‌عنوان برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط از تصمیم بارگذاری، توانایی محاسبات محلی و تخصیص منابع محاسباتی گره مه، برای به حداقل رساندن زمان اتمام کار با محدودیت انرژی، در کانال بی‌سیم و گره مه فرموله کرده‌اند. آنها الگوریتم تصمیم‌گیری بارگذاری مبتنی بر تبرید شبیه‌سازی ژنتیکی ترکیبی را برای بهینه‌سازی تصمیم بارگذاری ارائه دادند. در مقالات [۲۹-۳۱] که در محیط مه شبیه‌سازی شده‌اند، به ترتیب هزینه کلی دستگاه کاربر، نسبت تحویل بسته و مقدار کل انرژی و انحراف بار، بهینه شده‌اند. تروانه و همکاران [۳۲]، یک الگوریتم قرار دادن برنامه دوهدفه را برای محیط‌های محاسباتی مه پیشنهاد کردند. الگوریتم پیشنهادی به دنبال قرار دادن بهینه پودمان‌های برنامه بر روی دستگاه‌های مه زیرین با در نظر گرفتن سطوح بحرانی برنامه‌ها و الزامات امنیتی است. مسئله قرار دادن به‌عنوان یک مسئله کوله‌پشتی دوهدفه فرموله شده است و با استفاده از NSGA-II حل شده است. سلیمیان و همکاران [۳۳]، یک چارچوب محاسباتی مفهومی مبتنی بر میان‌افزار کنترل مه-ابر برای قرار دادن بهینه خدمات اینترنت اشیا پیشنهاد دادند. در اینجا، این مسئله به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خودکار برای مدیریت درخواست‌های خدمات به دلیل برخی محدودیت‌ها که ناهمگونی برنامه‌ها و منابع را در نظر می‌گیرد، فرموله می‌شود. برای حل مسئله

قرار دادن خدمات اینترنت اشیا، یک رویکرد تکاملی خودکار مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات با هدف حداکثر کردن استفاده از منابع مه و بهبود کیفیت خدمات پیشنهاد شده است. عزیزی و همکاران [۳۴]، به‌صورت ریاضی مسئله زمان‌بندی کار را برای به حداقل رساندن مصرف انرژی کل گره‌های مه در حالی که الزامات کیفیت خدمات وظایف اینترنت اشیا را برآورده می‌کند، فرموله کردند. همچنین به حداقل رساندن زمان نقض مهلت در مدل را در نظر گرفته‌اند. در مرحله بعد، دو الگوریتم مبتنی بر نیمه‌حریص، یعنی نیمه‌حریص آگاه از اولویت<sup>۳۹</sup> و نیمه‌حریص آگاه از اولویت با رویه چندشروع را برای ترسیم کارآمد وظایف اینترنت اشیا به گره‌های مه پیشنهاد دادند. در جدول (۱)، اهداف، شبکه، محیط، مزایا و معایب کارهای مرتبط آورده شده است.

### ۳- مدل شبکه

با توجه به مقاله وو و همکاران [۳۵]، شکل (۱) یک سیستم محاسبات مه سه لایه را با  $N$  دستگاه موبایل  $M, N = \{1, \dots, N\}$  گره‌های مه مشترک  $Ml = \{1, \dots, M\}$  و یک کارساز ابر  $V$  که می‌تواند به‌طور مستقیم توسط تمام دستگاه‌های تلفن همراه در دسترس باشد (به‌عنوان مثال، کارساز ابر با ایستگاه مبنا در یک مکان قرار گرفته است) نشان می‌دهد. یک کار می‌تواند به‌وسیله یک وسیله سیار به یکی از گره‌های مه یا ابر از طریق یک گره مه یا مستقیماً به کارساز ابری  $V$  بارگذاری شود.

توضیح پارامترها در جدول (۲) آورده شده است. در هر بازه زمانی، کاربر موبایل  $i$  می‌تواند درخواست بارگذاری کار محاسباتی  $(D_i^l, D_i^o, C_i, t_i^l)$  را داشته باشد. تنها واجدین شرایط پردازش این کار، دستگاه موبایل، گره‌های مه، یا کارساز ابری که الزام تأخیر را برآورده می‌کند، هستند.

39- priority-aware semi-greedy (PSG)

