

## محاسبه کوتاهترین مسیرهای بهینه سبز در سیستم‌های مه سایبر فیزیکی

محسن حیدریان

Heydarian@azaruniv.ac.ir دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

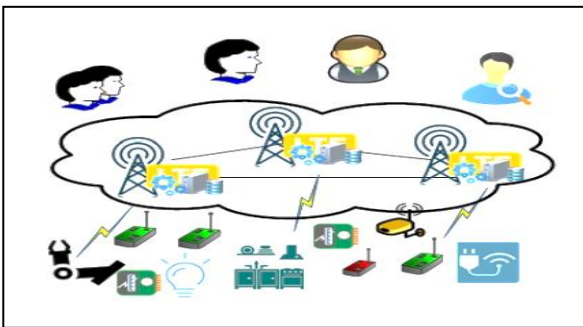
### چکیده

استفاده از فناوری محاسبات ابری در محیط‌های اینترنت اشیا، فناوری محاسبات مه را ابداع نمود. هر چند محاسبات مه یک رویکرد مفید و موثر برای اجرای برنامه های هوشمند در محیط‌های سایبر فیزیکی است، اما این فناوری از چالش‌های مهمی نیز رنج می‌برد. یکی از این چالش‌های مهم، دستیابی به بهره‌وری در انرژی مصرفی و تحقق استانداردهای انرژی سبز است. محقق نمودن استانداردهای سبز در محاسبات مه تضمین می‌کند این فناوری نوین، آلاینده‌گی محیط زیست را کاهش داده و ترافیک‌دهی را با مصرف انرژی کمتر و تولید دی اکسید کربن کمتر منتقل نماید. لذا در این مقاله ضمن مطالعه روشهای ارایه شده قبلی، با ارائه یک معماری جدید بهینه و اعمال آن به روشهای موجود، یک روش جدید برای کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های مه ارائه خواهیم نمود. روش جدید که مبتنی بر برنامه ریزی خطی صحیح است، به اختصار *Optimal Power-Rate Routing Solution (OPRRS)* نامیده شده و مصرف انرژی در مسیرهای انتقال و پردازشگر داده را کمینه می‌کند. مثالهای کامپیوتری نشان می‌دهد که روش جدید در مقایسه با روشهای قبلی مصرف انرژی در محیط‌های مه سایبر فیزیکی را به نحو مطلوبی کاهش می‌دهد.

### کلید واژه:

شبکه سبز، شبکه مه، سیستم‌های سایبر فیزیکی، انرژی سبز، برنامه ریزی خطی صحیح

باشد [۲۹، ۳۰]. محاسبات مه، به دلیل ماهیت توزیع شدگی جغرافیایی خود، یک پلتفرم ایده آل برای خدمات و اپلیکیشن های CPS سبز است.



شکل ۱: نمونه‌ای از سیستم سایبر فیزیکی [۲۵، ۲۶]. سیستم های خودکار خودرویی، خلبان خودکار، پزشک خودکار و سیستم های اینترنت اشیا نمونه‌هایی از سیستم های سایبر فیزیکی هستند.

اولاً، با اختصاص خدمات نزدیک به منابع داده یا کاربرها، محاسبات مه به طور قابل ملاحظه‌ای بار سنگین روی ابر را رفع کرده و کیفیت خدمات را از جمله با کاهش تاخیر خدمات، بهبود می‌بخشد. دوماً، محاسبات مه می‌تواند مزیت بهره‌وری انرژی داشته باشد. گره‌های مه در سرتاسر محیط توزیع می‌شوند و می‌توانند از منابع انرژی محلی مانند خورشید و باد، انرژی سبز به دست بیاورند که گامی مهم برای سبز شدن این شبکه‌ها است [۳۰]. در CPS ها، مطابق شکل ۲، دستگاه‌های مختلف، داده‌های خام مختلف را تولید می‌کنند. داده های خام

### مقدمه

امروزه سیستم‌های سایبر فیزیکی در حوزه‌های مختلفی مانند کشاورزی، تولید، نظارت، مراقبت پزشکی و کنترل استفاده می‌شوند [۲۵ و ۲۶] که کاهش مصرف انرژی قهوه‌ای و افزایش مصرف انرژی سبز در آنها امری حیاتی است. تولید و مصرف انرژی سبز، دوستدار محیط زیست بوده و تولید دی اکسید کربن را کاهش می‌دهد و نقطه مقابل انرژی قهوه ای است. یک CPS<sup>۱</sup> به عنوان شبکه‌ای از خدمات پایه در نظر گرفته می‌شود که با توجه به مفاهیم از پیش تعیین شده، نیاز به محاسبات مختلف، برقراری ارتباط و ذخیره‌سازی منابع را بصورت سیستماتیک برآورده می‌کند. در شکل ۱: نمونه‌ای از سیستم سایبر فیزیکی [۲۵، ۲۶] نشان داده شده است.

اپلیکیشن‌های CPS با بهره‌گیری از امکاناتی که محاسبات ابری ارائه می‌دهد، امروزه گسترش روزافزونی دارند. ولی مشکلاتی مانند تاخیر انتقال، مشکلات پهنای باند و ارتباطات ناپایدار بین منابع داده و مراکز داده وجود دارد که موجب افزایش مصرف انرژی قهوه‌ای در آنها می‌شود [۲۷، ۲۸].

محاسبات مه، سرویس‌های مشابه ابری را در لبه شبکه ارائه می‌دهد و به عنوان جایگزینی برای محاسبات ابر سنتی به وجود آمده است که می‌تواند امیدی برای سبز کردن این شبکه‌ها

<sup>۱</sup> Cyber Physical System

اهداف اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

- با توجه به تنوع در مصرف انرژی سبز، مسئله نحوه قرارگیری نسخه‌های متفاوت خدمات دهنده سایبر فیزیکی با بهره‌وری انرژی و تضمین کیفیت خدمات مطالعه می‌شود.
- کنترل نرخ منابع، توازن بار و نحوه قرارگیری نسخه‌های خدمات در گره‌های مه، توسط بهینه‌سازی خطی مطالعه و مدل‌سازی می‌شود. برنامه ریزی خطی در این تحقیق از نوع مدل‌سازی خطی صحیح است.
- معماری و روش جدید ما بر کوتاهتر کردن مسیرها و افزایش نرخ انتقال آنها تمرکز می‌کند و تلاش می‌کند انتقال داده و پردازش داده‌ها را با صرف انرژی کمتر انجام دهد.

ادامه مقاله به این صورت است. بخش دوم در مورد شرح مسئله است. بخش سوم در مورد روش‌های موجود، بخش چهارم مربوط به معماری و روش جدید و بخش پنجم نیز در مورد محاسبات کامپیوتری و آزمایش‌ها و بخش ششم هم در مورد نتیجه‌گیری و ارائه تحقیقات آینده است.

### شرح مسئله و اصطلاحات آن بدون مکانیزم شامل متغیر زمان و اولویت بندی بهینه خدمات

برای درک بهتر مساله، ما آن را در قالب یک مثال کوچک معرفی می‌کنیم. مثالی شامل ۳ منبع داده، ۴ عدد خدمات و ۳ مقصد ارائه می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه اصطلاحات مورد نیاز در تحقیق تشریح می‌شود [۱، ۲۸، ۲۹، ۳۰]:

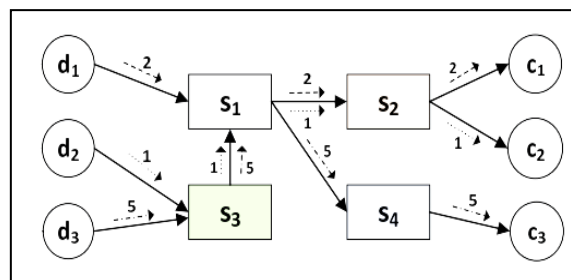
**منبع داده<sup>۲</sup>:** هر گره یا سنسوری که می‌تواند داده تولید کند و با نرخ و جریان مشخصی این داده‌ها را به شبکه ارسال کند.

**خدمت:** هر نوع سرویس یا وظیفه‌ای که بر اساس معماری شبکه و درخواست کاربر بر روی داده تولید شده قابل انجام است.

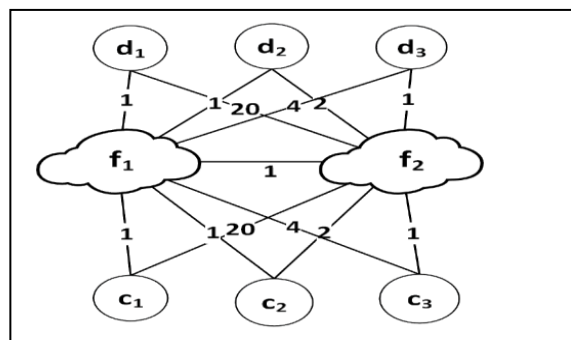
**مقصد<sup>۳</sup>:** گره یا سخت افزاری که داده پردازش شده به عنوان گیرنده نهایی برای آن ارسال خواهد شد.

جریان‌های داده مختلف، توسط سرویس‌های مختلف پردازش می‌شوند. در شکل ۲، ۳ جریان داده مختلف از طریق خدمات  $\{S_1, S_2\}$ ،  $\{S_2, S_1, S_3\}$  و  $\{S_4, S_1, S_3\}$  با نرخ ۱ و ۲

$f_1$  و  $f_2$  و  $f_3$  می‌توانند به واسط ارائه کننده خدمات در گره مه دور یا نزدیک فرستاده شوند [۱، ۳۰، ۳۱].



شکل ۲: ورودی‌ها و خروجی‌های مختلف در یک سیستم سایبر فیزیکی که خدمات خاصی ارائه می‌کند [۱]



شکل ۳: ظرفیت منابع و انرژی ارتباطی مختلف در یک [۱CPS]

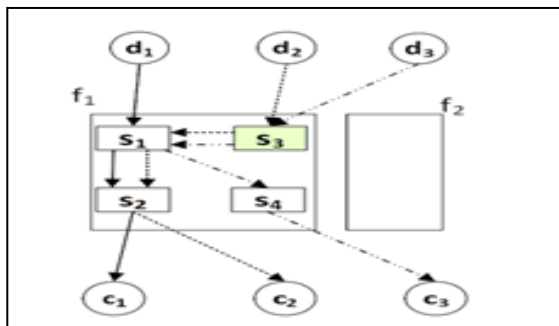
در نظر داشته باشید که یک کاربرد CPS سرویس‌های متفاوت و نیازمندی‌های ورودی و خروجی مختلفی دارد. برای مثال یک داده تولید شده از  $d_1$  به  $C_1$  توسط سرویس  $S_1$  و  $S_2$  با نرخ ۲ پردازش می‌شود.

برای توازن بار، هر سرویس پردازشگر داده می‌تواند نسخه‌های مختلفی از پردازش را که بصورت آزادانه در گره‌های مه قرار گرفته‌اند داشته باشد. لذا جریان داده می‌تواند بین نسخه‌های مختلف پردازش و خدمات توزیع شود. با توجه به ویژگی‌های توزیع جغرافیایی، گره‌های مه مختلف شرایط برداشت انرژی سبز متفاوتی دارند. به عنوان یک مثال، ظرفیت منابع مختلف و هزینه‌های انرژی ارتباطی مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل داده‌ها از  $d_1$  می‌توانند به گره مه  $f_1$  و  $f_2$  با هزینه‌های ارتباطی ۱ و ۲۰ انتقال داده شوند. برای رسیدن به بهره‌وری انرژی، باید تنوع برداشت انرژی سبز، تعداد نسخه‌های سرویس‌ها، مکان قرارگیری نسخه‌ها و برنامه‌ریزی جریان داده‌ها را بدون از دست دادن کیفیت خدمات در نظر بگیریم [۱، ۲۹، ۳۰]. در واقع ما در این تحقیق تلاش می‌کنیم معیاری برای سبز بودن خدمات به صورت کارآمد در CPS‌ها ارائه کنیم.

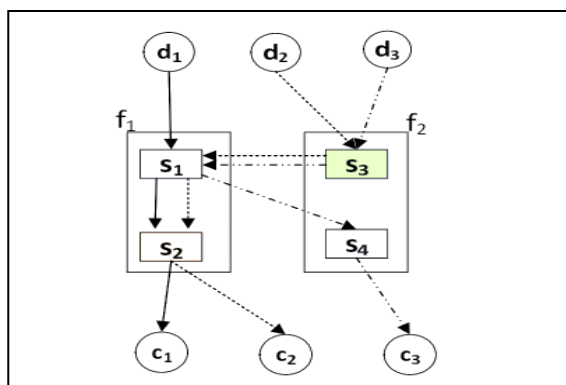
<sup>۲</sup>Data Source

<sup>۳</sup>Destination Node

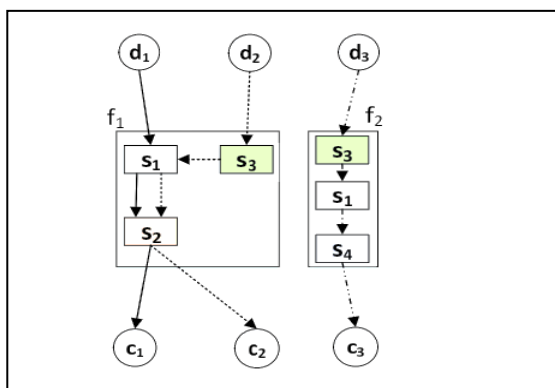
استفاده قرار می‌گیرد، سیگنالی را ارسال می‌کند که بیانگر فعال بودن آن گره می‌باشد. با در نظر گرفتن هر سیگنال ارسالی به عنوان یک واحد مصرف انرژی، می‌توان با تجمیع این واحدها، مصرف انرژی استاتیک گره‌ها را بدست آورد.



