

## ارائه مکانیسمی برای کمینه کردن هزینه‌های اپراتور سلولی در فرآیند برون‌سپاری ترافیک

راضیه نظری<sup>۱</sup>، کارشناس ارشد؛ صالح یوسفی<sup>۲</sup>، دانشیار؛ بابک قالب‌ساز جدی<sup>۳</sup>، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - nazari.itsu@yahoo.com

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - s.yousefi@urmia.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - b.jeddi@urmia.ac.ir

**چکیده:** برون‌سپاری ترافیک از شبکه سلولی به شبکه مکمل به‌عنوان یک راه‌حل مقرون‌به‌صرفه در مقابله با ازدحام روزافزون شبکه‌های سلولی، مطرح شده است. چالش اصلی در این مورد کاهش هزینه‌های ثابت و متغیر این فرآیند برای اپراتور سلولی و همچنین حفظ رضایت کاربران است. در این مقاله، مسئله برون‌سپاری ترافیک تحمل‌پذیر تأخیر کاربران و چگونگی تشویق آن‌ها برای شرکت در این فرآیند بررسی شده و یک مکانیسم جدید مشتمل بر دو بخش برای حل چالش ذکر شده پیشنهاد می‌شود. در بخش اول با بهره‌گیری از پیش‌بینی الگوی تحرک کاربران، مسئله جایابی نقاط دسترسی شبکه مکمل و تخصیص پهنای باند به آن‌ها و در بخش دوم کاهش هزینه‌های متغیر شبکه به‌صورت مسائل بهینه‌سازی فرموله شده‌اند. هزینه‌های تشویق کاربران در ازای پذیرش تأخیر در تبادل داده، بخشی از هزینه‌های متغیر است که برای کمینه‌کردن آن از یک روش مبتنی بر حراج معکوس استفاده می‌شود. در انتها با توجه به پیچیدگی بالای مدل‌های پیشنهادی، الگوریتم‌های ابتکاری با پیچیدگی خطی ارائه شده است. نتایج حاصل از حل عددی مدل‌ها و شبیه‌سازی الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که مکانیسم پیشنهادی از لحاظ ایجاد تعادل بار در شبکه و کاهش هزینه‌های اپراتور سلولی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد.

**واژه‌های کلیدی:** برون‌سپاری ترافیک، شبکه سلولی، شبکه مکمل، هزینه تشویق، حراج معکوس.

## Proposing a Mechanism for Minimizing Cellular Operator Costs in Traffic Offloading

R. Nazari<sup>1</sup>, MSc; S. Yousefi<sup>2</sup>, Associate Professor; B. Ghalebshaz Jeddi<sup>3</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, Email: nazari.itsu@yahoo.com

2- Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, Email: s.yousefi@urmia.ac.ir

3- Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, Email: b.jeddi@urmia.ac.ir

**Abstract:** Traffic offloading (transferring a share of cellular network traffic to complementary network technologies such as Wi-Fi) is an economic and efficient mitigation for the ever-increasing congestion in cellular networks. In this regard, reducing fixed and variable costs of cellular operators in one side and providing some incentives for the users to participate in the offloading in the other side are among the main challenges to be addressed. In this way, delay tolerant offloading (in which users may tolerate some delay before receiving their needed data) is investigated and a new optimization mechanism in two stages is proposed. First, by utilizing user motion pattern prediction, a model is formulated to obtain the optimal placement of complementary WiFi networks and their bandwidth allocation. Second, cellular operator's overall variable cost (including data exchange and user incentive costs) is minimized. Minimizing the latter is performed using a reverse auction framework. Moreover, due to nonlinearity and high complexity of proposed models, heuristic algorithms are proposed to solve them. A numerical study and simulations of the algorithms show that the proposed mechanism outperforms previous methods in terms of balancing the load of cellular network and reducing overall cost of the cellular operators.

**Keywords:** Traffic offloading, cellular network, complementary network, incentive cost, reverse auction.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۶

نام نویسنده مسئول: صالح یوسفی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - ارومیه - کیلومتر ۱۱ جاده سرو - دانشگاه ارومیه - دانشکده فنی و مهندسی.

## ۱- مقدمه

استفاده می‌شود در نهایت مدلی برای کمینه کردن هزینه‌های متغیر شبکه سلولی پیشنهاد شده است که درباره میزان تأخیر بهینه هر کاربر بر اساس پیشنهادهای آن‌ها در حراج معکوس و ترافیک بهینه برای برون‌سپاری تصمیم‌گیری می‌کند.

- سوم این که الگوریتم‌هایی ابتکاری با پیچیدگی محاسباتی پایین برای حل مدل‌های پیشنهادی در زمان قابل قبول ارائه شده است. ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش (۲) کارهای مرتبط در زمینه بهبود عملکرد فرآیند برون‌سپاری و روش‌های اقتصادی ارائه شده، مرور می‌شود. در بخش (۳) مدل سیستم و فرضیات بیان می‌شود. سپس در بخش (۴) جزئیات مکانیسم پیشنهادی شرح داده می‌شود. در بخش (۵) کارایی مکانیسم پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی صورت گرفته، ارزیابی می‌شود. بخش (۶) به جمع‌بندی و پیشنهاد کارهای آینده می‌پردازد.