جدول ۱: کارهای مرتبط

منبع	اهداف	شبکه و محیط	مزایا	معایب
وو و همکاران [۱۰]	انرژی و تأخیر	محاسبات لبه همراه پیکربندی	الگوریتم‌های پیشنهادی بر اساس روش نقطه داخلی و الگوریتم انشعاب و تحدید است که کل انرژی مصرفی را به حداقل می‌رساند و تمام نیازهای تأخیر برای کاربران تلفن همراه را برآورده می‌کند.	توان انتقال بهینه را نادیده گرفته‌اند.
چن و همکاران [۱۱]	انرژی و تأخیر	محاسبات ابر همراه شبیه‌سازی	این مقاله، بارگذاری کار را بهینه‌سازی کرده است تا هزینه کلی انرژی، محاسبات و تأخیر برای برنامه‌های متشکل از چندین کار مستقل را به حداقل برساند.	فرض شده است که فقط یک کارساز از راه دور برای بارگذاری کار وجود دارد.
چن و همکاران [۱۲]	انرژی و تأخیر	محاسبات ابر همراه شبیه‌سازی	نویسندگان، کل هزینه وزنی انرژی، محاسبات و حداکثر تأخیر را در بین تمام کاربران در مدل شبکه سه لایه به حداقل می‌رسانند.	فرض بر این است که چندین کاربر تلفن همراه وجود دارد که هر کدام فقط یک کار دارند.
دوو و همکاران [۱۳]	هزینه، انرژی و تأخیر	سیستم مه / ابری شبیه‌سازی	بارگذاری و تخصیص منابع با روش تضمین انصاف حداقل-حداکثر حل شده است. نویسندگان مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط را در نرم افزار MATLAB بهینه‌سازی کردند.	فقط دسترسی چندگانه متعادل در نظر گرفته شده است.
دوو و همکاران [۱۴]	بارگذاری، تخصیص منابع محاسباتی، الگوی بلوک منبع و توان انتقال	سیستم محاسبات مه و ابر شبیه‌سازی	الگوریتم‌های همگرا و موثر پیشنهاد شده است.	اگر استاندارد LTE اصلی به عنوان یک راه حل در نظر گرفته شود، پشتیبانی از این فرآیندها از نظر استفاده از منابع، هزینه بر خواهد بود.
ترن و همکاران [۱۵]	سود بارگذاری کار کاربران با کاهش در زمان تکمیل کار و مصرف انرژی	محاسبات لبه همراه شبیه‌سازی	نویسندگان برای بهینه‌سازی مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط، مسئله اصلی را به یک مسئله تخصیص منابع با تصمیم‌گیری کار ثابت و یک مسئله بارگذاری کار فرموله کردند. همچنین یک الگوریتم ابتکاری جدید برای مسئله بارگیری کار در زمان چند جمله‌ای پیشنهاد دادند.	این کار شبکه فوق متراکم را در نظر نمی‌گیرد.
ونگ و همکاران [۱۶]	تصمیم‌بارگذاری و تخصیص منابع محاسباتی با حداقل میانگین مدت زمان کار	محاسبات همراه شبیه‌سازی	یک شبکه محاسباتی تعاونی سه لایه با استفاده از همکاری عمودی بین دستگاه‌ها، گره‌های لبه‌ای و سرویس‌دهنده‌های ابری با روش جهت متناوب ضرایب و تفاوت برنامه‌نویسی توابع محدب در نظر گرفته شده است.	تأخیر بارگذاری محاسباتی به صورت افقی در میان گره‌های مه تأخیر قابل توجهی بر تکمیل کار دارد زمانی که گره‌های مه برای پردازش کار با یکدیگر همکاری می‌کنند.
لی و همکاران [۱۷]	انرژی و تأخیر	محاسبات مه شبیه‌سازی	طرح تصمیم بهینه شده برای انتخاب مدل محاسباتی مناسب پیشنهاد شده است. مسئله بهینه‌سازی فرموله شده یک مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط بوده است و سپس یک الگوریتم ژنتیک بهبود یافته برای حل آن با پیچیدگی کم معرفی شده است.	در تخصیص کار در شبکه‌های اینترنت اشیاء، تحرک در نظر گرفته نشده است.
باروس و همکاران [۱۸]	کنترل تقاضای توان و مدیریت تولید توان و زمان پاسخگویی	محاسبات مه شبیه‌سازی	از محاسبات مه با تأخیر کم برای انجام کنترل انرژی الکتریکی در میکروشبکه استفاده شده است. محاسبات مه ارائه شده خدمات مدیریتی از جمله کنترل کننده محاسبات مشتق یکپارچه متناسب و الگوریتم‌های برنامه‌ریزی را ارائه داده‌اند.	از آنجایی که سطح اشباع شبکه یک مسئله مهم است انتخاب یک رسانه ارتباطی با پهنای باند مناسب برای حجم زیادی از انتقال داده بین لایه‌های مه و ابر مهم است.
کاراتاس و همکاران [۱۹]	تأخیر و هزینه‌های ذخیره‌سازی	سیستم مه / ابری شبیه‌سازی	راهبردهای قرار دادن داده‌ها و الگوریتم‌هایی برای کاهش میانگین تأخیر که برنامه‌ها با آن روبرو هستند.	در این کار از راهبرد قرارگیری برنامه ایستا برای مه استفاده شده است.
نگوین و همکاران [۲۰]	انرژی و تأخیر	محاسبات لبه-ابر متحرک شبیه‌سازی	الگوریتم‌های بهینه و با پیچیدگی کم برای حل یک مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه شده است.	این کار به‌طور جداگانه شبکه و منابع ارتباطی را مورد بحث قرار داده است و معمولاً به‌طور مستقل روی یکدیگر متمرکز شده‌اند.
ونگ و همکاران [۲۱]	طرح تخصیص منابع، زمان اتمام و تأخیر	محاسبات مه شبیه‌سازی	بهینه‌سازی تصمیم‌بارگذاری، قابلیت محاسبات محلی و تخصیص منابع محاسباتی گره مه پیشنهاد شده است.	استفاده از روش‌های جستجوی حریم‌صانه سنتی چالش برانگیز است.
مایا و همکاران [۲۲]	توزیع بار و قرار دادن خدمات مقیاس پذیر و کیفیت خدمات	محاسبات مه شبیه‌سازی حقیقی	یک مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط فرموله شده است و برای حل آن یک روش خطی و مبتنی بر ژنتیک ارائه داده شده است.	سرویس برخط در نظر گرفته نشده است.
ژوو و همکاران [۲۳]	تأخیر، مدیریت منابع و مکانیسم ارتباط کاربر	محاسبات لبه همراه شبیه‌سازی	این مقاله مجموع وزنی تأخیرهای کاربران را با تعیین تکلیف به حداقل می‌رساند. همچنین، الگوریتم مبتنی بر بازی ائتلاف پیشنهاد شده است.	فقط تأخیرهای انتقال و تأخیرهای اجرا در نظر گرفته شده است و تأخیرهای صف در نظر گرفته نشده است.



فام و همکاران [۲۴]	افزایش مقیاس پذیری و کاهش هزینه	محاسبات لبه همراه شبیه سازی	مسئله انتخاب گره مشترک و تخصیص منابع ارائه شد و مسئله برنامه نویسی غیر خطی عدد صحیح مختلط فرموله شد. راه حل با استفاده از تکنیک های بهینه سازی جایگزین به دست آمده است.
بی و همکاران [۲۵]	انرژی و تاخیر	محاسبات لبه همراه شبیه سازی	هدف یافتن طرح مناسب قرار دادن خدمات با توجه به محدودیت های مختلف بود. نویسندگان نشان دادند که مسئله به طور کلی NP سخت است و الگوریتم های تقریب عامل ثابت را پیشنهاد می کنند.
فورتی و همکاران [۲۶]	امنیت	زیرساخت های ابر- لبه شبیه سازی	یک روش بیانی، SecFog، ارائه شد.
فرجی و همکاران [۲۷]	مدیریت منابع و کیفیت خدمات	محاسبات مه شبیه سازی	از یک سیستم تأمین خدمات اینترنت اشیا مبتنی بر حلقه کنترل با یک روش یادگیری تقویت کننده و پشتیبانی از روش رگرسیون برداری استفاده شده است.
ونگ و همکاران [۲۸]	زمان و انرژی	محاسبات مه شبیه سازی	از الگوریتم تصمیم گیری بارگذاری مبتنی بر تبرید شبیه سازی ژنتیکی ترکیبی برای بهینه سازی تصمیم بارگذاری ارائه شده است.
بای و همکاران [۲۹]	بارگذاری محاسبات مشترک و انرژی	محاسبات مه شبیه سازی	این مقاله تحقیقات بهینه سازی مشترک برای محاسبات مه را برجسته می کند، که یک الگوریتم بارگذاری محاسبات مشترک، فشرده سازی داده ها، برداشت انرژی و سناریوهای کاربردی را پیشنهاد می کند.
حمید و همکاران [۳۰]	انرژی و کارایی	محاسبات مه شبیه سازی	یک رویکرد متعادل سازی بار مبتنی بر ظرفیت خوشه ای برای انجام محاسبات توزیع شده مه خودرو با آگاهی از انرژی و عملکرد برای پردازش کارآمد مشاغل اینترنت اشیا پیشنهاد شده است.
قان و همکاران [۳۱]	انرژی و متعادل سازی بار	محاسبات مه شبیه سازی	هدف از این مطالعه ارائه روشی مناسب مبتنی بر آگاهی انرژی برای متعادل سازی بار در شبکه های موقت وسایل نقلیه مبتنی بر مه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ترکیبی یعنی به کارگیری بهینه سازی کلونی مورچه ها و کلنی زنبورهای مصنوعی است.
تروانه و همکاران [۳۲]	نیازهای حیاتی و امنیتی برنامه	محاسبات مه شبیه سازی	مسئله قرار دادن برنامه برای محیط های محاسباتی مه به عنوان یک مسئله کوله پشتی دوهدفه فرموله شده است و با استفاده از NSGA-II حل شده است.
سلیمیان و همکاران [۳۳]	استفاده از منابع مه و بهبود کیفیت خدمات	محاسبات مه شبیه سازی	برای حل مسئله قرار دادن خدمات اینترنت اشیا، یک رویکرد تکاملی خودکار مبتنی بر بهینه سازی ازدحام ذرات با هدف حداکثر کردن استفاده از منابع مه و بهبود کیفیت خدمات پیشنهاد شده است.
عزیزی و همکاران [۳۴]	انرژی و کیفیت خدمات	محاسبات مه شبیه سازی	دو الگوریتم مبتنی بر نیمه حریص، یعنی نیمه حریص آگاه از اولویت و نیمه حریص آگاه از اولویت با رویه چندشروع برای ترسیم کارآمد وظایف اینترنت اشیا به گره های مه پیشنهاد شده است.