شکل ۴: استراتژی ۱- انرژی محاسباتی: ۱ استاتیک + ۴ داینامیک، انرژی ارتباطی: [۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۸، ۱] ۴۶



شکل ۵: استراتژی ۲- انرژی محاسباتی: ۲ استاتیک + ۴ داینامیک، انرژی ارتباطی: [۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۸، ۱] ۲۸



شکل ۶: استراتژی ۳- انرژی محاسباتی: ۲ استاتیک + ۶ داینامیک، انرژی ارتباطی: [۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۸، ۱] ۱۶

مصرف انرژی داینامیک: با توجه به این که برای خدمات موجود در گره‌های مه، میزان نیازمندی یکسانی برای منابع در نظر گرفته شده است، به ازای هر درخواست خدمت، سیگنالی فرستاده می‌شود تا آن خدمت فراخوانی شود. در نتیجه، با در نظر گرفتن هر سیگنال ارسالی به عنوان یک واحد مصرف

انرژی می‌یابند. هزینه انرژی ارتباطی بین گره‌های مه به دلیل موقعیت جغرافیایی آنها متفاوت است، که در شکل ۳ به آن اشاره شده است.

**انرژی ارتباطی<sup>۴</sup>:** انتقال داده بین دو گره شبکه انرژی مصرف می‌کند.

اکنون در مورد چگونگی قرار دادن کپی سرویس‌ها در گره‌های مه برای به حداقل رساندن انرژی محاسباتی و ارتباطی بحث خواهیم کرد. محاسبه مصرف انرژی گره مه شامل ۲ قسمت است: مصرف انرژی استاتیک و مصرف انرژی داینامیک.

**انرژی استاتیک<sup>۵</sup>:** بستگی به سخت افزار تعداد گره‌های مه فعال شده دارد.

**انرژی داینامیک<sup>۶</sup>:** براساس نیازمندی منابع خدمت مشخص می‌شود. در این مثال فرض می‌کنیم همه ۴ سرویس دارای نیازمندی یکسانی به منابع هستند. مصرف انرژی ارتباطی بین دو گره مه بر اساس دو فاکتور تعیین می‌شود: نرخ داده و هزینه انرژی ارتباطی بین ۲ گره مه. برای تشریح بهتر مساله، سه استراتژی مختلف را مد نظر قرار می‌دهیم.

در استراتژی ۱، فقط یک نسخه از هر خدمت در گره مه  $f_1$  بصورت  $s_1, s_2, s_3$  و  $s_4$  و شامل ۳ جریان داده مستقر شده-اند. استراتژی ۱، یک واحد هزینه استاتیک و ۴ واحد هزینه داینامیک دارد که مصرف انرژی ارتباطی آن ۴۴ است. با انتقال  $s_3$  و  $s_4$  به گره مه  $f_2$ ، استراتژی ۱ به استراتژی ۲ تبدیل می‌شود. این بار ۲ واحد هزینه استاتیک و ۴ واحد هزینه داینامیک خواهیم داشت که مصرف انرژی ارتباطی آن ۳۶ است.

در استراتژی ۳، نسخه‌های متعددی برای هر خدمت در نظر گرفته شده است. ۲ نسخه برای  $s_1$  در  $f_1$  و  $f_2$ ، یک نسخه از  $s_2$  در  $f_1$ ، ۲ نسخه از  $s_3$  در  $f_1$  و  $f_2$  و یک نسخه از  $s_4$  در گره مه  $f_2$ . با ۲ واحد هزینه استاتیک و ۶ واحد هزینه داینامیک مصرف انرژی ارتباطی ۱۶ واحدی را خواهیم داشت. مشاهده می‌شود که با تغییر نسخه‌های مختلف خدمات در گره‌های مختلف، میزان مصرف انرژی متفاوت خواهد بود. ۳ استراتژی تشریح شده به ترتیب در شکل ۴، شکل ۵، شکل ۶ نشان داده شده است. لذا تعیین یک استراتژی که کمترین مصرف انرژی را داشته باشد خود یک مساله مهم در شبکه‌ها مه سایبر فیزیکی است.

**مصرف انرژی استاتیک** همانطور که در مراجع [۱، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۴] ذکر شده است، هنگامی که هر گره مه مورد

<sup>۴</sup>Communication Energy

<sup>۵</sup>Static Energy

<sup>۶</sup>Dynamic Energy

می‌دهند در نظر می‌گیریم. این دستگاه‌ها به صورت سیمی یا بدون سیم به هم شبکه شده‌اند. یک سیستم مه توسط  $\{R_f, T_f, G_f, Q_f\}$  مشخص می‌شود که به ترتیب بیانگر ظرفیت منابع استاتیک، ظرفیت منابع دینامیک، نرخ تولید انرژی سبز و تقاضای انرژی (شامل قسمت‌های استاتیک و دینامیک است) می‌باشد. انرژی استاتیک، انرژی‌های ثابتی که به هنگام فعال بودن سرور، صرف نظر از استفاده از منابع می‌باشند و انرژی دینامیک، انرژی است که متناسب با استفاده از منابع می‌باشد. یک لینک توسط عبارت  $\{M_e, L_e\}$  که به ترتیب بیانگر ظرفیت ارتباطی لینک و انرژی مصرفی برای هر واحد ارتباط است، مشخص می‌شود. مجموعه  $S$  شامل سرویس‌های  $GPS$  موجود است. هر کدام از سرویس‌های  $SES$  شامل چندین ورودی و خروجی است. جریان‌های ورودی و خروجی ممکن است نرخ متفاوتی داشته باشند. مثلاً یک سرویس فیلتر، جریانی از داده‌های حسی را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و جریان فیلتر شده را با نرخ کوچکتر تولید میکند. میزان منابع مورد نیاز یک سرویس شامل قسمت‌های استاتیک (مثل قسمت ذخیره سازی) و قسمت دینامیک (CPU) است. قسمت دینامیک متناسب با جریان عبوری از آن است.  $\gamma_s$  برای نشان دادن یک واحد منبع دینامیک مورد نیاز است. اگر سرویسی یک جریانی را با نرخ  $\lambda$  پردازش کند، میزان منبع دینامیک مورد نیاز برابر  $\gamma_s \lambda$  است. یک  $CPS$  شامل یکسری سرویس‌های پردازش داده مرتب شده است که می‌توان به صورت گراف جهت‌دار  $G = \{V_s, E_s\}$  توصیف شود که  $V_s$  شامل دستگاه‌های  $CPS$ ،

$DEV_s$  منابع داده اولیه،  $SEV_s$  سرویس‌های پردازش داده،  $CEV_s$  مقصد است. مکان تولید کننده داده اولیه و مقصد مشخص است اما مکان سرویس‌های پردازش داده می‌تواند در هر قسمت از گره‌های مه ( $f$ ) باشد. با تعریف یک فاکتور مقیاس پذیری  $\alpha_s$  می‌توان رابطه بین جریان ورودی و خروجی برای سرویس  $S$  را تعریف کرد [۱].

$$O_s = \alpha_s i_s \quad (1)$$

لیستی از اسامی پارامترها و متغیرهای به کار رفته شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

#### مثالی از یک سیستم سایبر فیزیکی واقعی:

فرض کنیم در یک سازمان نظیر یک بیمارستان بزرگ، یک سیستم امنیتی شامل ۱۰۰ دوربین مدار بسته، ۱۰۰ سنسور تشخیص باز بودن دربها، ۱۰۰ سنسور حرارتی و صد دستگاه آژیر نصب شده است. در این سازمان هم ۲۰ پنل خورشیدی و ۲۰ باتری قابل شارژ برای تامین انرژی سیستم امنیتی تعبیه شده است و این سیستم به دلایل امنیتی و مهندسی، مستقیماً

انرژی، اجتماع این واحدها بیانگر مصرف انرژی دینامیک خواهد بود.

مصرف انرژی ارتباطی: مقدار انرژی ارتباطی مصرف شده به فاصله‌ی گره‌های مه از همدیگر و نیز فاصله خدمات گیرنده از گره‌های مه، و نیز نرخ داده دریافت و ارسال شده، بستگی دارد. این وابستگی‌ها، با توجه به نوع مسئله و نیز تعداد گره‌ها و خدمات گیرنده، متفاوت می‌باشد. بنابراین در این مقاله، میزان مصرف انرژی ارتباطی، به صورت قراردادی تعیین شده است.

محاسبات و فرمول‌های لازم برای محاسبه مصرف انرژی‌های استاتیک، دینامیک و ارتباطی، در بخش "۲-۵- مصرف انرژی" بیان شده است.

مصرف انرژی در استراتژی ۱ (شکل ۴): با توجه به شکل ۴، تعداد گره‌های مه فعال شده، برابر با ۱ می‌باشد. بنابراین، مصرف انرژی استاتیک برابر با ۱ خواهد بود. مصرف انرژی دینامیک نیز بر اساس تعداد خدمات استفاده شده در این مثال، برابر ۴ می‌باشد. مصرف انرژی ارتباطی نیز، همانطور که ذکر شد، به فاصله‌ی گره‌های مه از همدیگر و نیز فاصله خدمات گیرنده از گره‌های مه، و نیز نرخ داده دریافت و ارسال شده بستگی دارد، و در این مثال، برابر با ۴۴ محاسبه شده است.

مصرف انرژی در استراتژی ۲ (شکل ۵): با توجه به شکل ۵، تعداد گره‌های مه فعال شده، برابر با ۲ می‌باشد. بنابراین، مصرف انرژی استاتیک برابر با ۲ خواهد بود. مصرف انرژی دینامیک نیز بر اساس تعداد خدمات استفاده شده در این مثال، برابر ۴ می‌باشد. مصرف انرژی ارتباطی نیز برابر با ۳۶ محاسبه شده است.

مصرف انرژی در استراتژی ۳ (شکل ۶): با توجه به شکل ۶، تعداد گره‌های مه فعال شده، برابر با ۲ می‌باشد. بنابراین، مصرف انرژی استاتیک برابر با ۲ خواهد بود. مصرف انرژی دینامیک نیز بر اساس تعداد خدمات استفاده شده در این مثال، برابر ۶ می‌باشد. مصرف انرژی ارتباطی نیز برابر با ۱۶ محاسبه شده است.

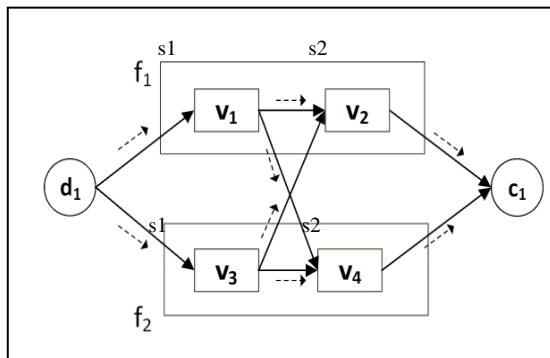
در روش ارائه شده [۱] محاسبات بدون وجود متغیر زمان صورت می‌گیرد. یعنی در تعیین گره‌های مه انتخابی فقط متغیر نرخ جریان و هزینه بین گره‌ها دخالت دارد اما در روشی که در این مقاله ارائه شده متغیر زمان هم دخالت دارد و زمان اجرای پردازش‌ها توسط سرویس‌ها هم در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله سیستمی را که شامل  $D$  دستگاه (مانند سنسور)، که اطلاعات خام و اولیه تولید می‌کنند و مجموعه‌ای از  $f$  گره مه که پردازش‌های اولیه و سرویس‌های ذخیره سازی را انجام

سرویس و ۲ گره مه است. کلا ۴ راس وجود دارد شامل  $v_1$ ،  $v_2$ ،  $v_3$  و  $v_4$  که ۲ نسخه برای سرویس های  $S_1$  و  $S_2$  هستند. برای این شکل روابط  $b(v_2) = b(v_1) = b(v_3) = S_1$ ،  $b(v_4) = S_2$ ،  $h(v_3) = h(v_1) = h(v_2) = f_1$ ،  $h(v_4) = f_2$  برقرار است. جریان داده بین دو سرویس  $S_1$  و  $S_2$  بین ۴ بال  $e_{v_1 v_2}$ ،  $e_{v_1 v_4}$ ،  $e_{v_3 v_2}$  و  $e_{v_3 v_4}$  توزیع شده است [۱، ۳۲، ۳۳].

جدول 1: لیست پارامترها و متغیرهای به کار رفته در [۱]

Constants	
$\Lambda$	The metric of throughput
$R_f$	The static capacity of fog node $f$
$\Gamma_f$	The dynamic capacity of fog node $f$
$G_f$	The green energy generation rate at fog node $f$
$M_e$	The communication capacity of link $e$
$L_e$	The unit energy consumption of link $e$
$r_s$	The static resource requirement of service $s$
$\gamma_s$	The dynamic resource requirement of service $s$
$i_s$	The input flow rate of service $s$
$o_s$	The output flow rate of service $s$
$h(v)$	The hosting fog node of vertex
$b(v)$	The corresponding sensing service of vertex $v$
$i(v)$	The input/parent nodes of $v$
$o(v)$	The output/child nodes of $v$
$L_f$	The unit link communication energy consumption of fog node $f$
Variables	
$\lambda_{uv}$	The rate of flow from $u$ to $v$
$x_{sf}$	A binary variable indicating whether service $s$ is placed on fog node $f$ or not
$y_f$	A binary variable indicating whether fog node $f$ is activated or not



شکل ۷: مثالی از گراف اپلیکیشن گسترش یافته CPS که نشان می دهد راس های ۷ بر روی کدام گره مه قرار دارند و در هر کدام کدام سرویس وجود دارد [۱، ۳۲، ۳۳].