## ۲- پیشینه تحقیق

## ۲-۱- روش‌های افزایش بهره‌وری در فرآیند برون‌سپاری

افزایش کارایی فرآیند برون‌سپاری در تحقیقات بسیاری بررسی شده است که در ادامه برخی از آن‌ها به اجمال مرور شده‌اند. در [۶] یک شبکه LTE با پارامترهای واقعی مطالعه شده است و میزان کاهش بار شبکه‌های سلولی هنگام به کارگیری شبکه‌های مکمل و میزان بهبود کیفیت سرویس در هنگام استفاده از این روش بررسی شده است. در [۷] نویسندگان راهکارهایی را برای انتخاب مجدد سلول به منظور کاهش ازدحام لحظه‌ای سلول‌ها و همچنین گسترش پوشش پیشنهاد کرده‌اند. تمرکز مقاله روی نقاط مرزی بین موبایل روستایی و همراه اول و انتقال خودکار مشتریان است که نوعی برون‌سپاری ترافیک است. در [۸]، مسئله کمینه کردن استقرار APهای WiFi همراه با پیشینه کردن نرخ پوشش، مطرح و الگوریتمی برای حل آن پیشنهاد شده است. بر اساس نتایج این مقاله، شرایط لازم برای تشویق یک کاربر به استفاده از شبکه WiFi بر اساس نرخ انتقال، توان انتقال و انرژی دریافتی WiFi استخراج می‌شود. نتایج به دست آمده از [۹] نشان می‌دهند که اگرچه انتقال ترافیک به شبکه WiFi با تحمل تأخیر می‌تواند میزان برون‌سپاری را به طور قابل توجهی افزایش دهد. با این وجود به تأخیر انداختن همه انتقال‌ها یک استراتژی کارآمد نیست. در نتیجه استفاده از انگیزه‌های اقتصادی برای کاربران و یا مدل‌های پیش‌بینی یک راه‌حل مناسب است و باعث ایجاد تعادل بین بهره‌وری برون‌سپاری و رضایت کاربر می‌شود. در مقاله [۱۰] الگوریتمی برای پیش‌بینی تحرک و اتصالات کاربران با استفاده از فرآیند مارکوف ارائه شده است. استفاده از نتایج این الگوریتم پیش‌بینی، به اپراتور شبکه سلولی کمک می‌کند تا به منظور کاهش هزینه، مصرف انرژی و رضایت کاربران، یکی از سه حالت ارتباطی یعنی دریافت سلولی، برون‌سپاری داده با تحمل تأخیر و انتقال از طریق شبکه فرصت طلبانه را انتخاب

با ترویج روزافزون برنامه‌های کاربردی موبایل، شبکه‌های اجتماعی و خدمات بر پایه ابر، پیش‌بینی می‌شود که ترافیک شبکه سلولی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ حدود هشت برابر افزایش یابد که این امر باعث ازدحام در شبکه‌های سلولی خواهد شد [۱]. کنترل ازدحام شبکه با افزایش ظرفیت آن میسر است اما سرمایه‌گذاری برای ارتقای زیرساخت‌ها و فناوری پرهزینه و وقت‌گیر است بنابراین برون‌سپاری ترافیک سلولی<sup>۱</sup> به عنوان یک راه‌حل جایگزین برای کنترل ازدحام شبکه مطرح شده است [۲، ۳]. برون‌سپاری ترافیک شبکه سلولی به معنی واگذاری تبادل بخشی از ترافیک شبکه سلولی به شبکه‌های مکمل مانند WiFi و Femtocell برای کاهش ازدحام و استفاده بهتر از منابع شبکه سلولی است. برون‌سپاری ترافیک شبکه سلولی به دو صورت انجام می‌شود:

- برون‌سپاری بلادرنگ<sup>۲</sup>: در برون‌سپاری بلادرنگ اگر کاربر در طول مدت تبادل ترافیک در محدوده پوششی شبکه مکمل قرار داشته باشد، تبادل ترافیک از طریق شبکه مکمل و در غیر این صورت از طریق شبکه سلولی انجام می‌شود [۴، ۵].
- برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر (DTO)<sup>۳</sup>: در این روش هر کاربر با توجه به وضعیت و نوع ترافیک درخواستی خود، حاضر به پذیرش مقداری تأخیر در تبادل ترافیک خود است. پس از انقضای این مهلت در صورتی که تبادل کل ترافیک درخواستی کاربر به اتمام نرسیده باشد شبکه سلولی ارسال ترافیک باقی‌مانده را بر عهده می‌گیرد [۳].
- در برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر (DTO) می‌بایست از مکانیسم مناسبی برای تشویق و ایجاد انگیزه در کاربران جهت شرکت در برون‌سپاری استفاده شود، از طرفی به دلیل پرداخت هزینه‌های پیاده‌سازی (CAPEX)<sup>۴</sup> و عملیاتی (OPEX)<sup>۵</sup> برای اجرای برون‌سپاری لازم است تا یک چارچوب اقتصادی پایه‌ریزی شود که منافع همه بازیگران را در نظر بگیرد.
- در این مقاله، مکانیسمی پیشنهاد شده است که تعاملات اقتصادی اپراتور شبکه سلولی با اپراتور شبکه مکمل WiFi و کاربران را به صورت همزمان در نظر می‌گیرد. نوآوری‌های این مقاله شامل موارد زیر است:
- اول این که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی برای کمینه کردن هزینه‌های برپاسازی شبکه مکمل تحت نرخ پوشش مشخص و مشروط به برون‌سپاری ترافیک مازاد بر ظرفیت شبکه، ارائه شده است که درباره مکان و پهنای باند بهینه نقاط دسترسی شبکه مکمل (APها) در ناحیه تحت پوشش شبکه سلولی تصمیم‌گیری می‌کند.
- دوم این که مسئله بهینه‌سازی هزینه‌های متغیر شبکه سلولی بررسی می‌شود. هزینه‌های تشویق کاربران برای پذیرش تأخیر در تبادل ترافیک به عنوان بخشی از هزینه‌های متغیر در نظر گرفته شده است که به منظور کمینه کردن این هزینه‌ها از یک چارچوب تشویقی مبتنی بر حراج معکوس و یک مدل پیش‌بینی

قیمت و تخصیص بهینه ترافیک به APهای شبکه مکمل توسط اپراتور سلولی، پیشنهاد شده است که موجب تعامل بین طرفین معامله، کاهش هزینه‌های رقابت و بیشینه کردن ترافیک برون‌سپاری می‌شود. هرکدام از این مدل‌های اقتصادی مطرح‌شده با محدود کردن مدل سیستم خود به بررسی روابط اقتصادی بین اپراتور سلولی و کاربران یا اپراتور سلولی و اپراتور شبکه مکمل می‌پردازند و مسئله ایجاد انگیزه و کاهش کل هزینه‌های شبکه سلولی را به‌صورت هم‌زمان و با حضور همه بازیگران بررسی نمی‌کنند. یکی از کارهای پیشین نزدیک به کار انجام‌شده در این مقاله، چارچوب تشویقی Win-Coupon [۱۹] است که چگونگی ایجاد انگیزه در کاربران برای شرکت در برون‌سپاری با تحمل تأخیر را بررسی می‌کند و با در نظر گرفتن یک مدل پیش‌بینی و روابط اقتصادی بین اپراتور سلولی و کاربران، ضمن ارائه یک چارچوب تشویقی مبتنی بر حراج معکوس به کمینه‌کردن هزینه‌های تشویق کاربران و حفظ رضایت آن‌ها می‌پردازد؛ اما روابط اقتصادی بین اپراتور سلولی و اپراتور شبکه مکمل و استفاده بهینه از منابع هر دو شبکه را بررسی نمی‌کند. در این مقاله با اضافه نمودن فرضیات و محدودیت‌های جدید به چارچوب تشویقی Win-Coupon و در نظر گرفتن سایر هزینه‌ها، مکانیسم جدیدی برای استفاده بهینه از منابع شبکه و کمینه کردن کل هزینه‌های شبکه سلولی ارائه می‌شود. تحقق این مکانیسم می‌تواند علاوه‌بر افزایش بهره‌وری و داشتن صرفه اقتصادی، تأخیر قابل‌پذیرش کاربران را کاهش دهد و رضایت کاربران را نیز حفظ کند.