(۱) پردازش محلی: دستگاه موبایل  $I$  دارای میزان پردازش  $f_i^l$  چرخه در ثانیه است. اگر کار  $I_i$  به صورت محلی پردازش شود، زمان انجام کار به صورت زیر است:

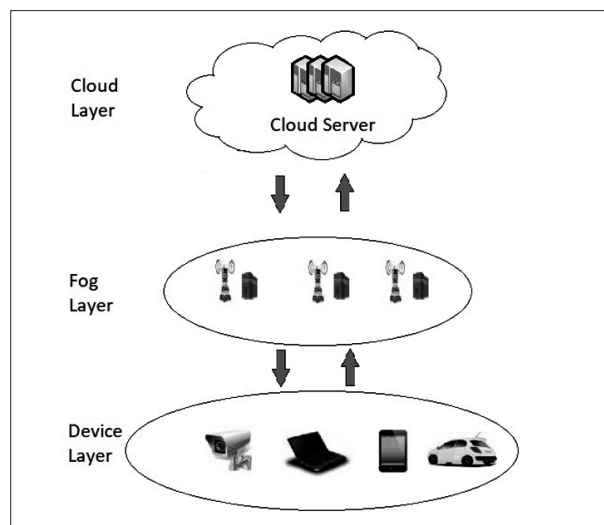
$$f_i^l / C_i = T_i^l \quad (1)$$

انرژی مصرفی  $E_i^l$  دستگاه موبایل متناسب با چرخه های CPU مورد نیاز برای کار  $I_i$  است و توسط

$$v_i C_i = E_i^l \quad (2)$$

که در آن  $v_i$  نشان دهنده انرژی مصرفی در هر چرخه CPU است.

(۲) پردازش گره مه: گره مه  $J$  دارای قابلیت هایی



شکل ۱: معماری شبکه محاسبات مه

جدول ۲: توضیح پارامترها

پارامتر	توضیح
$D_i^i$	ورودی (شامل داده ورودی و کد اجرا)
$D_i^o$	طول داده‌های خروجی / نتیجه
$C_i$	تعداد چرخه‌های پردازنده مورد نیاز برای اجرای کار
$t_i^r$	حداکثر تاخیر مورد نیاز کار
$f_i^l$	میزان پردازش دستگاه تلفن همراه $A$ (چرخه در ثانیه)
$T_i^l$	زمان انجام کار
$E_i^l$	انرژی مصرفی دستگاه همراه (متناسب با چرخه های پردازنده مورد نیاز برای کار $I_i$ )
$v_i$	انرژی مصرف شده در هر چرخه پردازنده
$R_j^u$	میزان uplink کل
$R_j^d$	میزان downlink کل
$R_j^f$	میزان چرخه پردازنده
$r_{ij}$	منابع طیف و محاسبات برای دستگاه تلفن همراه $i$
$r_{ij}$	منابع طیف و محاسبات برای دستگاه تلفن همراه $i$
$r_{ij}^f, r_{ij}^d, r_{ij}^u$	میزان downlink, uplink و چرخه CPU برای ورودی، انتقال خروجی و اجرای کار
$e_{ij}^u$	مصرف انرژی برای انتقال یک واحد داده
$e_{ij}^d$	مصرف انرژی برای دریافت یک واحد داده
$T_{ij}^f$	تاخیر دستگاه همراه
$E_{ij}^f$	انرژی مصرفی دستگاه موبایل
$w^c$	میزان داده بین گره مه و سرور ابری
$f^c$	میزان پردازش اختصاص داده شده به هر کار در کارساز ابری

است که با یک چندتایی  $(R_j^u, R_j^d, R_j^f)$  نشان داده می‌شوند که در آن  $R_j^u, R_j^d, R_j^f$  به ترتیب میزان کلی uplink, downlink و چرخه CPU هستند. اگر کار  $I_i$  در گره مه  $J$  پردازش شود، آنگاه این گره طیف و منابع محاسبه را برای دستگاه موبایل  $i$ ، تعریف شده توسط یک چندتایی  $r_{ij} = (r_{ij}^u, r_{ij}^d, r_{ij}^f)$  اختصاص خواهد داد، که در آن  $r_{ij}^u, r_{ij}^d, r_{ij}^f$  به ترتیب دارای میزان‌های uplink, downlink و چرخه CPU برای انتقال‌های ورودی، خروجی، و اجرای کار هستند. در این حالت، مصرف انرژی در کاربر موبایل هم برای انتقال ورودی و هم دریافت خروجی از گره مه  $J$  است، و تاخیر شامل زمان ارسال ورودی، دریافت خروجی و پردازش کار در گره مه است.

فرض کنید  $e_{ij}^u$  و  $e_{ij}^d$  به ترتیب مصرف انرژی برای انتقال و دریافت یک واحد داده را نشان دهد. تاخیر زمانی  $T_{ij}^f$  و انرژی مصرفی  $E_{ij}^f$  دستگاه موبایل به صورت زیر است:

$$T_{ij}^f = D_i^i / r_{ij}^u + D_i^o / r_{ij}^d + C_i / r_{ij}^f \quad (3)$$

و

$$E_{ij}^f = E_{ij}^u + E_{ij}^d \quad (4)$$

که در آن  $E_{ij}^d = e_{ij}^d D_i^o$  و  $E_{ij}^u = e_{ij}^u D_i^i$  است.