از برق شهری استفاده نمی کند. فرض کنید نرم افزارهای خاصی بر اساس فیلم و تصویر دوربینها و داده های سنسورها، ۳۰ نوع خطر و حضور غیر مجاز و ممنوع اشیا یا افراد را در مکانهای خاص تشخیص می دهد. همچنین داده های سنسورها نیز توسط ۱۰ سرویس خاص پردازش می شوند. سیستم می تواند ۲۰ تصمیم مهم بگیرد و یکصد فرمان کنترلی را برای دوربینها و سنسورها صادر کند. با توجه به نرخ پردازش داده ها، رزولوشن تصاویر دوربینها، ناحیه تحت پوشش هر دوربین، سرعت گردش و چرخش دوربینها، حجم داده های سنسورها، تعداد بایتهای داده ای سنسورها در یک ثانیه، زمان عکس العمل کامپیوترها، فضای هارد ذخیره سازی داده ها، سرعت پردازش کامپیوترها و سایر موارد، این سیستم امنیتی نیاز شدیدی به مصرف بهینه انرژی سبز و تخصیص زمان بهینه به دوربین ها و سنسورها دارد. این سیستم امنیتی می تواند توسط یک سیستم سایر فیزیکی سفارشی مدیریت و کنترل شود. یقیناً در پردازش داده های این سیستم، اولویتهای خاصی برقرار خواهد بود. به عنوان مثال تصویر ارسالی یک دوربین نسبت به تصویر ارسالی یک دوربین دیگر از اولویت خاصی برای پردازش برخوردار است. همچنین همیشه نیازی نیست که یک دوربین در حال فیلم برداری باشد و می تواند در حال عکس برداری هم باشد. زیرا نرخ داده در فیلم برداری بسیار بیشتر از نرخ داده در عکس برداری است. یقیناً تعریف سطوح امنیتی لازم و اولویت بندی خطرات باعث می شود یک دوربین بین دو حالت فیلم برداری و عکس برداری سوییچ کند.

### گراف اپلیکیشن گسترش یافته CPS<sup>۷</sup>

همانطور که می دانیم یک سرویس می تواند در هر یک از گره های مه برای تعدیل بار و یا بهره وری انرژی، کپی شود. اگر تعداد کپی ها برای هر سرویس از قبل تعیین نشده باشد، مشکل است که بتوان رابطه جریانها را نوشت. به همین دلیل یک مدل گراف اپلیکیشن گسترش یافته CPS تعریف می کنیم. ما از  $G_v = (V_v, E_v)$  برای نشان دادن همه نسخه ها و جریان های داده استفاده می کنیم. هر سرویس  $S \in S$  می تواند توسط هر یک از گره های مه  $f \in F$  میزبانی شود پس هر سرویس،  $|F|$  عدد نسخه می تواند داشته باشد و هر گره مه می تواند  $|S|$  عدد سرویس را میزبانی کند. برای هر نسخه،  $h(v)$  نشان دهنده گره میزبان مه و  $b(v)$  سرویس CPS است. بنابراین کلا  $|V| = |S| \cdot |F|$  حالت برای هر نسخه در گراف وجود دارد.

شکل ۷ مثالی از گراف اپلیکیشن گسترش یافته CPS با ۲

<sup>۷</sup>Extended Application Graph

### جریان داده و کیفیت خدمات

[۳۳

$$\sum_{e_{uv} \in E_v} \gamma_{b(v)} \lambda_{uv} \leq \Gamma_f \quad (8)$$

استراتژی قرار دادن سرویس‌ها، ارتباط زیادی در برنامه‌ریزی جریان‌ها دارد. جریان تنها در صورتی از یک گره مه عبور خواهد کرد که آن سرویس در آن گره قرار گیرد. به این ترتیب یک جریان غیر صفر بین جفت کی‌های  $u$  و  $v$  وجود خواهد داشت، در صورتیکه سرویس مورد نظر  $b(u)$  و  $b(v)$  در گره  $h(u)$  و  $h(v)$  وجود داشته باشد [۳۳، ۳۲، ۱]

$$\lambda_{uv} \leq x_{b(u)h(u)} L, \forall u, v \in V_v \quad (9)$$

$$\lambda_{uv} \leq x_{b(v)h(v)} L, \forall u, v \in V_v \quad (10)$$

که  $L$  یک عدد دلخواه بزرگ است.

### ارتباطات

لینک  $e_{ab}$  بین دو گره  $a$  و  $b$  دارای ظرفیت ثابت  $c_{ab}$  است. بنابراین برای کل نرخ جریان عبوری از  $u$ ،  $h(u) = a$  به  $v$ ،  $h(v) = b$  رابطه زیر برقرار است [۳۳، ۳۲، ۱]

$$\sum_{e_{uv} \in E_v} \lambda_{uv} \leq M_{ab} \quad (11)$$

### مصرف انرژی

همانطور که گفته شد انرژی محاسباتی لازم برای یک گره مه شامل قسمت استاتیک و دینامیک است که وابسته به وضعیت فعال بودن تعداد سرویس‌های موجود در آن گره مه است. در نتیجه انرژی مورد نیاز یک گره مه برابر رابطه زیر است [۳۳، ۳۲، ۱]:

$$\gamma_f a_f + \sum_{s \in S} x_{sf} b_f \quad (12)$$

$a_f$  برابر مصرف واحد انرژی استاتیک و  $b_f$  برابر مصرف واحد انرژی دینامیک است.

علاوه بر مصرف انرژی برای محاسبات، انرژی مصرفی برای ارتباطات نیز به دلیل انتقال جریان داده بین گره‌های مه لازم است. در نتیجه مصرف انرژی ارتباطی برای جریان داده  $\lambda_{uv}$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۳، ۳۲، ۱]

$$\sum_{e_{uv} \in E_v} L_f \lambda_{uv} \quad (13)$$

$L_f$  واحد انرژی ارتباطی در یک گره مه است.

انرژی مورد تقاضای یک گره مه می‌تواند از طریق انرژی قهوه‌ای (brown energy) مانند شبکه برق یا از طریق انرژی سبز برگرفته شده از محیط تهیه شود. برای کاهش مصرف انرژی قهوه‌ای باید از انرژی سبز بیشتر استفاده شود. میزان انرژی

ما  $\lambda_{uv}$  را به عنوان نرخ جریان داده از  $u$  به  $v$  در نظر می‌گیریم، به شرطی که یال  $e_{uv}$  در گراف  $G_v$  وجود داشته باشد. برای هر  $v$  عضو  $G_v$ ، جریان ورودی از نسخه‌های سرویس والد  $i(v)$  پردازش شده و به نسخه‌های سرویس فرزند  $o(v)$  ارسال می‌شود. به طور کلی، مجموع نرخ جریان‌های ورودی و نرخ جریان خروجی از  $v$  باید طبق رابطه زیر باشد [۳۳، ۳۲، ۱]

$$\sum_{u \in i(v)} \alpha_{b(v)} \lambda_{uv} \geq \sum_{u \in o(v)} \lambda_{vw} \quad (2)$$

که  $\alpha_{b(v)}$  فاکتور مقیاس نسخه سرویس  $v$  است.  $QoS^A$  در یک CPS توسط نرخ خروجی نهایی ارزیابی می‌شود.

$$\sum_{u \in i(c)} \alpha_{b(u)} \lambda_{uc} \geq \Lambda_c \quad (3)$$

این رابطه برای تضمین  $QoS$  مورد درخواست توسط هر مقصد است. برای تمام سرویس‌هایی که در خط اول وجود دارند، داده‌های خام و اولیه از منبع به عنوان ورودی دریافت می‌شود، نرخ جریان ورودی آن‌ها توسط نرخ تولید داده توسط آن دستگاه محدود می‌شود [۳۳، ۳۲، ۱]

$$\lambda_{sw} \leq i_s \quad (4)$$

### قراگیری خدمات در گره ها

از یک متغیر باینری  $x_{sf}$  برای مشخص کردن اینکه آیا یک سرویس در گره  $f$  قرار دارد یا نه، استفاده می‌شود.

$$x_{sf} \begin{cases} 1, & \text{sensing services is placed on } f \text{ node.} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

ابتدا باید در نظر داشت زمانی یک سرویس در یک گره مه می‌تواند باشد که آن گره خود فعال باشد یعنی  $\gamma_f = 1$ .

$$x_{sf} \leq \gamma_f \quad (5)$$

برای تضمین مفاهیم کاربردی  $CPS$ ، لازم است از هر سرویس حداقل یک نسخه فعال باشد [۳۳، ۳۲، ۱]

$$\sum_{f \in F} x_{sf} \geq 1 \quad (6)$$

باید در نظر داشت که تمام منابع استاتیک لازم برای تمام سرویس‌ها در یک گره  $f$  نباید از ظرفیت  $r_f$  بیشتر باشد [۳۳، ۳۲، ۱]

$$\sum_{s \in S} x_{sf} \cdot r_s \geq R_f \quad (7)$$

همچنین جریان کل که می‌تواند در یک گره مه پردازش شود توسط ظرفیت دینامیک محدود می‌شود. هر نسخه موجود در گره  $f$ ، نیازمند منابع دینامیک است. در نتیجه مقدار کل منابع دینامیک مورد نیاز نباید از ظرفیت گره  $f$  بیشتر باشد [۳۳، ۳۲، ۱]

<sup>A</sup>Quality of Services

طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

Energy-min:

$$\begin{aligned} \text{Min: } & \sum_{f \in F} C'_f \\ \text{s.t: } & C'_f \geq y_f a_f + \sum_{s \in S} x_{sf} b_f + \sum_{\substack{e_{uv} \in E_v \\ h(u)=f}} l_f h_{uv} - G_f \\ & C'_f \geq 0 \end{aligned} \quad (11)-(2)$$

$$x_{sf} \in \{0,1\}, y_f \in \{0,1\}$$

با حل نمودن مساله بهینه سازی فوق جواب بهینه آن حاصل می‌شود که شامل مقدار متغیرهای  $x_{sf}$  و  $y_f$  خواهد بود. این متغیرها یا یک خواهند شد یا صفر. متغیرهای  $y_f$  نشان می‌دهند کدام گره‌های مه فعال و کدام گره‌های مه غیر فعال هستند و متغیرهای  $x_{sf}$  نیز نشان می‌دهند کدام سرویس‌ها فعال و کدام سرویس‌ها غیر فعال هستند. پس از محاسبه این متغیرها با استفاده از سایر مقادیر معلوم شبکه نظیر مقدار انرژی ارتباطی هر یال و غیره، می‌توانیم مشخص کنیم که مصرف انرژی شبکه و مصرف انرژی سبز شبکه چقدر است. پس از حل مساله بهینه سازی فوق و محاسبه این متغیرها، دو رابطه زیر را محاسبه خواهیم کرد:

$$G = y_f a_f + \sum_{s \in S} x_{sf} b_f + \sum_{\substack{e_{uv} \in E_v \\ h(u)=f}} l_f h_{uv} - G_f \quad (1)$$

$$E = y_f a_f + \sum_{s \in S} x_{sf} b_f + \sum_{\substack{e_{uv} \in E_v \\ h(u)=f}} l_f h_{uv} \quad (2)$$

افزایش مقدار محاسباتی حاصل از رابطه (۱) به معنای افزایش مصرف انرژی سبز و کاهش مصرف انرژی قهوه‌ای در یک نشست انتقال است. افزایش مقدار محاسباتی در رابطه (۲) نیز نشان می‌دهد که سطح انرژی مصرفی شبکه در همان نشست انتقال چقدر است. این دو فاکتور به عنوان دو معیار برای انجام مقایسه بین توپولوژی‌های مختلف، حالت‌های مختلف جریان داده و تحلیل مصرف انرژی در دو الگوریتم جدید و قبلی به کار برده می‌شوند.

یکی از نقاط ضعف روش MILP این است که این روش نسبت به انتخاب سرویس و انتخاب گره حساسیت دارد اما نسبت به انتخاب یالها یا کوتاهتر کردن مسیرها حساسیت ندارد. به عبارتی برای تنظیم انرژی ارتباطی سیاست کارامدی ندارد. نقطه ضعف دیگر این روش این است که همواره کمترین نرخ انتقال داده و کمترین میزان مصرف انرژی را در یک مسیر انتخاب می‌کند و توجهی به نسبت بین انرژی مصرف شده و نرخ انتقال داده ندارد. ما این نقاط ضعف را با ارائه روش جدید OPRRS برطرف خواهیم کرد. روش جدید سعی می‌کند با

قهوه‌ای مصرفی برای یک گره مه از رابطه زیر حساب می‌شود [۱، ۳۲، ۳۳]

$$\max \left\{ y_f a_f + \sum_{s \in S} x_{sf} b_f + \sum_{\substack{e_{uv} \in E_v \\ h(u)=f}} l_f h_{uv} - G_f, 0 \right\}, \forall f \in F \quad (14)$$

توجه شود طبق قضایای بحث برنامه ریزی خطی، رابطه بیشینه سازی (۱۴) معادل رابطه کمینه سازی زیر است:

$$\min \left\{ G_f, 0 - y_f a_f - \sum_{s \in S} x_{sf} b_f - \sum_{\substack{e_{uv} \in E_v \\ h(u)=f}} l_f h_{uv} \right\}, \forall f \in F$$

رابطه نامنفی فوق زمانی کمینه می‌شود که سعی شود مجموع انرژی های استاتیک، دینامیک و ارتباطی بیشتر از انرژی سبز تامین شود.