### ۳- مدل سیستم و فرضیات

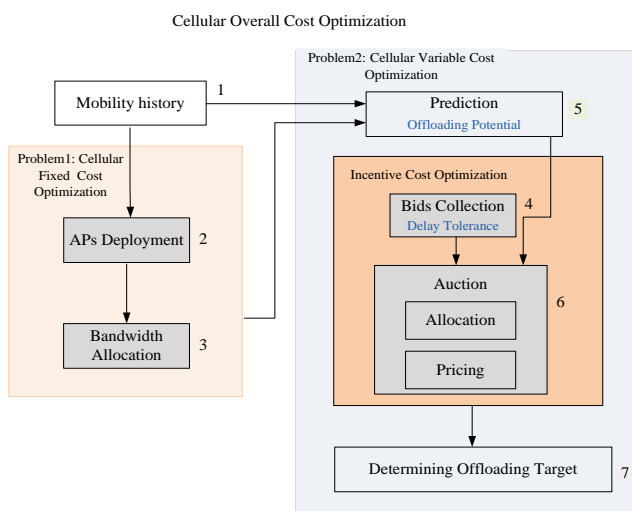
در این بخش، سیستم مورد مطالعه و فرضیات در نظر گرفته‌شده، بیان می‌شود. مجموعه  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  کاربر درون یک ناحیه با  $m$  بخش مساوی حرکت می‌کنند. فرض می‌شود که کاربران همواره تحت پوشش شبکه سلولی هستند اما لزوماً همیشه تحت پوشش شبکه مکمل WiFi قرار ندارند و ممکن است در مسیر حرکت خود تحت پوشش تعدادی از APهای شبکه مکمل WiFi قرار گیرند. امکان استقرار یک AP با ظرفیت محدود در مرکز هر بخش وجود دارد که کل آن بخش را پوشش می‌دهد. اتصال به WiFi، به مکان جغرافیایی کاربر و APها وابسته است و در همه زمان‌ها در دسترس کاربر نیست. آن بخش از ترافیک کاربرانی که قابلیت تحمل تأخیر را دارند، می‌توانند از طریق اتصالات شبکه مکمل WiFi و با رعایت میزان تأخیر قابل تحمل آن‌ها منتقل شود؛ در صورت عدم تأخیرپذیری کاربران یا اتمام مهلت تأخیر زمانی موردنظر آن‌ها، تبادل داده به‌طور مستقیم از طریق شبکه سلولی انجام می‌شود. اپراتور شبکه سلولی باید APها را به‌گونه‌ای مستقر کند که در میزان تأخیر مشخص و با حفظ رضایت کاربر، مقدار ترافیک موردنظر اپراتور، برون‌سپاری شود و هزینه‌های آن برای اپراتور سلولی کمینه گردد.

نماید. نویسندگان این مقاله توانسته‌اند با این روش تا ۵۹٪ میزان برون‌سپاری داده را افزایش و تا ۱۶٪ هزینه‌ها را کاهش دهند. در تعدادی از تحقیقات مرتبط، استفاده از روش‌های فرصت‌طلبانه<sup>۶</sup> به‌منظور برون‌سپاری ترافیک سلولی پیشنهاد شده است. در روش‌های فرصت‌طلبانه از کاربران دیگر به‌عنوان رسانه تبادل ترافیک استفاده می‌شود. در واقع تبادل ترافیک به فرصت‌های ارتباطی وابسته است که از جابجایی گره‌ها به وجود می‌آید. در [۱۱] یک چارچوب ریاضی مبتنی بر فرضیات واقعی برای روش‌های فرصت‌طلبانه در برون‌سپاری ترافیک ارائه شده است. در این چارچوب مسئله تخصیص بهینه منابع و انتخاب سیاست رمزگذاری مناسب با هدف بیشینه کردن رضایت کاربر بررسی و برای حل آن الگوریتمی پیشنهاد می‌شود. در [۱۲] یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مدیریت برون‌سپاری ترافیک از زیرساخت موجود و با استفاده از ارتباطات فرصت‌طلبانه ارائه شده است. نویسندگان این مقاله مسئله برون‌سپاری ترافیک را در سمت کاربر آنالیز و مسئله انتخاب شبکه را به‌صورت تصمیم‌گیری چندمعیاره مدل می‌کنند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ۴۵٪ از ترافیک با پذیرش تأخیر کم‌تر از ۲۰ دقیقه برون‌سپاری می‌شود.