(۳) پردازش سرورس‌دهنده ابر: بدون از دست دادن کلیت، می‌توانیم فرض کنیم که تمام گره‌های مه به یک کارساز ابر عمومی متصل شده‌اند.

اگر گره مه  $J$  کار  $I_i$  را به کارساز ابر ارسال کند، منابع را برای دستگاه موبایل  $i$  اختصاص خواهد داد، که توسط یک چندتایی  $r_{ij} = (r_{ij}^u, r_{ij}^d, r_{ij}^f)$  تعریف شده است  $r_{ij}^f=0$  است.

بعد از دریافت کار، گره  $J$  داده‌های ورودی را برای پردازش به کارساز ابر می‌فرستد. سپس نتیجه را دریافت کرده و به کاربر موبایل می‌فرستد. در این حالت، انرژی مصرفی  $E_{ij}^c$  در کاربر موبایل و تاخیر  $T_{ij}^c$  برابرند با:

(۵)

$$T_{ij}^c = D_i^i / r_{ij}^u + D_i^o / r_{ij}^d + (D_i^i + D_i^o) / w^c + C_i / f^c$$

و

$$E_{ij}^c = E_{ij}^f = E_{ij}^u + E_{ij}^d \quad (6)$$

چون ابر، در بالاترین ردیف است، نمی‌تواند کارش را به ردیف بالاتر انتقال دهد. این مسئله با تنظیم تاخیر متناظر به نامحدود تحقق می‌یابد:  $T_{i(M+1)}^c = \infty$ . مصرف کل انرژی  $E_{i(M+1)}^c$  به صورت ثابت تنظیم شده است.

متغیرهای تصمیم‌تخلیه کردن دودویی برای کار  $I_i = (x_i^l, x_{i1}^f, \dots, x_{i(M+1)}^f, x_{i1}^c, \dots, x_{i(M+1)}^c)$  است که  $x_i^l = 1$  و  $x_{ij}^f = 1$  و  $x_{ij}^c = 1$  به ترتیب نشان می‌دهند که کار  $I_i$  در دستگاه موبایل، گره مه  $J$ ، یا سرورس‌دهنده ابر پردازش می‌شود. فرض کنید  $h_i = (T_i^l, T_{i1}^f, \dots, T_{i(M+1)}^f, T_{i1}^c, \dots, T_{i(M+1)}^c)$  است.

از معادله‌های (۱)، (۳) و (۵)، تاخیر زمانی که کار  $I_i$  پردازش می‌شود برابر است با:

$$x_i + h_i^T = T_i \quad (7)$$

فرض کنید  $e_i = (E_i^l, E_{i1}^f, \dots, E_{i(M+1)}^f, E_{i1}^c, \dots, E_{i(M+1)}^c)$



باشد. از معادله (۲)، (۴) و (۶)، انرژی  $E_i$  مصرف شده کاربر موبایل هنگام پردازش کار  $I_i$  به عنوان معادله زیر استفاده می شود

$$x_i e_i^T = E_i \quad (۸)$$

با فرض  $e = (e_1, \dots, e_N)$  و  $x = (x_1, \dots, x_N)$  انرژی مصرفی دستگاه های موبایل به صورت زیر است:

$$E = e^T x \quad (۹)$$

هدف مقاله ما، به حداقل رساندن مصرف انرژی کل تمام دستگاه های موبایل تحت حداکثر تاخیر است که یک مسئله مشترک تصمیم گیری تخلیه کردن (X) و تخصیص منابع ( $r = \{r_{ij}\}$ ) می باشد:

$$(P_0) \min_{x,r} e^T x, \quad (۱۰)$$

که محدودیت ها ( $R_0$ ) برابر است با:

$$\begin{cases} (C1) T_i \leq t_i^r, \forall i \in N \\ (C2) \sum_{i=1}^N r_{ij}^f \leq R_j^f, \forall j \in M^*, \\ (C3) \sum_{i=1}^N r_{ij}^u \leq R_j^u, \forall j \in M^*, \\ (C4) \sum_{i=1}^N r_{ij}^d \leq R_j^d, \forall j \in M^*, \\ r_{ij}^f, r_{ij}^u, r_{ij}^d \geq 0, \forall (i, j) \in N \times M^* \end{cases} \quad (۱۱)$$

و محدودیت ضرایب ( $X_0$ ) برابر است با:

$$\begin{cases} (C5) x_i^l + \sum_{j=1}^{M+1} x_{ij}^f + x^c = 1, \forall i \in N, \\ x_i^l, x_{ij}^f, x_{ij}^c \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in N \times M^* \\ (C6) t_i^l < t_i^r \\ (C7) t_{i,j}^c < t_i^r \\ (C8) t_{i,j}^f < t_i^r \end{cases} \quad (۱۲)$$

جایی که (C1) حداکثر تأخیر کار است، (C2)، (C3) و (C4) محدودیت منابع در گره های ما، (C5) محدودیت تصمیم بارگذاری است و (C6) تا (C8) نشان می دهد که تاخیر کار برای هر دستگاه تلفن همراه نباید از حداکثر مقدار ( $t_i^r$ ) بیشتر باشد.

با توجه به فرمول های ارائه شده در مقاله گو و همکاران [۳۶]، درآمد ارائه دهنده خدمات (ابر)، باعث ارائه خدمات بهتر برای کاربران عضو می شود. همچنین عامل دیگر برای اندازه گیری کارایی سیستم، قیمت پیشنهادی است که از کاربران به عنوان سود / درآمد اتخاذ می کنیم. قیمت پیشنهادی هر کاربر، به زمان تاخیر  $T_{ij}$  و اندازه داده

آن  $D_i^i$  و  $D_i^o$  وابسته است که یک رابطه خطی بین آن و اندازه داده ها و معکوس حداکثر تاخیر را فرض می کنیم. بنابراین پیشنهاد هر کاربر برابر است با:

$$O_{ij} = f(D_i^i, D_i^o, T_{ij}) \quad (۱۳)$$

که در آن تابع  $f$  باید یک تابع افزایشی یکنوا برای  $D_i^i$  و  $D_i^o$  و تابع کاهش یکنوا برای  $T_{ij}$  باشد. برای سادگی، ما از تابع زیر برای تعریف  $f(D_i^i, D_i^o, T_{ij})$  استفاده می کنیم:

$$O_{ij} = a \frac{D_i^i + D_i^o}{T_{ij}} \quad (۱۴)$$

که در آن  $a$  یک پارامتر با واحد dollar/Mbps است و  $O_{ij}$ ، قیمتی است که کاربر دستگاه موبایل  $i$  در صورت سازگاری با  $V$  می پردازد. چون  $V$  به بیش از یک کاربر خدمت می کند، در نتیجه بیش از یک پیشنهاد را دریافت می کند. درآمد  $V$ ، مجموع پیشنهادها از همه کاربران تعریف می شود. به خاطر سادگی فرض می کنیم که هزینه  $V$  مربوط به مصرف برق انتقال و نگهداری آن در این کار ثابت است. در درآمد  $V$ ، تاثیر هزینه خدمات ثابت را نادیده می گیریم.