### مدلسازی سازی MILP

برنامه سازی خطی که یک نوع مدلسازی خطی بهینه است بر اساس محاسبات جبر خطی انجام می‌شود. در این نوع مدلسازی همه متغیرها از درجه ۱ هستند و علاوه بر تابع هدف، تعدادی قید یا محدودیت نیز وجود دارد که شرایط دست یافتن به جواب تابع هدف را تعیین می‌کنند. جوابی که برای تابع هدف حاصل می‌شود همان جواب بهینه است.

تا کنون از برنامه ریزی خطی استفاده‌های فراوانی برای کمینه کردن مصرف انرژی در شبکه‌های کامپیوتری و سایر فیزیکی انجام شده است. مدلسازی مصرف انرژی در یک مدل برنامه ریزی خطی، یک عمل ابتکاری است و ارتباط زیادی با ماهیت مساله، ساختار مساله، نحوه طراحی تابع هدف و ایجاد قیدها دارد. در [۲۳] و [۲۴] از برنامه ریزی خطی پویا و حساس به تغییرات برای مدلسازی شبکه سایبر فیزیکی بیسیم و همچنین طراحی یک مدل امنیتی در این شبکه‌ها استفاده شده است.

با توجه به انعطاف پذیری بالای برنامه ریزی خطی (پویا، چند هدفه، صحیح، حقیقی، دودویی و غیره)، می‌توان چالش‌ها و مشکلات متعدد و گوناگونی را در شبکه‌های سایبر فیزیکی و در حوزه‌های مختلف انرژی، امنیت، کارایی و غیره حل نمود. لذا در این مقاله، هدف اصلی کاهش میزان مصرف انرژی قهوه‌ای با در نظر گرفتن مصرف انرژی ارتباطی و محاسباتی با استفاده از برنامه ریزی خطی صحیح ترکیبی است.

$$\sum \max \left\{ y_f a_f + \sum_{s \in S} x_{sf} b_f + \sum_{\substack{e_{uv} \in E_v \\ h(u)=f}} l_f h_{uv} - G_f, 0 \right\}. \quad (15)$$

با جمع تمام روابط بالا مسئله برنامه ریزی خطی کمترین انرژی

تاثیر دادن فاکتور زمان، همواره مسیرهای کوتاهتری که نرخ انتقال بالاتر و انرژی مصرفی کمتر دارند را انتخاب کند.

## روش‌های موجود

### محاسبات مه در شبکه‌های حسگر

با توسعه سریع شبکه‌های حسگر [۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶] در حیطه‌های شبکه‌های اجتماعی، بهداشت و درمان، ارتباطات خودروپی، موبایل و غیره، به ترویج و گسترش سرویس‌هایی با عنوان حسگر، بیشتر احساس نیاز می‌شود. مزایای حسگر به عنوان سرویس، یک فناوری نوین جهت درک نیازهای یک سنسور به خدمات آنلاین یا زمانبندی شده مبتنی بر وب یا ابر است. چانگ و همکارانش [۶] یک چارچوب ارائه سرویس تحت عنوان حسگر میزبان موبایل سرویس گرا را ارائه دادند که در آن دستگاه‌های موبایل داده‌های حسی را از طریق سرویس‌های وب موبایل به چندین قسمت توزیع می‌کنند. داده‌های حس شده داده‌های خامی هستند که برای ارسال به سمت سرورها باید مسیرهای مشخصی را طی کرده و سرویس‌های پردازشی خاص و مبتنی بر ابر را دریافت کنند. در این تحقیق سعی می‌شود به برنامه‌های موبایل کاربران خدمات کمتر اما کافی ارائه شود تا تعداد زیادی از برنامه‌ها و نرم افزارهای حس شده توسط کاربران را پوشش دهند. لذا نیاز مبرمی به کاهش مصرف انرژی قهوه‌ای و بهبود در استفاده از انرژی سبز در این سیستم دارند. روش ارائه شده در این مقاله بهینه و چند معیاری نیست.

در [۷] و [۸] نیز تحقیقاتی در زمینه تلفن‌های هوشمند تحت ایده حسگر به عنوان سرویس انجام شده است و سپس معماریهایی را برای یک چارچوب سرویس وب یا توزیع پردازش ارائه می‌دهند، که شبکه‌های حسگر بیسیم، اینترنت موبایل و تکنولوژی ابری را تحت یک معماری سرویس‌گرا، یکپارچه می‌کند. اما این روشها نیز استانداردهای شبکه سبز را ندارند.

کانتارسی و همکارانش [۹] یک توضیح کلی در مورد سرویس‌های حسی مبتنی بر ابر ارائه دادند و پتانسیل و چالش‌های موضوع احساس-به‌عنوان-سرویس را مطرح کردند. آنها سپس [۱۰] یک مورد خاص از کاربرد احساس به عنوان سرویس را بر روی شبکه اجتماعی جهت حل مشکل مدیریت جمعیت ارائه دادند.

ارایه خدمات و سرویس‌های مه و ابر به شبکه‌های حسگر، به نوعی باعث شکل‌گیری خدمات سایبرفیزیکی مبتنی بر شبکه‌های حسگر و موبایل می‌شود که مقوله مصرف انرژی در این شبکه‌ها بسیار مهم است. این نوع شبکه‌ها تلاش می‌کنند

نیازمندی‌های مبتنی بر حسگر را با سرویس‌های مبتنی بر وب، موبایل، نرم افزار و غیره پاسخ دهند که باعث بروز چالش‌های جدید مصرف انرژی شده و لازم می‌شود مصرف انرژی‌های سبز و قهوه‌ای در این شبکه‌ها مدلسازی و بهینه شود. لذا تجمیع سرویس‌ها، خدمات حسگر، خدمات موبایل و بحران مصرف انرژی در این شبکه‌ها یک چالش جدی نوین است که تحقیقات جدیدی در عرصه شبکه‌های سایبرفیزیکی محسوب می‌شود و اهمیت این شبکه‌ها را دو چندان می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق قابل تعمیم به شبکه‌های حسگر مبتنی بر خدمات سایبرفیزیکی می‌باشد.

### پردازش مه

پردازش مه توسط بومونی و همکارانش [۱۱] ارائه شده است که همچنین به عنوان پردازش لبه [۱۲] نیز شناخته می‌شود. یعنی انتقال خدمات ابری به لبه شبکه و ایجاد زیرساخت محلی برای به اشتراک گذاری بار سنگین موجود بر روی ابر. دو اصطلاح پردازش مه و پردازش لبه بجای هم استفاده می‌شوند [۱۲ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۳ و ۱۴].

بسیاری از تحقیقات در این امید هستند که بتوانند با متصل کردن دستگاه‌های مختلف، محاسبات را بجای هسته سرورهای ابر، به لبه‌های ابر گسترش دهند. سیسکو پیش بینی کرده است که تا سال ۲۰۲۰، تعداد دستگاه‌های متصل به ۵۰ میلیارد عدد خواهد رسید [۱۵ و ۱۶ و ۲۱]. از سوی دیگر، بسیاری از شرکت‌ها برای بهبود عملکرد یا کاهش هزینه پردازش ابری ایجاد شده‌اند. یک پیشنهاد امیدبخش، محاسبات مه است.

استانچو و همکارانش [۱۶] مزایای محاسبات ابری و محاسبات مه در مراقبت‌های بهداشتی و مراقبت از سالمندان را به وسیله یک سناریوی کاربردی که در OpSIT-Project در آلمان طراحی شده است نشان می‌دهند.

زو و همکارانش [۱۷] امکان تطبیق شرایط کاربر، مانند وضعیت فعلی شبکه و حجم کار را بررسی می‌کنند تا عملکرد وب سایت را با استفاده از سرورهای لبه به جای سرورهای ابر مرکزی بهبود بخشند.

واکونرو و همکارانش [۱۸] چند تکنولوژی کلیدی محاسبات مه، مانند نظیر-به-نظیر، مجازی سازی عملکرد شبکه و اینترنت‌ناشیا را مورد بررسی قرار می‌دهد و چندین مسیر تحقیق و چالش برای آینده ارائه می‌دهد.

این مطالعات اهمیت و پتانسیل محاسبات مه را نشان می‌دهد، اما در آنها هیچ راه حل مبتنی بر مدلسازی بهینه برای بهبود عملکرد محاسبات ابری ارائه نشده است. اخیراً، دنگ و

نامیده می شود، برای کمینه ساختن مصرف انرژی در مسیرهای انتقال و پردازشگر داده در شبکه های مه سایبر فیزیکی ارایه می کند.

معمولا در روشهای MILP اگر تعداد متغیرها و تعداد معادلات به بیش از ۲۰۰ افزایش یابد، پیچیدگی زمانی مساله نیز افزایش خواهد یافت. اما مدلسازی مساله و تابع هدف در شبکه های سایبر فیزیکی به تعداد متغیر و تعداد معادلات کمی نیاز دارد و معمولا تعداد متغیرها و معادلات از ۱۰۰ افزایش نخواهد یافت. لذا پیچیدگی زمانی مساله های MILP در مساله های سایبر فیزیکی قابل قبول و خطی است.

### روش جدید OPRRS

روش جدید در سه مرحله (الف)، (ب) و (ج) به شرح زیر ارائه می شود:

#### الف) ارائه معماری جدید

معماری جدید تلاش می کند انرژی استاتیک، انرژی دینامیک و انرژی ارتباطی را از منظر گذشت زمان و زمانبندی خدمات با ارایه یک معماری جدید مد نظر قرار دهد. لذا در معماری جدید با افزودن متغیرها و پارامترهای وابسته به زمان، مدل بهینه سازی مصرف انرژی سعی می کند اولویت و شرایط استفاده از گره ها، سرویس ها و یالها را تغییر دهد بطوریکه انرژی مصرفی کاهش بیشتری را تجربه کند. گام های اصول معماری جدید به شرح زیر است:

- ابتدا یک روش بهینه سازی مانند MILP را برای مدلسازی بهینه انرژی استاتیک، دینامیک و ارتباطی را تحلیل کن.
- پارامترها، متغیرها و معادلات زمان و بهینه سازی نرخ انرژی را به گونه ای به مدل گام ۱ اضافه کن که سعی شود مسیرهای کوتاه تر با انرژی کمتر مورد استفاده قرار گیرند (ساختن روش جدید).
- معیارهای جدید را برای تحلیل و مقایسه زمان مصرفی، انرژی مصرفی و طول مسیرهای انتقال ابداع نموده و دو روش جدید و موجود را مقایسه کن.

#### ب) افزودن متغیر و معادلات زمان به مدل بهینه

در بخش ۲ (شرح مساله)، همه توضیحات و فرایندها مربوط به روش موجود که مبتنی بر MILP است تشریح شد. در روش اشاره شده در قسمت ۳، که برگرفته از [۱، ۲۹، ۳۰، ۳۲، ۳۳] است، با توجه به متغیرها و پارامترهای در نظر گرفته شده در قسمت فرموله سازی مسئله، پارامتر زمان در نظر گرفته نشده

همکارانش [۱۹] مسئله تخصیص حجم کاری را بصورت ریاضی فرموله کرده اند و یک راه حل تقریبی برای صرفه جویی در پهنای باند ارتباطی و کاهش تاخیر انتقال ارائه داده اند. دو همکارانش [۲۰] بر حل مسئله مشترک تخصیص منابع و به حداقل رساندن تأثیرات کربن برای سرویس استریمینگ ویدئو در محاسبات مه تمرکز کرده اند. وانگ و همکاران [۲۱] به پژوهش در حوزه مهاجرت خدمات دینامیک در ابرهای لبه ای متحرک برای طراحی سیاست های مهاجرت خدمات بصورت مطلوب به منظور کاهش هزینه پرداخته اند.

اعظم و همکاران [۲۲] سعی می کنند تاخیر شبکه را از طریق پیش پردازش داده ها قبل از ارسال به ابر از طریق دروازه هوشمند همراه با محاسبات مه، کاهش دهند. روشهای فوق به صورت عمده بر روی مصرف پهنای باند، کاهش تولید دی کسید کربن، کاهش ترافیک سنگین، کاهش هزینه پردازش و خدمات دینامیک تمرکز کرده اند اما متاسفانه مقوله مصرف انرژی و استانداردهای شبکه سبز را مد نظر قرار نداده اند.

در ادامه ما ابتدا تحقیقات [۱، ۲۹، ۳۰، ۳۲، ۳۳] را مطالعه کرده و روش ارایه شده در این تحقیقات برای بهینه کردن مصرف انرژی در شبکه های مه سایبر فیزیکی را بهبود داده و یک روش جدید ارایه خواهیم کرد. روش ارایه شده در این تحقیقات پارامتر زمان و نرخ انتقال داده را به صورت موثر به کار نگرفته و مروش جدید این مقوله ضعف را برطرف خواهد کرد.

#### روشهای بهینه سازی خطی صحیح MILP

برنامه ریزی خطی صحیح مختلط Mixed-Integer Linear Programming Formulation (MILP) یکی از روشهای ریاضی بسیار مفید و موثر در حل مساله های بهینه سازی در بسیاری از رشته های مهندسی، صنایع و علوم است [۳۴-۴۱]. در این روش همه متغیرها توان ۱ دارند و بر اساس تعدادی معادله و نامعادله که از متغیرها تشکیل میشود، یک مقدار کمینه یا بیشینه به عنوان پاسخ بهینه برای تابع هدف محاسبه می شود. روشهای MILP از انعطاف پذیری بسیار بالایی برخوردار هستند و توانایی مدلسازی بسیاری از قیدها و شروط عملکرد یک سیستم را دارند.