### ۲- چشم‌انداز اقتصادی مسئله برون‌سپاری

مسئله چگونگی تشویق و ایجاد انگیزه در کاربران برای شرکت در برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر و کمینه کردن هزینه‌های فرآیند برون‌سپاری با استفاده از راهکارهای اقتصادی مانند نظریه بازی‌ها و حراج مطالعه شده است. در [۱۳] یک مکانیسم مبتنی بر حراج ترکیبی را برای خرید یا کرایه پهنای باند اضافی از APهای شبکه WiFi ارائه و سه الگوریتم حریصانه برای حل آن پیشنهاد شده است. نتایج این مقاله بر اساس معیارهای ارزیابی (هزینه، برندگان حراج و تعداد مشتریان سرویس‌دهی‌شده) و مقایسه آن‌ها در سه الگوریتم حریصانه پیشنهادی و حالت بهینه برای تعداد APهای متفاوت ارائه شده است. در [۱۴] منافع اقتصادی حاصل از برون‌سپاری ترافیک مبتنی بر تأخیر، با در نظر گرفتن بازاری با یک فراهم‌کننده انحصاری و کاربران، مطالعه شده و به‌صورت نظریه بازی دومرحله‌ای مدل‌سازی شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر اضافه رفاه کاربران و درآمد فراهم‌کننده را افزایش می‌دهد. شبکه مکمل WLAN در [۱۵] بررسی شده و یک مدل برای ارتباط اقتصادی و تنظیم قیمت بین اپراتورهای شبکه موبایل (MNO) و اپراتورهای مقیاس کوچک (SSO) مربوط به شبکه WLAN به‌منظور حداقل کردن هزینه‌ها ارائه شده است. در مقاله [۱۶] به‌دلیل هزینه بالا و محدودیت‌های مکانی برای استقرار APهای شبکه WiFi توسط خود MNO، از APهای از قبل مستقر شده توسط شرکت‌های ثالث استفاده شده و تعامل بین یک اپراتور شبکه موبایل (MNO) و تعدادی از مالکین نقاط دسترسی (APO) با استفاده از تئوری‌های چانه‌زنی معمولی و گروهی، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل شده است. در [۱۷، ۱۸] یک چارچوب مبتنی بر حراج برای استقرار شبکه‌های موبایل ناهمگن جهت تعیین

انجام می‌شود. در این گام، هر کاربر، اطلاعات مربوط به مدت زمان تأخیر و مقدار تخفیفی که به ازای هر واحد تأخیر می‌خواهد را همراه با پیغام درخواست داده، به‌عنوان پیشنهاد<sup>۱۱</sup> به اپراتور سلولی ارسال می‌کند (بلوک ۴). ترافیک قابل برون‌سپاری هر کاربر در بازه زمانی آینده (بر اساس تحمل تأخیر آن‌ها) با استفاده از داده‌های حرکتی و یک مدل شبه‌مارکوف، پیش‌بینی می‌شود. در نهایت اپراتور سلولی با استفاده از یک چارچوب تشویقی مبتنی بر حراج معکوس، به کمینه‌کردن هزینه تشویق کاربران برای مبادله تأخیر با آن‌ها می‌پردازد (بلوک ۶). خود حراج شامل دو مرحله تخصیص و قیمت‌گذاری است. در مرحله تخصیص، اپراتور سلولی تعیین می‌کند که چه کاربرانی برنده حراج هستند و چه تأخیری باید بپذیرند و در مرحله قیمت‌گذاری میزان تخفیف پرداختی به کاربران برنده تعیین می‌شود. سپس اپراتور سلولی بر اساس کل ظرفیت شبکه سلولی به بهینه‌سازی هزینه متغیر و تعادل بار شبکه خود می‌پردازد و درباره ترافیک هدف برای برون‌سپاری تصمیم‌گیری می‌کند.



شکل ۱: بلوک-دیگرام اجزای مکانیسم پیشنهادی

#### ۴-۱- مدل پیش‌بینی مورد استفاده و تاریخچه حرکتی کاربران

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود یکی از اجزای مکانیسم پیشنهادی مدل پیش‌بینی است که از تاریخچه حرکتی کاربران استفاده می‌کند. برای استفاده از این مدل پیش‌بینی باید تاریخچه حرکتی کاربران جمع‌آوری شود. اغلب کاربران موبایل الگوهای حرکتی روزانه‌ای دارند (به‌عنوان مثال آن‌ها هر روز مسیر یکسانی را طی می‌کنند) بنابراین می‌توان حرکت کاربران را بر اساس یک مدل مارکوف فرمول‌بندی کرد. مقادیر احتمال حضور هر کاربر در هر ناحیه و در هر بازه زمانی، ماتریس احتمال گذار و توزیع احتمال زمان اقامت، بر اساس تاریخچه حرکتی جمع‌آوری شده از حرکت کاربران محاسبه و به‌عنوان ورودی در مدل پیش‌بینی استفاده می‌شوند. در نهایت با

بازیگران فرآیند برون‌سپاری مورد بررسی عبارت‌اند از: اپراتور سلولی، اپراتور WiFi و مشترکین شبکه سلولی (کاربران). فرض می‌شود که اپراتور سلولی به‌منظور برون‌سپاری در ساعات اوج ترافیک و با پرداخت مبلغی به اپراتور WiFi، به برپاسازی شبکه مکمل WiFi در ناحیه تحت پوشش خود می‌پردازد. اپراتور WiFi طی عقد قرارداد با اپراتور سلولی، پهنای باند مازاد AP‌های از قبل مستقرشده در ناحیه تحت پوشش شبکه سلولی را در اختیار اپراتور سلولی قرار می‌دهد و در صورت عدم وجود AP در ناحیه موردنظر، AP‌هایی با پهنای باند مشخص را در آن نواحی مستقر می‌کند. صاحبان آن ملکی که AP‌ها در آن مستقر شده‌اند، کنترلی روی اتصال کاربران به AP‌ها ندارند و اپراتور سلولی تصمیم می‌گیرد که کدام کاربران و در چه زمانی به AP‌ها متصل شوند [۲۰]. از طرفی ممکن است کاربران تمایلی به تحمل تأخیر برای تبادل داده خود نداشته باشند. در این‌صورت اپراتور شبکه سلولی باید از مکانیسم‌های تشویقی (مانند ارائه تخفیف به کاربران) برای ایجاد انگیزه جهت شرکت در برون‌سپاری مبتنی بر تأخیر استفاده کند. با توجه به مطالب ذکرشده در بالا، یک رابطه اقتصادی یک به یک بین اپراتور سلولی و اپراتور WiFi و یک رابطه اقتصادی یک به چند بین اپراتور سلولی و مشترکانش در نظر گرفته می‌شود. مکانیسم تشویقی پیشنهادی در این مقاله بر اساس حراج معکوس است. اخیراً علاوه بر مبحث برون‌سپاری ترافیک، استفاده از انواع حراج برای تعیین قیمت و تخصیص عادلانه منابع، به‌شکل گسترده در شاخه‌های مختلف مهندسی برق مانند محاسبات ابری [۲۱] و شبکه‌های توزیع هوشمند [۲۲] مورد توجه قرار گرفته است.