هدف سیستم در مقاله ما، هزینه - کارایی (CP) نامگذاری شده است. CP به عنوان نسبت بین میانگین میزان داده هر کاربر و هزینه قیمت آن با واحد Mbps/sec/dollar تعریف می شود. مقدار تاخیر واقعی، با اندازه داده  $D_i^o$  و  $D_i^i$  مرتبط است که باید منتقل و پردازش شود. سپس، برای ضریب هزینه، از پرداخت / پیشنهاد کاربر برای سرویس محاسبه می شود. ما مربوطه که آن را به دست می آورند، استفاده می شود. در نتیجه ما تابع هزینه - کارایی را برای ترکیب دو عامل در یک معیار، برای هر کاربر تعریف کرده ایم که بیانگر کیفیت خدمات است که کاربر برای آن هزینه پرداخت می کند. سیستم CP ( $CP_{sys}$ )، برابر است با:

$$CP_{sys} = \frac{\sum_{u_i \in U} CP_{ij}}{N} \quad (۱۵)$$

جایی که  $CP_{ij}$  ارزش CP برای هر کاربر دستگاه موبایل  $i$  است و به صورت زیر نشان داده می شود:

$$CP_{ij} = \frac{(D_i^i + D_i^o)}{O_{ij}} \left( \frac{x_i^l}{t_i^l} + \frac{x_{ij}^f}{t_{ij}^f} + \frac{x^c}{t^c} \right) \quad (۱۶)$$

مسئله بهینه‌سازی مقاله ما به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\text{Max } CP_{ij} = \sum_{i,j} \frac{(D_i^l + D_i^o)}{o_{ij}} \left( \frac{x_i^l}{t_i^l} + \frac{x_{ij}^f}{t_{ij}^f} + \frac{x^c}{t^c} \right) \quad (17)$$

$$x_{ij}^f \times t_{ij}^f < t_i^r \quad (18)$$

$$\sum_{i,j} x_{ij}^f r_{ij}^f \leq R_j^f \quad (19)$$

$$\sum_{i,j} x_{ij}^f r_{ij}^u \leq R_j^u \quad (20)$$

$$\sum_{i,j} x_{ij}^f r_{ij}^d \leq R_j^d \quad (21)$$

که (۱۷) هدف سیستم است و هزینه - کارایی کلی سیستم را برای کاربران نشان می‌دهد. (۱۸) بیانگر این است که هر کاربری که خدمت گرفته است، تاخیر کار آن کمتر از حداکثر تاخیر مورد نیاز کار ( $t_i^r$ ) باشد. در (۱۹)، (۲۰) و (۲۱)، هر کاربری که خدمت گرفته است مجموع میزان‌های چرخه uplink، CPU، و downlink برای انتقال‌های ورودی، خروجی و اجرای کار تمام کاربران باید کمتر از میزان چرخه CPU ( $R_j^f$ )، میزان کلی uplink و میزان کلی downlink باشد.

اگر به جای  $O_{ij}$  در معادله (۱۷)، مقدار معادل آن را یعنی معادله (۱۴) قرار دهیم، عبارت زیر را به دست می‌آوریم:

$$\text{Max } CP_{ij} = \sum_{i,j} \frac{(D_i^l + D_i^o)}{\frac{D_i^l + D_i^o}{a} \frac{T_{ij}}{T_{ij}}} \left( \frac{x_i^l}{t_i^l} + \frac{x_{ij}^f}{t_{ij}^f} + \frac{x^c}{t^c} \right) \quad (22)$$

پس از ساده‌سازی، معادله به شرح زیر است:

$$\text{Max } CP_{ij} = \sum_{i,j} \frac{T_{ij}}{a} \left( \frac{x_i^l}{t_i^l} + \frac{x_{ij}^f}{t_{ij}^f} + \frac{x^c}{t^c} \right) \quad (23)$$

مقادیر  $T_{ij}$  و  $a$  ثابت هستند. ما مقدار  $T_{ij}$  را برابر با مقدار ثابت می‌دانیم. از آنجا که مقدار  $\frac{T_{ij}}{a}$  ثابت است، ما آن را از تابع هدف نهایی حذف می‌کنیم.

بنابراین اولین تابع هدف این است:

$$\text{Min}_{x,r} e^T x \quad (24)$$

و دومین تابع هدف:

$$\text{Max } \sum_{i,j} \left( \frac{x_i^l}{t_i^l} + \frac{x_{ij}^f}{t_{ij}^f} + \frac{x^c}{t^c} \right) \quad (25)$$

است.

جدول ۳: پارامترهای آزمایشی [۳۵]

پارامتر	مقدار
میزان پردازنده دستگاه‌های تلفن همراه $f_i^l$	0.5 Giga cycles/s
پردازش میزان مصرف انرژی $v_i$	1000/730 J/Giga cycles
اندازه داده ورودی $D_i^l$	U(a, b) MB
اندازه داده خروجی $D_i^o$	U(c, d) MB
چرخه‌های CPU مورد نیاز $C_i$	$a_i \times D_i^l$
واحد مصرف انرژی انتقالی به گره مه ( $\forall j < M$ )	0.142 J/Mb
واحد مصرف انرژی دریافتی به گره مه ( $\forall j < M$ )	0.142 J/Mb
واحد مصرف انرژی انتقالی به سرویس دهنده ابر $V e_{i(M+1)}^u$	0.658 J/Mb
واحد مصرف انرژی دریافتی به سرویس دهنده ابر $V e_{i(M+1)}^d$	0.278 J/Mb
حداکثر تأخیر $t_i^r$	[1, 10]s
سرعت پردازش هر گره مه $R_j^f$	10 Giga cycles/s
میزان داده Uplink هر گره مه $R_j^u$	72 Mbps
میزان داده Downlink هر گره مه $R_j^d$	72 Mbps
میزان CPU سرویس دهنده ابر $f^c$	10 Giga cycles/s
میزان داده بین گره‌های مه و ابر $w^c$	5 Mbps

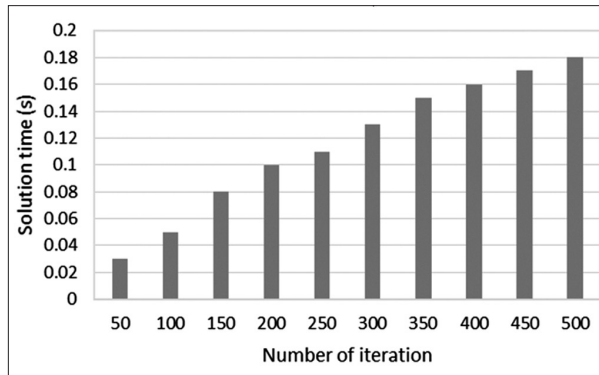
#### ۴. حل مسئله

پارامترهای آزمایشی در جدول (۳) نشان داده شده است.