روشهای MILP در مهندسی شبکه و مهندسی ترافیک نقش بسیار مهم و موثری دارند و در بسیاری از تحقیقات مهندسی شبکه، ابزار اصلی حل مساله ها هستند [۳۷، ۴۳، ۴۲، ۴۱]. در این تحقیق، یک روش جدید مبتنی بر MLIP که به اختصار Optimal Power-Rate Routing Solution (OPRRS)

دارند را خاموش یا محدود کنیم. ما ابداع مدل‌های بیشتری از OPRRS را به تحقیقات آینده واگذار می‌کنیم.

### ج) معیار مقایسه‌ای $\alpha$

فرض کنیم به ازای یک نشست انتقال داده با شرایط یکسان و مساوی،  $E2$  انرژی مصرف شده و  $R2$  نرخ انتقال در روش OPRRS و  $E1$  و  $R1$  نیز به ترتیب انرژی مصرف شده و نرخ انتقال در روش MILP باشد. در این صورت تعریف ضریب  $\alpha = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{E_1}{E_2}$  با شرایط زیر امکان مقایسه دو الگوریتم را فراهم می‌کند:

$$(1) \quad \alpha \geq 1 \text{ به معنای کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ}$$

انتقال در روش OPRRS نسبت به روش MILP است.

$$(2) \quad \alpha < 1 \text{ به معنای افزایش مصرف انرژی و کاهش نرخ}$$

انتقال در OPRRS نسبت به روش MILP است.

### شبیه‌سازی و آزمایش‌ها

به منظور حل مسئله، از نرم افزار ویزوال استودیو ۲۰۱۰ و کتابخانه نرم افزار سیپلکس<sup>۹</sup> نسخه ۱۲،۶ و زبان ++C استفاده شده است.

سیپلکس یک موتور حل مسئله (Solver) است که قابلیت اتصال به اکثر محیط‌های برنامه‌نویسی و بهینه‌سازی مدل‌های ریاضی را دارا می‌باشد. هر چند شرکت ILOG یک محیط ساده برای ویرایش و توسعه‌ی مدل‌ها در برنامه قرار داده‌است، ولی اکثر کاربران حرفه‌ای ترجیح می‌دهند تا از قابلیت‌های اتصال آن بهره بگیرند. یعنی اتصال به ویزوال استودیو و متلب و یا سایر محیط‌ها. جهت استفاده از سیپلکس به زبان ++C در ویزوال استودیو از فایل کتابخانه ilocplex.lib و concert.lib استفاده شده است.

پس از تنظیم و یکپارچه‌سازی نرم افزار ویزوال استودیو و کتابخانه سیپلکس، ابتدا مسئله را به صورت روابط ریاضی پیاده‌سازی کرده و قیدها و روابط را طبق قوانین کتابخانه سیپلکس وارد نموده‌ایم، سپس به کمک کتابخانه سیپلکس مسئله حل شده است. مسئله بر روی یک کامپیوتر به مشخصات فیزیکی پردازنده core i5، مقدار حافظه رم 6GB و سیستم عامل Windows 10 اجرا شده است. زمان اجرای آزمایش اول (۲ گره مه و ۲ سرویس و هر سرویس دارای ۲ کپی) ۰،۰۷ ثانیه و زمان اجرای آزمایش دوم (۴ گره مه و ۲ سرویس و هر سرویس دارای ۳ کپی) ۰،۱ ثانیه است. جهت محاسبه زمان اجرای آزمایش از متد getCplexTime استفاده شده است.

است. حذف فاکتور زمان در مدل خطی می‌تواند کارایی روش را کاهش دهد.

به عنوان مثال مسیرهای کوتاهتر اما پرانرژی تر می‌توانند در زمان کوتاهتر و با مصرف انرژی کمتر داده بیشتری را به مقصد منتقل نموده و پردازش نمایند. لذا با افزودن قیدهای جدید می‌توان طول مسیرهای انتخاب شده را کوتاهتر و انرژی آنها را افزایش داد. کاهش طول مسیر می‌تواند انرژی مصرف شده استاتیک را نیز کاهش دهد زیرا یک مسیر کوتاهتر ممکن است از تعداد گره مه کمتری استفاده کند.

برای دسترسی به این امر، ما قیدهای جدیدی که مبتنی بر زمان هستند را برای مدل خطی جدید ارائه می‌کنیم که باعث می‌شود مسیرهای کوتاهتر اما کم انرژی تر توسط مساله انتخاب شوند. این قیدهای جدید عبارتند از:

$$(16) \quad 0 < \sum_{s \in S} \lambda_{ts} x_{sf} \leq \Delta t$$

در رابطه (۱۶) عبارت  $\Delta t$  مدت زمانی است که الگوریتم اول انتقال و پردازش داده را به پایان میرساند. این قید تضمین می‌کند که روش دوم نسبت به روش اول زمان انتقال یا طول مسیر انتقال را کوتاهتر نماید. متغیر  $\lambda_{ts}$  مشخص می‌کند که خدمات  $s$  چه مدت زمانی می‌تواند فعال باشد بطوریکه معنای این قید این است که مسیر نمی‌تواند بدون ارائه خدمات تشکیل شود. یعنی حداقل باید به تعدادی از خدمات زمان تخصیص شود.

$$(17) \quad \sum_{s \in S} \lambda_{ts} l_f \geq \Delta l$$

در رابطه (۱۷) عبارت  $\Delta l$  مقدار داده‌ای است که الگوریتم MILP منتقل و پردازش نموده است. این قید تضمین می‌کند روش OPRRS نسبت به روش MILP، نرخ انتقال داده را افزایش دهد.

اضافه کردن قیدهای جدید ممکن است مدل خطی بهینه سازی MILP را نشدنی یا غیر بهینه کند. دو شرط شدنی بودن و بهینگی دو شرط اساسی هستند که یک مدل خطی بهینه ساز باید از آن برخوردار باشد. در این تحقیق از اثبات ریاضی شدنی بودن و بهینگی مدل MILP جدید صرف نظر می‌کنیم و در حین انجام محاسبات و شبیه سازی، این دو شرط را در عمل توسط محیط برنامه سازی مورد پیگیری قرار می‌دهیم.

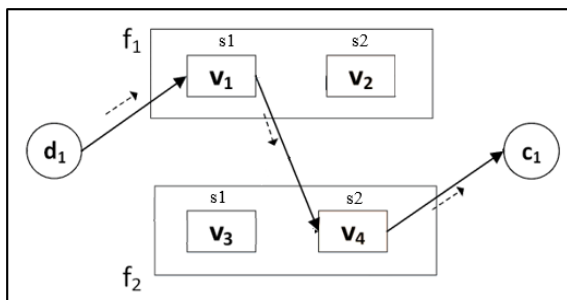
با افزودن پارامتر و متغیرهای اولیت بندی، صف بندی، زمانی و غیره به مدل OPRRS، می‌توان نسخه‌های جدید دیگری را برای حل سایر مسائل ابداع نمود. مثلاً می‌توان با صفر کردن متغیر زمان در یک گره، زمان عملکرد آن گره را صفر کنیم، لذا در عمل آن گره نمی‌تواند در انتقال داده مشارکت کند. با این سیاست می‌توان گره‌هایی که مصرف انرژی قهوه‌ای زیادی

<sup>۹</sup>Cplex

طبق نتایج به دست آمده، نتایج در جدول ۲ و شکل ۸ نمایش داده شده است. سرویس ۱ از گره مه (۱)  $x_{sf1}$  با مقدار ۱ یعنی این سرویس وجود دارد، و سرویس ۴ که کپی سرویس ۲ در گره مه ۱ است، به عنوان دومین سرویس با احتمال ۰.۶۶۷ که معادل احتمال قطعی است انتخاب می‌شود و بقیه سرویس‌ها نیز مقدار ۰ دارند. چون سرویس ۱ و از گره مه ۱ و سرویس ۴ از گره مه ۲ انتخاب شده است، پس هر دو گره مقدار ۱ خواهند داشت و فعال خواهند بود.

حال مقادیر دو پارامتر  $G$  و  $E$  را مطابق با بخش ۲-۶ برای هر دو گره مه  $f1$  و  $f2$  در مسیر  $P_1$  محاسبه می‌کنیم. توجه شود در هر انتقال از یک گره به گره دیگر، نرخ انتقال دارای مقدار کمینه و بیشینه است. به عنوان مثال بازه‌ی نرخ انتقال از منبع تولید داده  $d1$  به گره مه ۱ برابر با  $0.4 \leq \lambda_{sw2} \leq 0.8$  است که کمینه نرخ در این بازه برابر با مقدار ۰.۴ و بیشینه مقدار در این بازه برابر با ۰.۸ است. لذا مطابق با

جدول ۳ مقدار کمینه و بیشینه مصرف انرژی های  $G$  و  $E$  برای دو گره  $f1$  و  $f2$  محاسبه شده و ارائه گردیده است.



شکل ۸: نمایش جدول ۲ به صورت مسیر بهینه در مسیر  $P_1 = \langle d_1, v_1, v_4, c_1 \rangle$  این مسیر جواب بهینه مصرف انرژی است که جریان داده از  $d_1$  به  $c_1$  و نحوه استفاده از سرویسهای  $s1$  و  $s2$  در راس های  $v1$  و  $v4$  در گره های مه  $f1$  و  $f2$  را نمایش می‌دهد. (آزمایش ۱).

جدول ۳: مقدار مصرف انرژی به صورت  $G$  و  $E$  برای دو گره  $f1$  و  $f2$  بر روی مسیر  $P_1$  در آزمایش ۱

انرژی گره	مقدار G min-Max	مقدار E min-Max	نرخ انتقال min-Max
گره مه $f1$ و $f2$	min=2.62, Max=2.88	min=2.78, Max=3.04	min=0.9, Max=2.2

### آزمایش ۲ (اجرای آزمایش ۱ با قید زمان)

در آزمایش دوم، علاوه بر تمام متغیرها و شروط موجود در آزمایش اول، شرط ۱۶ و ۱۷ را نیز اضافه می‌کنیم و روش OPRRS را اجرا می‌کنیم.

نتایج آزمایش طبق جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، این بار سرویس‌های ۱ و ۲ در گره  $f1$  فعال

### آزمایش ۱ (بدون قید زمان)

آزمایش خود را طبق سناریوی موجود در شکل ۷ ارائه می‌دهیم. در این سناریو  $b(v_2) = b(v_1) = b(v_3) = S_1$  و  $b(v_4) = S_2$  و  $h(v_3) = h(v_1) = h(v_2) = f_1$  و  $h(v_4) = f_2$  . مرحله اول آزمایش را یکبار بدون وجود عامل زمان توسط روش MILP و یکبار هم با وجود عامل زمان توسط روش OPRRS انجام می‌دهیم. اعداد تعیین شده برای پارامترها، اعدادی تصادفی هستند. در این آزمایش از ۲ گره و ۲ سرویس استفاده شده است که هر سرویس دارای یک کپی در گره مه دیگر است. در این آزمایش  $\alpha = 0.6$ ،  $\gamma_s = 0.3$ ،  $\lambda_{uc1} = 0.4 \leq \lambda_{uc1} \leq 1$ ،  $\lambda_{uc2} = 0.7$  (بازه‌ی نرخ انتقال از سرویس موجود در گره مه ۱ به مقصد)،  $\lambda_{uc3} = 0.1 \leq \lambda_{uc3} \leq 0.8$  (بازه‌ی نرخ انتقال از سرویس موجود در گره مه ۲ به مقصد)،  $\lambda_{uc4} = 0.3 \leq \lambda_{uc4} \leq 0.6$  (بازه‌ی نرخ انتقال از سرویس موجود در گره مه ۳ به مقصد)،  $\lambda_{uc5} = 0.2 \leq \lambda_{uc5} \leq 0.7$  (بازه‌ی نرخ انتقال از سرویس موجود در گره مه ۴ به مقصد)،  $\lambda_{uc6} = 0.1 \leq \lambda_{uc6} \leq 0.8$  (بازه‌ی نرخ انتقال از سرویس موجود در گره مه ۱ به مقصد)،  $\lambda_{uc7} = 0.3 \leq \lambda_{uc7} \leq 0.6$  (بازه‌ی نرخ انتقال از سرویس موجود در گره مه ۲ به مقصد) است. با اجرای روش MILP، نتایج آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مقادیر به دست آمده در آزمایش ۱ برای نرخ ارسال داده، انتخاب سرویس‌ها و گره‌های مه بدون وجود متغیر زمان.  $x_{sf}$  (سرویس  $S$  در گره مه  $f$ )،  $y_{f1}$  (گره مه  $f$ )،  $\lambda_{uv}$  (نرخ ارسال داده از یک سرویس به سرویس دیگر)،  $\lambda_{sw}$  (نرخ ارسال داده از منبع تولید داده به گره مه)،  $\lambda_{uc}$  (نرخ ارسال داده از سرویس به مقصد) - (آزمایش ۱)

پارامتر	مقدار
$x_{sf1}$	1
$x_{sf2}$	0
$x_{sf3}$	0
$x_{sf4}$	$(0.667) \equiv 1$
$y_{f1}$	1
$y_{f2}$	1
$\lambda_{sw1}$	0.4-0.8
$\lambda_{uv1,4}$	0.2-0.7
$\lambda_{uc}$	0.3-0.7

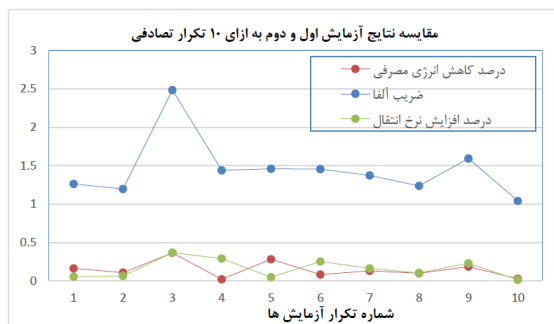
با بخش ۲-۶ برای هر دو گره مه  $f1$  و  $f2$  در مسیر  $P_2$  محاسبه می‌کنیم (جدول ۵).