#### ۴-۲ ارائه مکانیسمی برای بهبود عملکرد فرآیند برون‌سپاری و کاهش هزینه‌های اپراتور سلولی

در این بخش ابتدا چارچوب مکانیسم پیشنهادی مرور و سپس جزئیات آن مطرح می‌گردد. مکانیسم پیشنهادی به کاهش هزینه‌های کلی شبکه سلولی در مقابله با ازدحام کمک می‌کند. این مکانیسم شامل مسئله برپاسازی هدفمند شبکه مکمل در ناحیه تحت پوشش شبکه سلولی، چگونگی تشویق کاربران برای پذیرش تأخیر در تبادل داده‌هایشان و تعیین ترافیک هدف برای برون‌سپاری است. شکل ۱ بلوک-دیگرام مکانیسم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

مکانیسم پیشنهادی دارای دو گام اصلی است: در گام اول مطابق با بلوک‌های سمت چپ شکل ۱، اپراتور سلولی به‌عنوان مرکز کنترل درباره نحوه برپاسازی شبکه مکمل تصمیم می‌گیرد و بر اساس داده‌های حرکتی کاربران (بلوک ۱)، تعیین می‌کند که چه تعداد AP و در کدام نواحی مستقر کند (بلوک ۲) و چه مقدار پهنای باند به هر AP تخصیص دهد (بلوک ۳). به این ترتیب علاوه بر کمینه‌کردن هزینه‌های برپاسازی شبکه مکمل، درصد برون‌سپاری آن افزایش می‌یابد. پس از برپاسازی شبکه مکمل در ناحیه تحت پوشش شبکه سلولی، گام دوم مسئله مطابق با بلوک‌های سمت راست شکل ۱ و به‌صورت دوره‌ای<sup>۱۲</sup>

#### ۴-۲- جزئیات مکانیسم پیشنهادی

در این بخش مسئله کاهش هزینه‌های کلی اپراتور سلولی بررسی و دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی<sup>۲</sup> (NLP) برای آن پیشنهاد می‌شود. مدل اول مربوط به برپاسازی هدفمند شبکه مکمل است که یک بار اجرا می‌شود؛ سپس خروجی‌های این مدل به عنوان ورودی مدل دوم در نظر گرفته می‌شود. مدل دوم مربوط به بهینه‌سازی هزینه‌های متغیر شبکه سلولی است که به صورت دوره‌ای به اجرا گذاشته می‌شود. مسئله تعداد دفعات و فرکانس اجرای این دوره‌ها، به نحوه برپاسازی شبکه مکمل، نوسان نرخ ورود کاربران و مقدار ترافیک شبکه سلولی بستگی دارد.

#### ۴-۲-۱- مسئله اول: بهینه‌سازی جایابی نقاط دسترسی و تخصیص پهنای باند

در این بخش بر اساس پیش‌فرض‌ها، ملاحظات و چارچوب معرفی‌شده در بخش‌های قبل، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی با هدف جایابی بهینه APها در نواحی و کمینه کردن هزینه‌های برپاسازی شبکه مکمل ارائه می‌شود. پارامترهای ورودی مدل برپاسازی شبکه مکمل به صورت زیر است:

فرض می‌شود که اپراتور سلولی می‌خواهد شبکه مکمل WiFi را بر اساس نرخ پوشش از پیش تعیین‌شده ( $R$ ) در ناحیه تحت پوشش خود فراهم کند. با توجه به اینکه مسئله برپاسازی شبکه مکمل فقط یک بار اجرا می‌شود و برای مدت طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرد اپراتور سلولی به صورت پیش‌فرض متوسط اندازه داده درخواستی  $\bar{d}$  و متوسط تأخیر  $\bar{t}$  را برای هر کاربر در نظر می‌گیرد.  $\bar{t}$  به چند واحد زمانی با طول  $T$  ثانیه تقسیم می‌شود. نماد  $\bar{t}$  نشان‌دهنده تعداد واحد تأخیر لحاظ‌شده و مضرب صحیحی از  $T$  است (به طوری که  $\left[\frac{\bar{t}}{T}\right] = \bar{t}$  و در آن علامت  $[ ]$  به معنی بزرگ‌ترین عدد صحیح کوچک‌تر یا مساوی عدد داخل آن است). طول واحد زمانی ( $T$ ) کوچک‌تر منتج به دقت بیشتری می‌شود ولی سربار ارتباطی بیش‌تر و پیچیدگی محاسباتی بالاتری را به دنبال دارد. اپراتور WiFi نیز هزینه  $C_b$  مربوط به مقدار هر واحد پهنای باند را اعلام می‌کند. مقدار پهنای باند هر AP به صورت مضرب صحیحی از  $b_{unit}$  در نظر گرفته می‌شود. اپراتور سلولی بر اساس ظرفیت آستانه ازدحام خود ( $TH_{cell}$ ) و تضمین رفع ازدحام در شبکه سلولی درباره جایابی و تخصیص پهنای باند بهینه APها تصمیم‌گیری می‌کند.

متغیرهای تصمیم مسئله به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$x_j$  یک متغیر عدد صحیح صفر و یک است، اگر  $x_j = 1$  آنگاه AP در ناحیه  $j$  قرار می‌گیرد و در غیر این صورت هیچ AP به ناحیه  $j$  اختصاص نمی‌یابد.

$q_j$  یک متغیر عدد صحیح است که تعداد واحد پهنای باند قابل تخصیص به AP در ناحیه  $j$  را مشخص می‌کند.

با در نظر گرفتن موارد فوق مسئله به صورت زیر مدل می‌شود:

استفاده از این احتمالات، می‌توان مقدار ترافیک قابل برون‌سپاری هر کاربر را در بازه‌های زمانی آینده پیش‌بینی کرد.

ماتریس  $\mathbf{P}$  احتمال گذار هر کاربر را نشان می‌دهد که از تاریخچه حرکتی کاربران به دست می‌آید. هر عنصر  $p_{jk} \in \mathbf{P}$  احتمال گذار کاربر  $i$  را از ناحیه  $j$  به  $k$  نشان می‌دهد.  $p_{jk}$  به صورت تعداد دفعات گذار مشاهده‌شده از نمونه‌های به دست‌آمده از تاریخچه حرکتی کاربران تعریف می‌شود. مقدار  $p_{jk}$  از طریق رابطه  $p_{jk} = \frac{num_{jk}}{num_j}$  قابل محاسبه است. نماد  $num_{jk}$  تعداد گذارها از ناحیه  $j$  به  $k$  و نماد  $num_j$  تعداد گذارها از ناحیه  $j$  را بدون در نظر گرفتن ناحیه بعدی نشان می‌دهد.