GEKKO یک مجموعه بهینه‌سازی و کتابخانه شیء‌گرا در پایتون است. این کتابخانه مسائل بهینه‌سازی پویا را برای معادلات جبری مختلط، غیرخطی و دیفرانسیل<sup>۴</sup> حل می‌کند. وقتی عبارات عینی متعدد وجود داشته باشد، تمام اصطلاحات اهداف در یک عبارت بهینه‌سازی خلاصه می‌شوند تا یک راه حل بهینه تولید شود [۳۷].

GEKKO مسائل را به صورت تک‌هدفه حل می‌کند. بنابراین نیاز است مسئله را به یک مسئله تک‌هدفه تبدیل کنیم. برای این کار ما از روش وزندهی استفاده کردیم. معادله (۲۶) دو هدف دارد: افزایش عملکرد هزینه و کاهش مصرف انرژی. از آنجا که یکی از اهداف مسئله حداکثرسازی است، برای دستیابی به هدف نهایی مسئله

40- Differential Algebraic Equations (DAE)

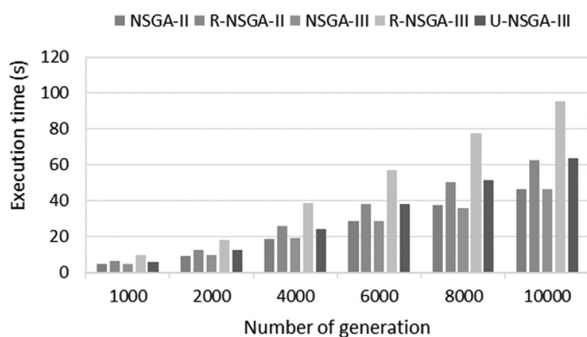


شکل ۳: مقادیر زمان حل در تعداد تکرارها

تابع هدف	تعداد نسلها	NSGA-II	R-NSGA-II	NSGA-III	R-NSGA-III	U-NSGA-III
اول	1000	-2.39	-2.39	-2.39	-2.49	-2.39
	2000	-1.92	-1.92	-1.92	-2.60	-1.92
	4000	-2.15	-2.15	-2.15	-2.61	-2.15
	6000	-2.36	-1.58	-2.36	-2.41	-1.61
	8000	-1.44	-1.44	-1.44	-2.50	-1.41
	10000	-2.17	-2.17	-2.17	-2.65	-2.17
دوم	-1000	4.09	4.09	4.09	5.15	4.09
	10000	4.09	4.09	4.09	5.15	4.09

جدول ۵: مقادیر زمان اجرا

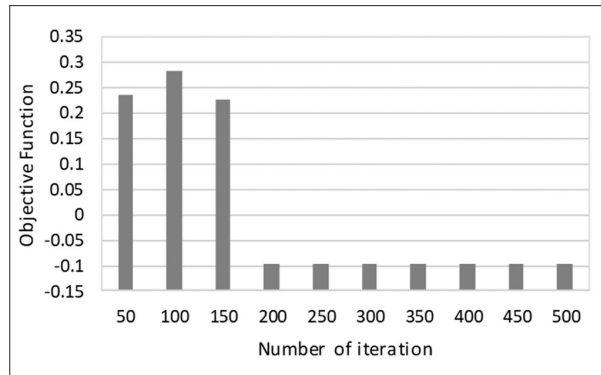
تعداد نسلها	NSGA-II	R-NSGA-II	NSGA-III	R-NSGA-III	U-NSGA-III
1000	4.77	6.36	4.61	9.81	5.95
2000	9.44	12.47	9.58	18.08	12.53
4000	18.81	25.74	19.07	38.80	24.34
6000	28.54	38.00	28.62	56.90	37.92
8000	37.42	50.34	36.12	77.66	51.45
10000	46.53	62.65	46.67	95.54	63.40



شکل ۴: مقادیر زمان اجرا در تعداد نسلها

### ۶. ارزیابی

با حل کردن معادله (۲۶) با GEKKO، حداقل مقدار تابع



شکل ۲: مقادیر تابع هدف در تعداد تکرارها

که به حداقل رساندن عملکرد هدف است، باید در یک منفی، ضرب شوند. بنابراین تابع هدف نهایی که باید با GEKKO حل شود به صورت:

$$\text{Min } e^T x + (-1) \times \sum_{i,j} \left( \frac{x_i^l}{t_{ij}^l} + \frac{x_{ij}^f}{t_{ij}^f} + \frac{x^c}{\epsilon^c} \right) \quad (26)$$

است. برای حل تابع هدف با GEKKO، ما تعداد کاربران تلفن همراه را ۳، تعداد گره‌های مه ۱ و تعداد ابر را ۱ در نظر گرفتیم که تعداد متغیرها ۱۳۶ و تعداد معادلات ۲۴ می‌شود. ما نتایج مربوط به تابع هدف و زمان حل را در شکل (۲) و شکل (۳) به دست آوردیم.

### ۵. پیاده‌سازی الگوریتم‌ها

مدل پیشنهادی با استفاده از Pymoo با استفاده از R-NSGA-III، NSGA-III، R-NSGA-II، NSGA-II و U-NSGA-III اجرا شد. Pymoo یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه در پایتون است. همچنین، به نیازهای عملی، مانند موازی‌سازی ارزیابی عملکردها، روش‌های تجسم فضاها، کم و بعد بالا و ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره پاسخ می‌دهد [۲۸]. Pymoo می‌تواند مسائل را به صورت چندهدفه حل کند. نتایج مربوط به مقدار تابع هدف و زمان اجرای این الگوریتم‌ها به ترتیب در جدول (۴) و جدول (۵) آورده شده است. معادله (۲۴) تابع هدف شماره یک است و (۲۵) تابع هدف شماره دو است. مقدار تابع هدف شماره دو برای تمام نسلها یکسان به دست آمد. مقادیر زمان حل در تعداد نسلها در شکل (۴) آورده شده است.