جدول ۵: مقدار مصرف انرژی به صورت  $E$  و  $G$  برای دو گره  $f1$  و  $f2$  بر روی مسیر  $P_2$  در آزمایش ۲

انرژی گره	مقدار G min-Max	مقدار E min-Max	نرخ انتقال min-Max
گره مه $f1$ و $f2$	min=2.00, Max=2.36	min=2.08, Max=2.44	min=0.9, Max=2.7

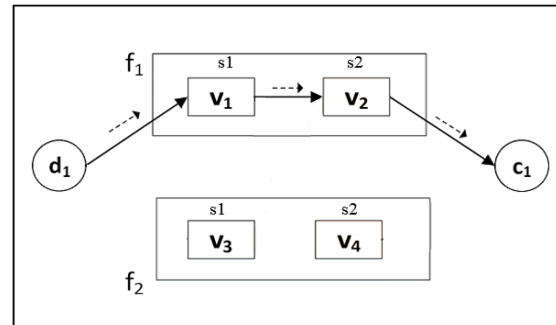
در آزمایش دوم دیده می‌شود که گره  $f2$  برای انتقال و پردازش استفاده نشده است لذا مصرف انرژی استاتیک کاهش یافته است. همچنین مسیر  $P_2 = \langle d_1, V_1, V_2, c_1 \rangle$  کوتاهتر بوده و نرخ انتقال آن نیز از نرخ انتقال مسیر  $P_1 = \langle d_1, V_1, V_4, c_1 \rangle$  بیشتر است. لذا آزمایش دوم با مصرف کمتر انرژی موفق شده است داده‌های بیشتری را منتقل داده و پردازش نماید. مسیر  $P_2$  در مقایسه با مسیر  $P_1$  انرژی مصرفی را به میزان ۲۰٪ کاهش داده و نرخ انتقال داده را نیز به میزان ۱۹٪ افزایش داده است. این نکته نشان می‌دهد که آزمایش دوم مسیرهای با طول کوتاهتر و نرخ انتقال بیشتر را انتخاب می‌کند. البته کاهش تعداد گره‌های مه نیز در آزمایش دوم مشهود است.

همچنین مقدار ضریب  $\alpha$  برای آزمایش‌های ۱ و ۲ برابر است با 1.53 که نشان می‌دهد روش OPRRS نسبت به روش MILP کارایی بیشتری دارد. با ۱۰ بار تکرار کردن آزمایش‌های ۱ و ۲ برای مقادیر تصادفی پارامترها، شکل ۱۰ حاصل می‌شود که نشان می‌دهد روش OPRRS نسبت به روش MILP نرخ مصرف انرژی را کاهش و نرخ انتقال داده و مقدار  $\alpha$  را افزایش داده است.



شکل ۱۰: آزمایش ۲ نسبت به آزمایش ۱ ضریب آلفا و نرخ انتقال را افزایش داده و نرخ مصرف انرژی را کاهش داده است. با اعمال شرطهای جدید زمانی، مسیرها کوتاهتر و کم انرژی تر شده اند و داده‌ها در زمان کوتاهتر و با مصرف کمتر انرژی منتقل و پردازش شده‌اند.

هستند. در واقع در آزمایش دوم به دلیل وجود متغیر زمان و در نظر گرفتن زمان پردازش آن، گره‌های متفاوتی انتخاب شدند. وجود متغیر زمان سیستم را وادار به انتخاب سرویس‌هایی با زمان پردازش کمتر و نرخ انتقال داده بیشتر می‌کند. مشاهده می‌شود که در این مسیر، تعداد گره‌های مه کاهش یافته و نرخ انتقال نیز افزایش داشته است. از طرف دیگر سطح انرژی مصرفی نیز کاهش داشته است.



شکل ۹: نمایش نتایج جدول ۴ به صورت مسیر بهینه محاسبه شده به صورت  $P_2 = \langle d_1, V_1, V_2, c_1 \rangle$ . این مسیر جواب بهینه مصرف انرژی است که جریان داده از  $d_1$  به  $c_1$  و نحوه استفاده از سرویسهای  $S1$  و  $S2$  در راس‌های  $v_1$  و  $v_2$  در گره مه  $f1$  را نمایش می‌دهد.

جدول ۴: مقادیر به دست آمده از آزمایش ۲ برای نرخ ارسال داده، انتخاب سرویس‌ها و گره‌های مه با وجود متغیر زمان.  $X_{sf}$  (سرویس  $S$  در گره مه  $f$ ),  $Y_{f1}$  (گره مه  $f$ ),  $\lambda_{uv}$  (نرخ ارسال داده از یم سرویس به سرویس دیگر),  $\lambda_{sw}$  (نرخ ارسال داده از منبع تولید داده به گره مه),  $\lambda_{uc}$  (نرخ ارسال داده از سرویس به مقصد) (آزمایش ۲)

پارامتر	مقدار
$x_{sf1}$	1
$x_{sf2}$	$(0.667) \equiv 1$
$x_{sf3}$	0
$x_{sf4}$	0
$y_{f1}$	1
$y_{f2}$	0
$\lambda_{sw1}$	0.4-0.8
$\lambda_{uv1,2}$	0.1-0.9
$\lambda_{uc}$	0.4-1.0

همانطور که در جدول ۴ دیده می‌شود، گره  $f2$  در مسیر انتقال وجود ندارد. این روش برای زمانی که زمان یک پارامتر مهم در نظر گرفته شود، مناسب است. انتخاب گره و سرویس در روش OPRRS تابعی از طول مسیر و طول زمان است و این دو پارامتر هستند که تعیین می‌کنند کدام گره، کدام سرویس و کدام یال انتخاب شود. حال مقادیر دو پارامتر  $E$  و  $G$  را مطابق

### آزمایش ۳

در آزمایش دیگری ۴ گره مه که هر کدام دارای ۲ سرویس می‌باشد و هر سرویس این بار دارای ۳ کپی است، انجام می‌دهیم. مشخصات سرویس‌ها و گره‌های مه به صورت زیر است:

$$b(v_1) = b(v_2) = b(v_3) = b(v_4) = S_1$$

$$b(v_5) = b(v_6) = b(v_7) = b(v_8) = S_2$$

$$h(v_2) = h(v_6) = f_2, h(v_1) = h(v_5) = f_1$$

$$h(v_4) = h(v_8) = f_4, h(v_3) = h(v_7) = f_3$$

مرحله اول آزمایش ۳ را یکبار بدون وجود عامل زمان و یکبار هم با وجود عامل زمان انجام می‌دهیم. اعداد تعیین شده برای پارامترها اعدادی تصادفی هستند و ممکن است به ازای سایر اعداد نتایج متفاوتی به دست آید. در این آزمایش  $\alpha = 0.6$

$$a_{f1} = G_f = 0.08, l_f = 0.2, \gamma_s = 0.3, r_s = 0.6$$

$$b_f = 0, a_{f4} = 0.5, a_{f3} = 0.7, a_{f2} = 0.5, 0.7$$

$$0.4 \leq \lambda_{uc1} \leq 1, 0.6$$

موجود در گره مه ۱ به مقصد،  $0.3 \leq \lambda_{uc2} \leq 0.7$  (بازهی

نرخ انتقال از سرویس موجود در گره مه ۲ به مقصد)،  $0.2 \leq$

$$\lambda_{uc3} \leq 1$$
 (بازهی نرخ انتقال از سرویس موجود در گره مه ۳

به مقصد)،  $0.1 \leq \lambda_{uc4} \leq 1$  (بازهی نرخ انتقال از سرویس

موجود در گره مه ۴ به مقصد)،  $0.4 \leq \lambda_{sw1} \leq 0.8$

نرخ انتقال از منبع تولید داده به گره مه ۱)،  $0.4 \leq \lambda_{sw2} \leq$

0.8 (بازهی نرخ انتقال از منبع تولید داده به گره مه ۲)،

$$0.4 \leq \lambda_{sw3} \leq 0.9$$
 (بازهی نرخ انتقال از منبع تولید داده

به گره مه ۳)،  $0.3 \leq \lambda_{sw4} \leq 0.7$  (بازهی نرخ انتقال از

منبع تولید داده به گره مه ۴)،  $0.1 \leq \lambda_{uv1} \leq 0.9$  (نرخ

انتقال داده از سرویس ۱ به سرویس ۵ در داخل گره مه ۱)،

$$0.2 \leq \lambda_{uv2} \leq 0.7$$
 (نرخ انتقال داده از سرویس ۱ موجود

در گره مه ۱ به سرویس ۶ در گره مه ۲)،  $0.2 \leq \lambda_{uv3} \leq$

0.6 (نرخ انتقال داده از سرویس ۱ موجود در گره مه ۱ به

سرویس ۷ در گره مه ۳)،  $0.4 \leq \lambda_{uv4} \leq 0.5$  (نرخ انتقال

داده از سرویس ۱ موجود در گره مه ۱ به سرویس ۸ در گره

مه ۴)،  $0.2 \leq \lambda_{uv5} \leq 0.7$  (نرخ انتقال داده از سرویس

۲ به سرویس ۶ در داخل گره مه ۲)،  $0.1 \leq \lambda_{uv6} \leq 0.9$

(نرخ انتقال داده از سرویس ۲ موجود در گره مه ۲ به سرویس ۵

در گره مه ۱)،  $0.4 \leq \lambda_{uv7} \leq 0.6$  (نرخ انتقال داده از

سرویس ۲ موجود در گره مه ۲ به سرویس ۷ در گره مه ۳)،

$$0.4 \leq \lambda_{uv8} \leq 0.6$$
 (نرخ انتقال داده از سرویس ۲ موجود

در گره مه ۲ به سرویس ۸ در گره مه ۴)،  $0.5 \leq \lambda_{uv9} \leq$

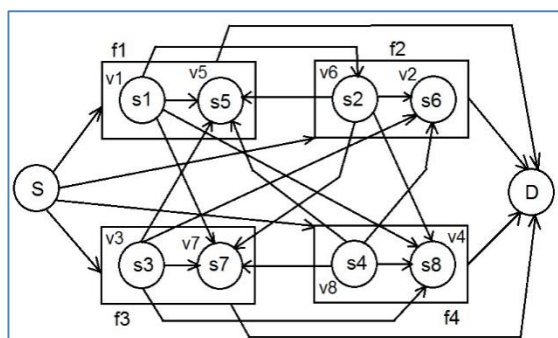
0.9 (نرخ انتقال داده از سرویس ۳ به سرویس ۷ در داخل گره

مه ۳)،  $0.2 \leq \lambda_{uv10} \leq 0.7$  (نرخ انتقال داده از سرویس ۳

موجود در گره مه ۳ به سرویس ۵ در گره مه ۱)،  $0.1 \leq$

$$\lambda_{uv11} \leq 0.5$$
 (نرخ انتقال داده از سرویس ۳ موجود در گره

مه ۳ به سرویس ۶ در گره مه ۲)،  $0.3 \leq \lambda_{uv12} \leq 0.8$  (نرخ انتقال داده از سرویس ۳ موجود در گره مه ۳ به سرویس ۸ در گره مه ۴)،  $0.5 \leq \lambda_{uv13} \leq 0.7$  (نرخ انتقال داده از سرویس ۴ به سرویس ۸ در داخل گره مه ۴)،  $0.1 \leq$   
 $\lambda_{uv14} \leq 0.9$  (نرخ انتقال داده از سرویس ۴ موجود در گره مه ۴ به سرویس ۵ در گره مه ۱)،  $0.4 \leq \lambda_{uv15} \leq 0.9$  (نرخ انتقال داده از سرویس ۴ موجود در گره مه ۴ به سرویس ۶ در گره مه ۲)،  $0.2 \leq \lambda_{uv16} \leq 0.5$  (نرخ انتقال داده از سرویس ۴ موجود در گره مه ۴ به سرویس ۷ در گره مه ۳)، است.



شکل ۱۱: گراف اتصال بین سرویس‌ها و گره‌های آزمایش سوم در این شکل نمایش داده شده است. این گراف مسیر انتقال و پردازش بین گره‌ها را نمایش می‌دهد. مسیرهای با سطح انرژی مصرفی کمتر و نرخ انتقال بالاتر بر اساس این گراف قابل محاسبه هستند.