نماد  $S_{jk}(t)$  توزیع احتمالی زمان اقامت را در ناحیه  $j$  هنگامی که ناحیه بعدی برای گذار  $k$  باشد، نشان می‌دهد. مقدار  $S_{jk}(t)$  بر اساس تاریخچه تحرک کاربران به صورت  $S_{jk}(t) = \frac{num_{jk}(t_{jk} \leq t)}{num_{jk}}$  تخمین زده می‌شود که  $t_{jk}$  زمان اقامت را در ناحیه  $j$  هنگامی که ناحیه بعدی برای گذار  $k$  باشد، نشان می‌دهد و  $num_{jk}(t_{jk} \leq t)$  تعداد گذارها از ناحیه  $j$  به  $k$  با زمان اقامت کم‌تر از  $t$  است.

به منظور برپاسازی شبکه مکمل در ناحیه تحت شبکه سلولی نیز از تاریخچه حرکتی کاربران برای وزن‌دهی به نواحی استفاده می‌شود. وزن‌دهی به نواحی با استفاده از  $p_{ij}^t$  به دست‌آمده از تاریخچه حرکتی کاربران صورت می‌گیرد که  $p_{ij}^t$  نشان‌دهنده احتمال حضور کاربر  $i$  در ناحیه  $j$  در باز زمانی  $t$  است. نماد  $w_j$  بیانگر وزن ناحیه  $j$  است و صورت  $w_j = \sum_{i \in N} \sum_{t=1}^L p_{ij}^t$  محاسبه می‌شود. نواحی بر اساس وزن اختصاص‌یافته به آن‌ها اولویت‌دهی می‌شوند. اولویت‌دهی به نواحی بر اساس عناصر بردار  $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$  می‌تواند به اپراتور سلولی در جایابی بهینه APها در محیط تحت پوشش خود کمک کند. بعد از تعیین ناحیه موردنظر برای استقرار AP در آن، پهنای باند تخصیصی به آن AP بر اساس یک روش وزن‌دهی مشخص می‌شود. نماد  $w_{BWAP_j}$  بیانگر وزن محاسبه‌شده برای تخصیص پهنای باند به AP در ناحیه  $j$  است که از طریق نرمال‌سازی وزن‌های محاسبه‌شده برای هر ناحیه، طبق رابطه  $w_{BWAP_j} = \frac{\sum_{i \in N} \sum_{t=1}^L p_{ij}^t / \sum_{j=1}^m \sum_{i \in N} \sum_{t=1}^L p_{ij}^t}{\sum_{i \in N} \sum_{t=1}^L p_{ij}^t}$  محاسبه می‌آید.

مسئله پیش‌بینی مقدار ترافیک قابل برون‌سپاری در محدوده بررسی این مقاله نیست و یکی از این مدل‌های پیش‌بینی موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. مدل مورد استفاده، یک نوع پیش‌بینی شبه‌مارکوف می‌باشد که خروجی آن، مقدار ترافیک قابل برون‌سپاری هر کاربر در بازه زمانی آینده است و با نماد  $V_i^d(t)$  نشان داده می‌شود. نماد  $V_i^d(t)$  به این معنی است که اگر کاربر  $i$  داده‌ای با اندازه  $d$  را درخواست دهد و برای مدت‌زمان  $t$  منتظر بماند، می‌تواند مقدار ترافیک  $V$  را از طریق شبکه مکمل WiFi ارسال کند. در ادامه با بهره‌گیری از پیش‌بینی‌های انجام‌شده، جزئیات مکانیسم پیشنهادی توضیح داده می‌شود.

پیشنهادی باید مقادیر بهینه  $\eta$  را مشخص کند. حال اگر  $\eta = 3$  باشد یعنی ۱۵٪ از کل ترافیک سلولی به عنوان ترافیک هدف برای برون سپاری انتخاب می شود. عبارت  $D \cdot (1 - \eta \cdot \theta)$  ترافیک انتقال داده شده توسط شبکه سلولی را مشخص می کند. کوچک در نظر گرفتن مقدار پارامتر  $\theta$  موجب افزایش اطلاعات و افزایش دقت مسئله می شود همچنین پیچیدگی حل مسئله را نیز افزایش می دهد.

نماد  $\alpha$  نشان دهنده مقدار هزینه پرداخت شده توسط اپراتور سلولی برای تبادل هر واحد ترافیک ارسالی از طریق شبکه خود قبل از رسیدن به ترافیک آستانه ازدحام  $(D \cdot (1 - \eta \cdot \theta) \leq Th_{cell})$  است.

اگر کل ترافیک شبکه سلولی از ترافیک آستانه شبکه تجاوز کند  $(D \cdot (1 - \eta \cdot \theta) > Th_{cell})$  اپراتور سلولی یک هزینه ازدحام  $\alpha \cdot [1 + C_{cell}(v/Th_{cell})] \cdot v$  را متحمل می شود که  $v$  مقدار ترافیک فراتر از آستانه ازدحام است و به صورت  $v = D \cdot (1 - \eta \cdot \theta) - Th_{cell}$  محاسبه می شود. تابع  $C_{cell}(\cdot)$  یک تابع اکیداً افزایشی و محدب است که روند سریع افزایش هزینه های ازدحام را بیان می کند. توابع هزینه محدب مشابه به طور گسترده در مدل سازی هزینه ازدحام در اینترنت استفاده شده است [۲۳]. برای  $v \leq 0$  داریم  $C_{cell}(v/Th_{cell}) = 0$ .

$$\begin{cases} \alpha \cdot D \cdot (1 - \eta \cdot \theta), & D \cdot (1 - \eta \cdot \theta) \leq Th_{cell} \\ \alpha \cdot Th_{cell} + \alpha \cdot [1 + C_{cell}(v/Th_{cell})] \cdot v, & D \cdot (1 - \eta \cdot \theta) > Th_{cell} \end{cases} \quad (7)$$

مجموع هزینه انتقال هر واحد ترافیک توسط شبکه WiFi و هزینه های تشویق کاربران برای مبادله تأخیر با آن ها بخش دیگری از هزینه های متغیر شبکه سلولی را تشکیل می دهد که با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می شود.