جدول ۶: نتایج روش TOPSIS

الگوریتم‌ها	زمان اجرا	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
NSGA-II	4/77	2/39	4/09
R-NSGA-II	6/36	2/39	4/09
NSGA-III	4/61	2/39	4/09
R-NSGA-III	95/54	2/65	5/15
U-NSGA-III	5/95	2/39	4/09
نرمال‌سازی			
NSGA-II	0/050	0/44	0/42
R-NSGA-II	0/066	0/44	0/42
NSGA-III	0/048	0/44	0/42
R-NSGA-III	0/993	0/48	0/53
U-NSGA-III	0/062	0/44	0/42
تعیین کردن گزینه‌ها			
A+	0/0048	0/198	0/2385
A-	0/0993	0/216	0/189
تعیین فاصله			
		D+	D-
NSGA-II	0/05	0/1	
R-NSGA-II	0/05	0/1	
NSGA-III	0/05	0/1	
R-NSGA-III	0/1	0/05	
U-NSGA-III	0/05	0/1	
نمره			
NSGA-II			0/22
R-NSGA-II			0/22
NSGA-III			0/22
R-NSGA-III			0/05
U-NSGA-III			0/22

جدول ۷: تعداد نسل‌ها، زمان اجرا، مقادیر توابع هدف اول و

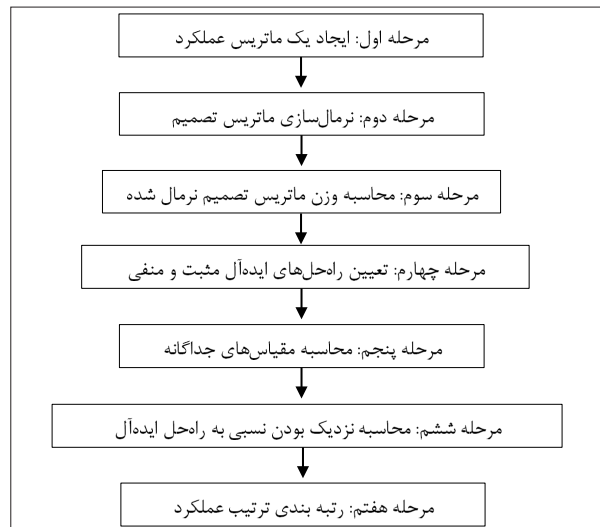
دوم و نمره در روش TOPSIS

الگوریتم‌ها	تعداد نسل‌ها	زمان اجرا	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	نمره در روش TOPSIS
NSGA-II	1000	4/77	2/39	4/09	0/22
R-NSGA-II	1000	6/36	2/39	4/09	0/22
NSGA-III	1000	4/61	2/39	4/09	0/22
R-NSGA-III	10000	95/54	2/65	5/15	0/05
U-NSGA-III	1000	5/95	2/39	4/09	0/22

در جدول (۷)، تعداد نسل‌ها، زمان اجرا، مقادیر توابع هدف اول و دوم و نمره در روش TOPSIS برای بهترین مقادیر توابع هدف به دست آمده، در کنار هم آمده است.

### ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ما یک مدل دوهدفه در محاسبات مه طراحی کردیم که دو هدف داشت (افزایش عملکرد هزینه و کاهش مصرف انرژی). سپس مسئله بهینه‌سازی خود را با GEKKO حل کردیم. همچنین، با استفاده از الگوریتم‌های



شکل ۵: روش TOPSIS [۳۹]

هدف ۰/۰۹۸- به دست آمد. با توجه به نتایج اجرای Pymoo در جدول (۴) برای تابع هدف (۲۴) و تابع هدف (۲۵)، کمترین مقدار برای هر دو تابع هدف در مجموع، مقدار ۲,۳۹- برای تابع هدف شماره یک و مقدار ۴/۰۹ برای تابع هدف شماره دو به دست آمد. برای مطالعه و مقایسه دقیق الگوریتم‌های پیشنهادی، از تصمیم‌گیری با چندین معیار استفاده شده است. روش تصمیم‌گیری چندصفت<sup>۴۱</sup> یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است که از روش TOPSIS برای مقایسه الگوریتم‌ها با شاخص‌های مختلف استفاده می‌شود. در TOPSIS، وزن، اهمیت و ویژگی را برای انتخاب بهترین روش تعیین می‌کند. در این مدل، ما دو شاخص زمان اجرا و مقدار توابع هدف را در نظر می‌گیریم. در این مقاله ما یک وزن ۰/۴۵ برای توابع هدف شماره یک و دو و یک وزن ۰/۱ برای زمان اجرا در نظر گرفتیم زیرا به طور مثال، توابع هدف برای ما دارای ارزش مساوی و بیشتر از زمان پاسخ اهمیت داشت. روش TOPSIS شامل مراحل زیر در شکل (۵) است:

نتایج اجرای روش TOPSIS در جدول (۶) ارائه شده است. مطابق جدول (۶)، NSGA-II، R-NSGA-II، NSGA-III و R-NSGA-III با تقریب یک صدم با نمره ۰,۲۲ در یک رتبه قرار دارند و R-NSGA-III با نمره ۰,۰۵ در رتبه بعدیست.

41- Multiple Attribute Decision Making (MADM)

11. Chen, Meng-Hsi, Ben Liang, and Min Dong. "Multi-user multi-task offloading and resource allocation in mobile cloud systems." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17.10 (2018): 6790-6805.
12. Chen, Meng-Hsi, Min Dong, and Ben Liang. "Resource sharing of a computing access point for multi-user mobile cloud offloading with delay constraints." *IEEE Transactions on Mobile Computing* 17.12 (2018): 2868-2881.
13. Du, Jianbo, et al. "Computation offloading and resource allocation in mixed fog/cloud computing systems with min-max fairness guarantee." *IEEE Transactions on Communications* 66.4 (2018): 1594-1608.
14. Du, Jianbo, et al. "Enabling low-latency applications in LTE-A based mixed fog/cloud computing systems." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68.2 (2018): 1757-1771.
15. Tran, Tuyen X., and Dario Pompili. "Joint task offloading and resource allocation for multi-server mobile-edge computing networks." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68.1 (2018): 856-868.
16. Wang, Yue, et al. "Cooperative task offloading in three-tier mobile computing networks: An ADMM framework." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68.3 (2019): 2763-2776.
17. Li, Xi, et al. "Optimizing resources allocation for fog computing-based Internet of Things networks." *IEEE Access* 7 (2019): 64907-64922.
18. Barros, Eric Bernardes C., et al. "Fog Computing Model to Orchestrate the Consumption and Production of Energy in Microgrids." *Sensors* 19.11 (2019): 2642.
19. Karatas, Firat, and Ibrahim Korpeoglu. "Fog-based data distribution service (F-DAD) for internet of things (IoT) applications." *Future Generation Computer Systems* 93 (2019): 156-169.
20. Nguyen, Ti Ti, Long Le, and Quan Le-Trung. "Computation offloading in MIMO based mobile edge computing systems under perfect and imperfect CSI estimation." *IEEE Transactions on Services Computing* (2019).
21. Wang, Qian, and Siguang Chen. "Latency-minimum offloading decision and resource allocation for fog-enabled Internet of Things networks." *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* (2020): e3880.
22. Maia, Adyson M., et al. "Optimized placement of scalable iot services in edge computing." 2019 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM). IEEE, 2019.
23. Zhou, Jizhe, Xing Zhang, and Wenbo Wang. "Joint resource allocation and user association for heterogeneous services in multi-access edge computing networks." *IEEE Access* 7 (2019): 12272-12282.
24. Pham, Xuan-Quy, et al. "Joint node selection and resource allocation for task offloading in scalable vehicle-assisted multi-access edge computing." *Symmetry* 11.1 (2019): 58.
25. Bi, Suzhi, Liang Huang, and Ying-Jun Angela Zhang. "Joint Optimization of Service Caching Placement and Computation Offloading in Mobile Edge Computing Sys-