هدف از انجام آزمایش ۳ این است که بین دو گره S و D مسیرهای با سطح انرژی پایین‌تر و نرخ انتقال داده بالاتر انتخاب شوند. ابتدا مساله را به صورت تک نشستی بین دو گره S و D حل می‌کنیم. منظور این است که در هر مرحله فقط یک مسیر بین مبدا و مقصد محاسبه خواهد شد. در مرحله بعد به طور همزمان بیش از یک نشست را بین مبدا و مقصد برقرار نموده و رفتار الگوریتم جدید و قبلی را تحلیل خواهیم نمود. نتایج حاصل از اجرای روشهای MILP و OPRRS به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ دیده می‌شود. این جداول نشان می‌دهند که کدام مسیرها، کدام گره‌ها و کدام سرویس‌ها در هر دو روش مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

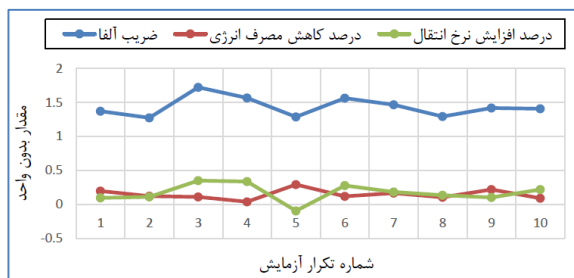
جدول ۶: مقادیر به دست آمده برای نرخ ارسال داده، انتخاب سرویس‌ها و گره‌های مه بدون در نظر گرفتن متغیر زمان.  $X_{sf}$  (سرویس S در گره مه f)،  $\gamma_{f1}$  (گره مه f)،  $\lambda_{uv}$  (نرخ ارسال داده از یک سرویس به سرویس دیگری)،  $\lambda_{sw}$  (نرخ ارسال داده از منبع تولید داده به گره مه)،  $\lambda_{uc}$  (نرخ ارسال داده از سرویس به مقصد). (اجرای روش MILP) (آزمایش ۳)

پارامتر	مقدار
$X_{sf1}$	0

جدول ۸: مقادیر به دست آمده برای نرخ ارسال داده، انتخاب سرویس‌ها و گره‌های مه با در نظر گرفتن متغیر زمان.  $x_{sf}$  (سرویس S در گره مه f)،  $y_{f1}$  (گره مه f)،  $\lambda_{uv}$  (نرخ ارسال داده از یک سرویس به سرویس دیگر)،  $\lambda_{sw}$  (نرخ ارسال داده از منبع تولید داده به گره مه)،  $\lambda_{uc}$  (نرخ ارسال داده از سرویس به مقصد). (اجرای روش OPRRS (آزمایش ۳)

پارامتر	مقدار
$x_{sf1}$	1
$x_{sf2}$	0
$x_{sf3}$	0
$x_{sf4}$	0
$x_{sf5}$	$0.750 \equiv 1$
$x_{sf6}$	0
$x_{sf7}$	0
$x_{sf8}$	0
$y_{f1}$	1
$y_{f2}$	0
$y_{f3}$	0
$y_{f4}$	0
$\lambda_{uv1.5}$	0.1-0.9
$\lambda_{sw1}$	0.4-0.8
$\lambda_{uc}$	0.4-1.0

با تکرار ۱۰ بار آزمایش MILP و OPRRS برای مقادیر تصادفی پارامترها، شکل ۱۲ حاصل می‌شود که نشان می‌دهد روش دوم نسبت به روش اول نرخ مصرف انرژی را کاهش و نرخ انتقال داده و مقدار  $\alpha$  را افزایش داده است.



شکل ۱۲: اجرای روشهای OPRRS و MILP در آزمایش سوم و مشاهده ضریب آلفا و تغییرات مصرف انرژی و نرخ انتقال داده.

در شکل ۱۱ بین مبدا S و مقصد D بیش از یک مسیر وجود دارد. مسیرهای متعددی بین این دو گره وجود دارند که خدمات و گره‌های مه متعددی را شامل می‌شوند. لذا پس از اجرای روشهای OPRRS و MILP برای بار اول و انتخاب یک مسیر، انتظار می‌رود با اجرای بار دوم آنها، مسیرهای دوم هم بین S و D قابل تشکیل باشد. با توجه به اینکه اجرای بار

$x_{sf2}$	0
$x_{sf3}$	1
$x_{sf4}$	0
$x_{sf5}$	0
$x_{sf6}$	0
$x_{sf7}$	$0.75 \equiv 1$
$x_{sf8}$	0
$y_{f1}$	0
$y_{f2}$	0
$y_{f3}$	1
$y_{f4}$	0
$\lambda_{uv3.7}$	0.5-0.9
$\lambda_{sw3}$	0.4-0.8
$\lambda_{uc}$	0.2-1.0

طبق نتایج به دست آمده مسیر  $P_1 = \langle S, V_3, V_7, D \rangle$  انتخاب شده و داده از منبع تولید جهت پردازش به گره مه ۳ رفته و ابتدا سرویس ۳ آن را پردازش کرده و از بین کپی‌های دومین سرویس، سرویس ۷ را برای پردازش بعدی انتخاب می‌کند. سپس داده‌های پردازش شده از گره مه ۳ با نرخ انتقال ۰,۴ به سمت مقصد فرستاده می‌شوند.

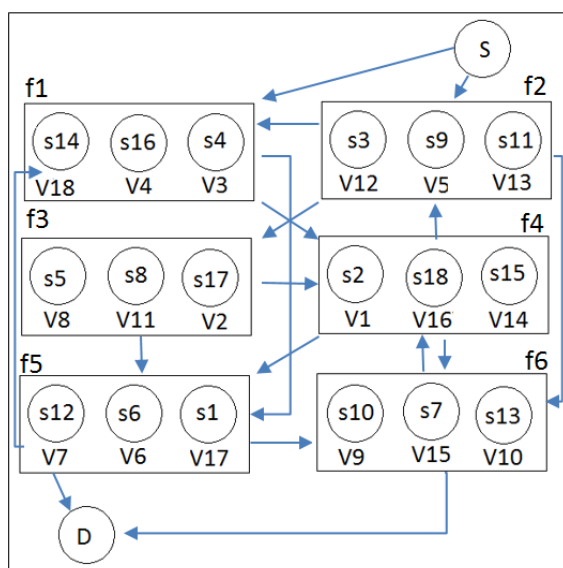
انرژی / مسیر	مقدار G min-Max	مقدار E min-Max	نرخ انتقال min-Max
$P_1$	min=2.04, Max=2.36	min=2.12, Max=2.44	min=1.1, Max=2.7
$P_2$	min=1.80, Max=2.16	min=1.88, Max=2.24	min=0.9, Max=2.7

جدول ۷: اجرای الگوریتم‌های قبلی و جدید برای آزمایش سوم و محاسبه نرخ انتقال داده و مصرف انرژی برای مساله با توجه به هر دو حالت بدون قیدهای زمان و محسوب نمودن قیدهای زمان. (آزمایش ۳)

در مرحله بعدی آزمایش برای هر سرویس (۱ تا ۸) را با توجه به متغیرها و معادلات زمان در نظر گرفته و روش OPRRS را اجرا می‌کنیم. پس از اجرا روش OPRRS، مسیر  $P_1 = \langle S, V_1, V_5, D \rangle$  انتخاب می‌شود که مقدار مصرفی انرژی و نرخ انتقال داده آن به شرح جدول ۸ است. طبق جدول ۷ مشاهده می‌شود که مسیر  $P_2$  نسبت به مسیر  $P_1$  مصرف انرژی را کاهش داده است. همچنین مقدار ضریب  $\alpha$  برای روش OPRRS نسبت به روش MILP برابر است با 1.09 که نشان می‌دهد روش دوم نسبت به روش اول کارایی بیشتری دارد.

مه در غالب متغیرها و پارامترهای  $b(v_i)$ ،  $h(v_i)$ ،  $y_{fi}$  و  $\lambda_{uvij}$  به صورت تصادفی در برنامه شبیه‌سازی برای گره‌ها و سرویس‌ها تولید می‌شود.

آزمایش ۴ را یکبار بدون وجود عامل زمان و یکبار هم با وجود عامل زمان انجام می‌دهیم. در این آزمایش  $r_s = \alpha = 0.7$ ،  $a_{f1} = 0.55$ ،  $G_f = 0.07$ ،  $l_f = 0.2$ ،  $\gamma_s = 0.35$ ،  $a_{f2} = 0.55 \cdot 0.7$ ،  $a_{f3} = 0.6$ ،  $a_{f4} = 0.5$ ،  $a_{f5} = 0.6 \cdot 0.5$ ،  $a_{f6} = 0.6 \cdot 0.5$  برای  $0.4 \leq \lambda_{uc} \leq 1$ ،  $b_f = 0.55$ ، بین هر دو سرویس متمایز در هر گره مه، ارتباط وجود دارد. ارتباط بین گره‌های مه و خدمات نیز مطابق شکل ۱۴ رسم شده است.

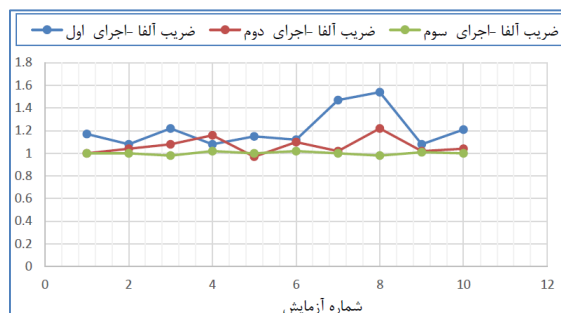


شکل ۱۴: گراف همبستگی بین گره‌های مه در آزمایش شماره ۴. گراف اتصال بین سرویس‌ها و گره‌های آزمایش ۴ در این شکل نمایش داده شده است. این گراف مسیر انتقال و پردازش بین گره‌ها و سرویس‌ها را نمایش می‌دهد. همه خدمات داخل یک گره مه با یکدیگر ارتباط دارند. در عوض مسیرهای بین گره‌ها محدود شده است. توجه شود، این توپولوژی چگالی پردازش در گره مه را افزایش داده است. به عبارتی پیچیدگی پردازش بین گره‌ها را کاهش داده اما مسیرها را طولانی‌تر نموده است. نوع خدمات S1 الی S15 متمایز بوده و در کل شبکه توزیع تصادفی خواهند داشت. لذا بسته-های اطلاعاتی برای برخورداری از این خدمات، ممکن است مسیرهای طولانی‌تری را طی کنند. لذا در این شبکه مصرف انرژی، انرژی انتقال و نرخ انتقال داده‌ها می‌تواند به شدت قهوه‌ای شود.

شکل ۱۵ نتایج شبیه‌سازی برای گراف شکل ۱۴ را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود در این حالت ضریب آلفا به نزدیکی ۱.۸ نیز افزایش می‌یابد. این شبیه‌سازی نشان می‌دهد با بزرگتر شدن اندازه شبکه، کارایی الگوریتم OPRRS در مقایسه با MILP افزایش بیشتری می‌یابد.

اول روشها منابع شبکه را کاهش می‌دهد، لذا منابع شبکه هنگام اجرای بار دوم مقداری کاهش خواهد یافت. لذا ممکن است به دلیل کاهش منابع شبکه، مسیرهای بین S و D برای بار دوم یا سوم قابل تشکیل نباشد. به عبارت دیگر تعداد مسیرهای قابل استفاده بین مبدا و مقصد کاهش یافته یا مسیری برای تشکیل شدن وجود نخواهد داشت. به همین ترتیب با اجرای بار سوم، احتمال تشکیل نشدن مسیرهای مرحله سوم بین مبدا و مقصد بیشتر می‌شود.

شکل ۱۳ نتایج حاصل از اجرای ۱۰ آزمایش تصادفی بر روی شکل ۱۱ را نمایش می‌دهد. در هر آزمایش نیز سه بار به صورت متوالی روشهای OPRRS و MILP روی گراف شبکه اجرا شده است. تغییرات ضریب آلفا در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب آلفا در اجرا-های سوم تقریباً به سمت عدد ۱ میل کرده است که این موضوع نشان می‌دهد با کاهش منابع شبکه، مسیرهای انتخاب شده توسط دو روش OPRRS و MILP یکسان و مشابه می‌شوند. به دلیل مصرف شدن بخش زیادی از منابع شبکه در سه اجرای قبلی، در بعضی موارد هنگام اجرای چهارم این روشها، هیچ مسیری بین مبدا و مقصد تشکیل نمی‌دهند.



شکل ۱۳: نمایش نتایج حاصل از اجرای ۱۰ آزمایش روی شکل ۱۱. در هر آزمایش روشهای MILP و OPRRS به صورت متوالی سه بار اجرا شده‌اند. ضریب آلفا در اجرای اول بیشتر از مقدار آن در اجرای سوم است. به دلیل کاهش منابع شبکه، مسیرهای موجود بین مبدا و مقصد نیز کاهش یافته یا حذف شده‌اند. لذا هر دو روش مسیرهای یکسان و مشابه برای انتقال و پردازش داده‌ها انتخاب کرده‌اند. مشاهده می‌شود روش OPRRS بهتر از روش MILP عمل کرده است.

مثالهای ارائه شده در بالا به خوبی نشان می‌دهند که روش OPRRS نسبت به روش MILP از عملکرد بهتری در سرعت انتقال داده، سرعت انجام پردازش و کاهش مصرف انرژی دارد.

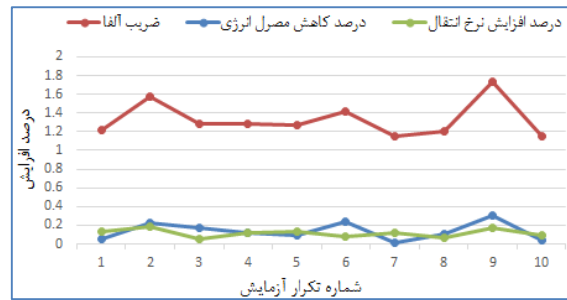
#### آزمایش ۴

به عنوان یک توپولوژی بزرگتر، در این آزمایش، ۶ گره مه که هر کدام دارای ۳ سرویس می‌باشد و هر سرویس این بار دارای ۴ کپی است، انجام می‌دهیم. مشخصات سرویس‌ها و گره‌های

ها بین یک مبدا و یک مقصد به صورت تک‌پراکن انجام شد. مدلسازی مصرف انرژی برای یک گره مبدا و بیش از یک گره مقصد خود تحقیق مفید و مهم دیگری است که قابل انجام است. توجه شود امروزه انتقالات تک پراکن بخش کوچکی از انتقالات جهانی بوده و بیشتر کاربردها در شبکه‌های مه به صورت چندپراکنی است. لذا تعمیم تحقیق مطرح شده در این مقاله از شرایط تک پراکنی به شرایط چندپراکنی می‌تواند بخش مهمی از چالش‌های مصرف انرژی در شبکه‌های مه سایبر فیزیکی را مرتفع سازد. در شبکه‌های مه سایبر فیزیکی، در مقایسه با روشهای تک‌پراکن، انتظار می‌رود روشهای چندپراکن مصرف انرژی کمتری داشته و چارچوب مناسبی برای سبز کردن شبکه‌های مه سایبر فیزیکی باشند.