طبق رابطه (۸) برای شبکه WiFi نیز یک ظرفیت آستانه ازدحام  $Th_{wf}$  در نظر گرفته می شود و نماد  $\beta$  بیانگر هزینه درخواست شده توسط اپراتور WiFi برای انتقال هر واحد ترافیک از طریق شبکه خودش قبل از رسیدن به آستانه ازدحام  $(\eta \cdot \theta \cdot D \leq Th_{wf})$  است. در غیر این صورت، اپراتور WiFi یک هزینه ازدحام  $\alpha \cdot [1 + C_{wf}(v/Th_{cell})] \cdot v$  را نیز از اپراتور سلولی درخواست می کند که  $v$  مقدار ترافیک فراتر از آستانه ازدحام شبکه WiFi است و به صورت  $v = \eta \cdot \theta \cdot D - Th_{wf}$  محاسبه می شود.

تابع  $C_{wf}(\cdot)$  نیز یک تابع محدب است و برای  $v < 0$  داریم  $C_{wf}(v/Th_{cell}) = 0$ . در عبارت  $\sum_{i \in N} \sum_{k=1}^{t_i} b_i^k$  هزینه تشویق کاربران با استفاده از چارچوب تشویقی Win-Coupon در مقاله [۱۹] محاسبه می شود.

$$\begin{cases} \beta \cdot \eta \cdot \theta \cdot D + \sum_{i \in N} \sum_{k=1}^{t_i} b_i^k, & \eta \cdot \theta \cdot D \leq Th_{wf} \\ \beta \cdot Th_{wf} + \beta \cdot [1 + C_{wf}(v/Th_{wf})] \cdot v + \sum_{i \in N} \sum_{k=1}^{t_i} b_i^k, & \eta \cdot \theta \cdot D > Th_{wf} \end{cases} \quad (8)$$

برای محاسبه هزینه تشویق کاربران در مبادله تأخیر با آن ها فرض می شود هر کاربر برای سرویس دهی هر درخواست، هزینه اولیه  $f$  را به اپراتور سلولی پرداخت می کند و اپراتور سلولی یک طرح تخفیفی را جهت تشویق کاربران برای پذیرش تأخیر در تبادل داده هایشان در نظر می گیرد. به دلیل انعطاف پذیری کاربران در میزان تأخیر قابل

$$\min_{x_j, q_j} \sum_{j=1}^m (c_b \cdot q_j) \cdot x_j \quad (1)$$

منوط به:

$$\sum_{i \in N} V_i^d(\bar{I}) \geq Th_{cell} \quad (2)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^m x_j \cdot \pi \cdot r^2}{A} = R \quad (3)$$

$$b_{min} \leq q_j \leq b_{max} \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, m \quad q_j = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

$$x_j = 0, 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

تابع هدف در معادله (۱) نشان دهنده هزینه ای است که اپراتور سلولی برای برپاسازی شبکه مکمل WiFi پرداخت می کند. هزینه برپاسازی شبکه مکمل WiFi، به صورت مجموع هزینه های پهنای باند  $q_j$  تخصیص یافته به هر AP بر اساس رابطه  $(c_b \cdot q_j)$  محاسبه می شود. در عبارت مربوط به محدودیت (۲)،  $V_i^d(\bar{I})$ ، مقدار ترافیکی است که پیش بینی می شود کاربر  $i$  با متوسط اندازه داده درخواستی  $\bar{d}$  و پذیرفتن متوسط تأخیر  $\bar{t}$ ، برون سپاری کند. متوسط تأخیر  $\bar{t}$  به صورت مضربی از واحد زمانی  $T$  در نظر گرفته شده است  $(\bar{t} = \bar{I} \cdot T)$ . این محدودیت تضمین می کند که ازدحام شبکه با برپاسازی مناسب شبکه مکمل WiFi برطرف شود. محدودیت (۳) به این معنی است که اپراتور سلولی می خواهد نسبت مشخصی از کل ناحیه، تحت پوشش شبکه مکمل قرار بگیرد. محدودیت (۴) تضمین می کند که پهنای باند تخصیصی به هر AP در بازه  $[b_{min} \ b_{max}]$  قرار گیرد. محدودیت های (۵) و (۶) دامنه متغیرهای تصمیم را بیان می کند.

خروجی های مسئله فوق به صورت بردارهای  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  و  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$  حاصل می شوند که مکان و پهنای باند بهینه هر AP را مشخص می کنند. پس

#### ۴-۲-۲- مسئله دوم: بهینه سازی هزینه های متغیر شبکه سلولی

در این بخش با در نظر گرفتن هزینه های تبادل ترافیک توسط شبکه سلولی و مکمل در شرایط ازدحام و عدم ازدحام و هزینه های تشویق کاربران در مبادله تأخیر با آن ها، مدلی برای کمینه کردن هزینه های متغیر شبکه سلولی پیشنهاد می شود. خروجی به دست آمده از مدل پیشنهادی بخش قبل به عنوان ورودی در این مدل در نظر گرفته می شود. هزینه های مربوط به انتقال هر واحد ترافیک سلولی بخشی از هزینه های متغیر این شبکه را تشکیل می دهد و با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می شود. نماد  $D$  کل ترافیک شبکه سلولی  $(\sum_{i \in N} d_i)$  را نشان می دهد. در مدل پیشنهادی ترافیک هدف برون سپاری به صورت  $\eta \cdot \theta$  (مضارب صحیحی از یک مقدار تعریف شده بنام  $\theta$ ) در نظر گرفته می شود.  $\theta$  یک عدد کوچک تر از یک است که نسبتی از کل ترافیک سلولی را نشان می دهد. به عنوان مثال اگر  $\theta = 0.05$  باشد مدل

منوط به:

$$\sum_{i \in N} V_i^d(t_i) \geq \eta \cdot \theta \cdot D \quad (12)$$

$$D \cdot (1 - \eta \cdot \theta) > I_{cell} \cdot Th_{cell} \quad (13)$$

$$\eta \cdot \theta \cdot D > I_{wf} \cdot Th_{wf} \quad (14)$$

$$t_i = 0, 1, 2, \dots, l_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$\eta = 0, 1, 2, \dots, \frac{1}{\theta} \quad (16)$$

متغیرهای تصمیم مسئله عبارتند از:

$\eta$  متغیر عدد صحیح است. مقدار این متغیر به گونه‌ای است که  $\eta \cdot \theta$  نسبت ترافیک برون‌سپاری را تعیین می‌کند.