R-NSGA-III، NSGA-III، R-NSGA-II، NSGA-II و U-NSGA-III مدل را با Pymoo حل کردیم. سرانجام، از روش Topsis برای مقایسه الگوریتم‌ها استفاده کردیم. طبق نتایج Topsis، NSGA-II، R-NSGA-II، NSGA-III و U-NSGA-III با تقریب یک صدم با نمره ۰/۲۲ در یک رتبه قرار دارند و R-NSGA-III با نمره ۰/۰۵ در رتبه بعدیست. برای کارهای آینده، توابع هدف بیشتری می‌توانند به مدل اضافه شوند و همچنین می‌توان صفات بیشتری را برای مقایسه اضافه کرد.

### مراجع

1. Javadzadeh, Ghazaleh, and Amir Masoud Rahmani. "Fog computing applications in smart cities: A systematic survey." *Wireless Networks* 26.2 (2020): 1433-1457.
2. Cottle, Richard, and Mukund N. Thapa. *Linear and nonlinear optimization*. Vol. 253. Springer, 2017.
3. Alexandropoulos, Stamatios-Aggelos N., et al. "Multi-objective evolutionary optimization algorithms for machine learning: A recent survey." *Approximation and Optimization*. Springer, Cham, 2019. 35-55.
4. Muts, Pavlo, Ivo Nowak, and Eligius MT Hendrix. "The decomposition-based outer approximation algorithm for convex mixed-integer nonlinear programming." *Journal of Global Optimization* (2020): 1-22.
5. Deb, Kalyanmoy, et al. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." *IEEE transactions on evolutionary computation* 6.2 (2002): 182-197.
6. Deb, Kalyanmoy, and Himanshu Jain. "An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints." *IEEE transactions on evolutionary computation* 18.4 (2013): 577-601.
7. Seada, Haitham, and Kalyanmoy Deb. "A unified evolutionary optimization procedure for single, multiple, and many objectives." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 20.3 (2015): 358-369.
8. Deb, Kalyanmoy, and J. Sundar. "Reference point based multi-objective optimization using evolutionary algorithms." *Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*. 2006.
9. Vesikar, Yash, Kalyanmoy Deb, and Julian Blank. "Reference point based NSGA-III for preferred solutions." 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). IEEE, 2018.
10. Vu, Thai T., et al. "Offloading energy efficiency with delay constraint for cooperative mobile edge computing networks." 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2018.



- application placement in fog computing environments.” Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing 13.1 (2022): 445-468.
33. Salimian, Mahboubeh, Mostafa Ghobaei-Arani, and Ali Shahidinejad. “An evolutionary multi-objective optimization technique to deploy the IoT Services in fog-enabled Networks: an autonomous approach.” Applied Artificial Intelligence (2022): 1-34.
  34. Azizi, Sadoon, et al. “Deadline-aware and energy-efficient IoT task scheduling in fog computing systems: A semi-greedy approach.” Journal of network and computer applications 201 (2022): 103333.
  35. Vu, Thai T., et al. “Optimal Energy Efficiency with Delay Constraints for Multi-layer Cooperative Fog Computing Networks.” arXiv preprint arXiv:1906.03567 (2019).
  36. Gu, Yunan, et al. “Joint radio and computational resource allocation in IoT fog computing.” IEEE Transactions on Vehicular Technology 67.8 (2018): 7475-7484.
  37. Beal, Logan DR, et al. “Gekko optimization suite.” Processes 6.8 (2018): 106.
  38. Blank, Julian, and Kalyanmoy Deb. “pymoo: Multi-objective Optimization in Python.” IEEE Access 8 (2020): 89497-89509.
  39. Sánchez-Lozano, Juan M., et al. “Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain.” Renewable and sustainable energy reviews 24 (2013): 544-556.
26. Forti, Stefano, Gian-Luigi Ferrari, and Antonio Brogi. “Secure cloud-edge deployments, with trust.” Future Generation Computer Systems 102 (2020): 775-788.
  27. Faraji Mehmandar, Mohammad, Sam Jabbehdari, and Hamid Haj Seyyed Javadi. “A dynamic fog service provisioning approach for IoT applications.” International Journal of Communication Systems 33.14 (2020): e4541.
  28. Wang, Qian, and Siguang Chen. “Latency-minimum offloading decision and resource allocation for fog-enabled Internet of Things networks.” Transactions on Emerging Telecommunications Technologies (2020): e3880.
  29. Bai, Wenle, Ziyang Ma, Yulong Han, Menglong Wu, Zhongyuan Zhao, Mengkun Li, and Chengcai Wang. “Joint Optimization of Computation Offloading, Data Compression, Energy Harvesting, and Application Scenarios in Fog Computing.” IEEE Access 9 (2021): 45462-45473.
  30. Hameed, Ahmad Raza, Saif ul Islam, Ishfaq Ahmad, and Kashif Munir. “Energy-and performance-aware load-balancing in vehicular fog computing.” Sustainable Computing: Informatics and Systems 30 (2021): 100454.
  31. Qun, Ren, and Seyedeh Maryam Arefzadeh. “A new energy-aware method for load balance managing in the fog-based vehicular ad hoc networks (VANET) using a hybrid optimization algorithm.” IET Communications (2021).
  32. Al-Tarawneh, Mutaz AB. “Bi-objective optimization of

## تراوش های ذهنی

۲۵ شیوه نگرش به هوش مصنوعی

ترجمه: ابراهیم نقیبزاده مشایخ



## جدیدترین کتاب

از انتشارات انجمن انفورماتیک ایران

منتشر شد!

# تراوش های ذهنی

تهیه کتاب از دفتر انجمن انفورماتیک ایران

(۶۶۴۱۲۸۶۱) و فروشگاه اینترنتی چاره

[www.chare.ir](http://www.chare.ir)

قیمت ۴۰/۰۰۰ تومان