### مراجع

- [1] D. Zeng, L. Gu, and H. Yao, Towards energy efficient service composition in green energy powered Cyber-Physical Fog Systems, *Future Generation Computer Systems*, 2020, 105, pp. 757-765.
- [2] Md Zakirul Alam Bhuiyan, Guojun Wang, Jie Wu, Jiannong Cao, Xue-feng Liu, and Tian Wang, Dependable Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, August 2017, 14(4): pp. 363-376.
- [3] Zhang, J., Tang, J., Wang, T. and Chen, F., Energy-efficient data-gathering rendezvous algorithms with mobile sinks for wireless sensor networks, *International Journal of Sensor Networks*, 12 April 2017, Vol. 23, No. 4, pp. 248-257.
- [4] Wang, B., Gu, X., Ma, L. and Yan, S., Temperature Error Correction based on BP Neural Network in Meteorological WSN, *International Journal of Sensor Networks*, April 2017, vol. 23, no. 4, pp. 265-278.
- [5] Sun, Y. and Gu, F., Compressive sensing of piezoelectric sensor response signal for phased array structural health monitoring, *International Journal of Sensor Networks*, 2017, Vol. 23, No. 4, pp. 258-264
- [6] C. Chang, S. N. Srirama, M. Liyanage, A service-oriented mobile cloud middleware framework for provisioning mobile sensing as a service, in: *Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, 2015 IEEE 21st International Conference on, Melbourne, VIC, Australia, 2015, pp. 124-131.
- [7] M. A. Gray, Spheres: A web services framework for smartphone sensing as a service, in: *Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, 2015 9th International Conference



شکل ۱۵: نتایج شبیه سازی برای آزمایش ۴

### نتیجه‌گیری و کارهای آینده

با توجه به گسترش روزافزون نیاز به اجرای پردازش‌های پیچیده با انرژی کمتر و نیز برای مقابله با محدودیت‌های قرارگیری خدمات در محیط ابر محاسباتی، این تحقیق بر کمینه کردن مصرف انرژی در محیط مه با خدمات CPS از طریق برنامه ریزی خطی دارد.

در این مقاله ابتدا انرژی استاتیک، انرژی دینامیک، انرژی ارتباطی، و نرخ انتقال داده در شبکه‌ی ارتباطی از نوع مه سایبر فیزیکی تحلیل و بررسی شد. سپس ضمن بکارگیری اصل و مفاهیم برنامه ریزی خطی، موارد ظرفیت مسیره‌ها، پارامترهای توپولوژیکی شبکه، زمان، منابع مصرف شده و سایر ویژگی‌های مرتبط با مصرف انرژی، مدلسازی شد.

بسیاری از روشهای موجود برای کاهش مصرف انرژی در شبکه مه سایبر فیزیکی نقاط ضعف متعددی دارند. این تحقیق یک روش جدید بهینه برای رفع این نقاط ضعف ارائه نمود. بسیاری از روشهای موجود توجهی به نسبت بین نرخ انتقال بهینه و نرخ مصرف بهینه انرژی ندارند و مسیرهای بهینه‌ای که برای انتقال و پردازش داده انتخاب می‌کنند سطح انرژی پایینی ندارند.

این تحقیق با لحاظ کردن متغیر و معادلات زمان و تاثیر دادن آنها بر مدل بهینه MILP، روش جدیدی برای رفع نقاط ضعف روشهای موجود ارائه نمود. روش جدید که OPRRS نامیده می‌شود، تلاش می‌کند بین گره‌های مه شبکه، مسیرهای کوتاهتری را انتخاب نماید که سطح انرژی مصرفی پایین تر و نرخ انتقال داده بالاتری داشته باشند. روش OPRRS در مقایسه با روش MILP، مکانیزم موثری را برای سبز کردن شبکه‌های مه سایبر فیزیکی مبتنی بر مه ارائه نمود و مصرف انرژی قهوه‌ای را کاهش می‌دهد.

### تحقیقات آینده

در این تحقیق فرض شد که مبدا فقط شامل یک گره مه و مقصد نیز فقط شامل یک گره مه بوده و انتقال و پردازش داده

- workload allocation in cloud-fog computing, in: 2015 IEEE International Conference on Communications, IEEE, 2015.
- [20] Bereket Abera Yilma, Herve Panetto, Systemic formalisation of Cyber-Physical-Social System (CPSS): A systematic literature review, *Computers in Industry*, 2021, Vol. 129, pp. 43-59.
- [21] S. Wang, R. Urgaonkar, M. Zafer, T. He, K. Chan, K. K. Leung, Dynamic service migration in mobile edge-clouds, in: 2015 IFIP Networking Conference (IFIP Networking), IEEE, 2015, pp. 1-9.
- [22] M. Aazam, E.-N. Huh, Fog Computing and Smart Gateway Based Communication for Cloud of Things, in: 2014 International Conference on Future Internet of Things and Cloud, IEEE, 2014, pp. 464-470.
- [23] Jing Liu, Jinlong Lin, Design optimization of WirelessHART networks in Cyber-Physical Systems, *Journal of Systems Architecture*, 2019, Vol. 79, pp. 168-184.
- [24] He Jiang, Huaguang Zhang, Xiangpeng Xie, Critic-only adaptive dynamic programming algorithms' applications to the secure control of cyber-physical systems, *ISA Transactions*, 2020, Vol. 12, pp. 24-35.
- [25] [25] Shuaiyin Ma, Yingfeng Zhang, , Energy-cyberphysical system enabled management for energy-intensive manufacturing industries, *Journal of Cleaner Production*, 2019, Volume 226, pp 892-903.
- [26] Jose-Miguel Horcas, Mónica Pinto, Lidia Fuentes, Context-aware energy-efficient applications for cyber-physical systems, *Ad Hoc Networks*, 2019, Vol. 82, pp. 15-30.
- [27] Daniel-Jesus Munoz, José A. Montenegro, Mónica Pinto, Energy-aware environments for the development of green applications for cyber-physical systems, *Future Generation Computer Systems*, 2019, Vol. 91, pp. 536-554.
- [28] Peter Donovan, Colm Gallagher, Ken Bruton, A fog computing industrial cyber-physical system for embedded low-latency machine learning Industry 4.0 applications, *Manufacturing Letters*, 2018, Vol. 15, Part B, pp. 139-142.
- [29] Eugenia Ana Capota, Cristina Sorina Stangaciu, Towards mixed criticality task scheduling in cyber physical systems: Challenges and perspectives, *Journal of Systems and Software*, 2019, Vol. 156, pp. 204-216.
- [30] Sunday Oyinlola Ogundoyin, Ismaila Adeniyi Kamil, Optimization Techniques and Applications in Fog Computing: An Exhaustive Survey, *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, In res.
- on, Cambridge, UK, 9-11 Sept. 2015, pp. 19-28.
- [8] S. Abdelwahab, B. Hamdaoui, M. Guizani, T. Znati, Cloud of things for sensing as a service: Sensing resource discovery and virtualization, in: 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015, pp. 1-7.
- [9] B. Kantarci, H. T. Mouftah, Sensing services in cloud-centric internet of things: A survey, taxonomy and challenges, in: 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), 2015, pp. 1865-1870.
- [10] B. Kantarci, H. T. Mouftah, Reputation-based sensing-as-a-service for crowd management over the cloud, in: 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2014, pp. 3614-3619.
- [11] F. , R. Milito, J. Zhu, S. Addepalli, Fog computing and its role in the internet of things, in: Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing, ACM, 2012, pp. 13-16.
- [12] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li and L. Xu, Edge Computing: Vision and Challenges, in *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, vol. 3, no. 5, pp. 637-646.
- [13] Mahmoud Parto, Christopher Saldana, Thomas Kurfess, A Novel Three-Layer IoT Architecture for Shared, Private, Scalable, and Real-time Machine Learning from Ubiquitous Cyber-Physical Systems, 2020, Vol. 48, pp. 959-967.
- [14] Jagdeep Singh, Parminder Singh, Fog computing: A taxonomy, systematic review, current trends and research challenges, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2021, Vol. 157, pp. 56-85.
- [15] D. Evans, The Internet of Things: How the next evolution of the internet is changing everything, CISCO White Paper.
- [16] V. Stantchev, A. Barnawi, S. Ghulam, J. Schubert, G. Tamm, Smart items, fog and cloud computing as enablers of servitization in healthcare, *Sensors & Transducers*, 2015, 185 pp. 121-128.
- [17] J. Zhu, D. S. Chan, M. S. Prabhu, P. Natarajan, H. Hu, F. Bonomi, Improving web sites performance using edge servers in fog computing architecture, in: Service Oriented System Engineering (SOSE), 2013 IEEE 7th International Symposium on, IEEE, 2013, pp. 320-323.
- [18] L. M. Vaquero, L. Rodero-Merino, Finding your way in the fog: Towards a comprehensive definition of fog computing, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 44 (5) (2014) 27-32.
- [19] C. L. R. Deng, R. Lu, T. H. Luan., Towards power consumption-delay tradeoff by

- in a network to minimize the spread of influenza virus infections, *Discrete Optimization*, Volume 30, November 2018, Pages 144-167.
- [39] José Maurício Costa, Pedro P. Paniago, Joaquim de Andrade Thiago, F. Noronha Marcos, A.M. Vieira, Integer linear programming formulations for the variable data rate and variable channel bandwidth scheduling problem in wireless networks, *Computer Networks*, 2019, Volume 165, 106939.
- [40] dJulien Lerouge, Zeina Abu-Aisheh, New binary linear programming formulation to compute the graph edit distance, *Pattern Recognition*, 2017, Volume 72, Pages 254-265. H
- [41] Ignacio Guisández, Juan Ignacio, Pérez-Díaz, Mixed integer linear programming formulations for the hydro production function in a unit-based short-term scheduling problem, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 128, June 2021, 106747.
- [42] Kalupahana Liyanage, Kushan Sudheera, Maode Mab, Peter Han Joo Chong, Real-time cooperative data routing and scheduling in software defined vehicular networks, *Computer Communications*, Volume 181, 1 January 2022, Pages 203-214.
- [43] Md. Muzakir, Hussaina Mohammad, Saad Alamb, M.M. Sufyan Bega, Vehicular Fog Computing-Planning and Design, *Procedia Computer Science*, Volume 167, 2020, Pages 2570-2580.
- [44] Hui Biana, Haibo Daib, Luxi Yanga, Throughput and energy efficiency maximization for UAV-assisted vehicular networks, *Physical Communication*, Volume 42, October 2020, pp.101-136.
- [31] Daniel-Jesus Munoz, Jose A. Montenegro, Monica Pinto, Lidia Fuentes, Energy-aware environments for the development of green applications for cyber-physical systems, *Future Generation Computer Systems*, *Future Generation Computer Systems*, 2019, Vol. 91, pp. 536-554.
- [32] Liu Jing, Lin Jinlong, Design optimization of WirelessHART networks in Cyber-Physical Systems, *Journal of Systems Architecture*, 2019, Vol. 97, pp. 168-184.
- [33] Y.C.Liang, X. Lu W. D, LiS. Wang, Cyber Physical System and Big Data enabled energy efficient machining optimization, *Journal of Cleaner Production*, 2018, Vol. 187, 20, pp. 46-62.
- [34] Y.C.Liang, X. Lu W. D, LiS. Wang, Cyber Physical System and Big Data enabled energy efficient machining optimization, *Journal of Cleaner Production*, 2018, Vol. 187, pp. 46-62.
- [35] Ivan Kantor, Jean-Loup Robineau, and , A Mixed-Integer Linear Programming Formulation for Optimizing Multi-Scale Material and Energy Integration, *Industrial Process and Energy Systems Engineering*, 2020, In press.
- [36] Y.C.Liang, X.Lu, W.D.Li, S.Wang, Cyber Physical System and Big Data enabled energy efficient machining optimization, *Journal of Cleaner Production*, 2018, Volume 187, Pages 46-62.
- [37] Malika Sadou, Louiza Bouallouche-Medjkoune, Efficient message delivery in hybrid sensor and vehicular networks based on mathematical linear programming, *Computers & Electrical Engineering*, 2017, Volume 64, Pages 496-505.
- [38] Hadi Charkhgard, Vignesh Subramanian, Walter Silva, Tapas K.Das, An integer linear programming formulation for removing nodes

## Shortest Green Optimal Paths Computation in Fog Cyber Physical Systems

Mohsen Heydarian

### Abstract

The use of cloud computing to meet the needs of the Internet of Things (IoT) has created a cloud computing technology. Today, fog-computing environments are a good platform for cyber physical system networks. However, fog calculations also suffer from significant challenges. One of these challenges is achieving energy efficiency and meeting green energy standards. The realization of the green energy framework in this technology ensures that this new technology is environmentally friendly and makes data transfers feasible with less energy consumption and less carbon dioxide emissions. Therefore, in this article, while studying the existing methods, by presenting a new optimal architecture and applying it to the existing methods; we will present a new method to reduce energy consumption in fog networks. The new method, which is based on

proper linear programming, is called Optimal Power-Rate Routing Solution (OPRRS) and minimizes energy consumption in data transmission path and processing units. Computer examples show that the new method reduces energy consumption in cyber physical systems compared to previous methods.

**Keywords:**

Green network, Fog network, Physical cyber system, Green energy, Integer linear programming