$t_i$  متغیر عدد صحیحی است که طول تأخیر خریداری شده از کاربر  $i$  را مشخص می‌کند. اگر  $t_i = 0$ ، یعنی کاربر در حراج برنده نشده است و تأخیری به آن تخصیص داده نمی‌شود.

رابطه (۱۱) تابع هدف را نشان می‌دهد که از چندین عبارت به شرح زیر تشکیل شده است. در جمله اول رابطه (۱۱)، هزینه مقدار ترافیک انتقالی توسط خود شبکه سلولی بر اساس مقدار  $I_{cell}$  مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود. سپس در جمله دوم رابطه (۱۱) هزینه تبادل ترافیک تعیین شده برای برون‌سپاری از طریق شبکه مکمل بر اساس مقدار  $I_{wf}$  و رابطه (۸) محاسبه می‌شود. عبارت  $\sum_{i \in N} \sum_{k=1}^{t_i} b_i^k$  مجموع هزینه‌های تشویق کاربران است و مقدار  $\sum_{k=1}^{t_i} b_i^k$  تخفیف پرداخت شده به کاربر  $i$  برای تحمل تأخیر  $t_i$  نشان می‌دهد. در عبارت مربوط به محدودیت (۱۲)، مقدار ترافیک قابل برون‌سپاری را برای کاربر  $i$  داده درخواستی به اندازه  $d$  و تحمل تأخیر  $t_i$  نشان می‌دهد. این محدودیت تضمین می‌کند که مجموع ترافیک قابل برون‌سپاری کاربران کم‌تر از ترافیک تعیین شده توسط اپراتور برای برون‌سپاری و کاهش ازدحام شبکه نباشد. محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) نحوه محاسبه هزینه‌ها را برای انتقال ترافیک توسط شبکه سلولی و مکمل مشخص می‌کند. این محدودیت‌ها باعث ایجاد تفاوت در محاسبه هزینه‌ها برای دو حالت ازدحام و عدم ازدحام در شبکه‌های سلولی و WiFi می‌شود. محدودیت (۱۵) تضمین می‌کند که تأخیری که کاربر  $i$  باید تحمل کند از  $l_i$  (حداکثر تأخیر قابل پذیرش آن کاربر) تجاوز نکند. محدودیت (۱۶) بیان می‌کند که نسبت ترافیک برون‌سپاری شده به کل ترافیک شبکه به صورت مضارب صحیحی از  $\theta$  (نسبتی از کل ترافیک شبکه) در نظر گرفته می‌شود و مقدار ترافیک تعیین شده برای برون‌سپاری نباید از کل ترافیک شبکه تجاوز کند. فرض می‌شود که این مدل به صورت دوره‌ای اجرا می‌شود و در هر دوره، هر کاربر یک بسته با اندازه  $d$  را درخواست می‌دهد. راه‌حل بهینه به صورت  $\eta$  و بردار  $t$   $(t_1, t_2, \dots, t_{|N|})$  حاصل می‌شوند.

تحملشان یک تابع رضایت  $S(t)$  برای بیان میزان مطلوبیت کاربر در نظر گرفته می‌شود. در این تابع، رضایت ازدست‌رفته کاربر به صورت ریالی و تخفیف در مبلغ پرداختی کاربر به اپراتور سلولی محاسبه می‌شود. این تابع مستقل از اندازه داده درخواستی کاربر و اکیداً نزولی برحسب تأخیر است و توسط خود کاربر تعیین می‌شود. فرض می‌شود که کاربر برای هر داده درخواستی خود  $d$  حداکثر تأخیر  $t_{bound}$  را بر اساس تابع رضایتش می‌پذیرد که در این نقطه تأخیر، رضایت کاربر صفر است یعنی کاربر تمایلی ندارد برای سرویس داده خود هزینه‌ای را به اپراتور سلولی پرداخت کند. به عنوان مثال اگر کاربر بخواهد تأخیر  $t_1$  را بپذیرد مطابق با تابع رضایت خود تمایل دارد که هزینه  $S(t) = f t$  را به جای  $f$  پرداخت کند و مقدار ریالی رضایت ازدست‌رفته کاربر به دلیل تحمل تأخیر  $t_1$  است.

حداکثر تأخیر قابل پذیرش به تعدادی واحد زمانی تقسیم شده و طول هر واحد زمانی  $T$  ثانیه در نظر گرفته شده است. در بقیه این مقاله، تأخیر  $t$  برحسب ضربی از واحد زمانی  $T$  بیان می‌شود. نماد  $l_i$  نشان‌دهنده، حداکثر تعداد واحد تأخیر لحاظ شده برحسب  $T$  برای هر کاربر است  $(l_i = \lfloor \frac{t_{bound}}{T} \rfloor)$  و در آن  $[\ ]$  بزرگ‌ترین عدد صحیح کوچک‌تر یا مساوی عدد داخل آن است. کاربر  $i$  مقدار تخفیف پیشنهادی خود را برای هر واحد تأخیر به صورت  $b_i = \{b_i^1, b_i^2, \dots, b_i^{l_i}\}$  ثبت می‌کند. هر عنصر از مجموعه پیشنهادها، مقدار تخفیفی را که کاربر  $i$  برای یک واحد تأخیر بیشتر می‌خواهد نشان می‌دهد و  $d_i$  حداکثر واحد تأخیر قابل پذیرش کاربر  $i$  است. مجموعه همه پیشنهادها فرستاده شده توسط پیشنهاددهندگان در مجموع  $N$  به صورت  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{|N|}\}$  داده می‌شود. به این ترتیب اپراتور سلولی میزان تحمل تأخیر کاربران را جمع‌آوری می‌کند و مجموع هزینه‌های تشویق را با استفاده از حراج معکوس پیشنهاد شده در [۱۹] محاسبه می‌کند. به منظور مدل‌سازی مسئله کمینه کردن هزینه‌های متغیر اپراتور سلولی، دو متغیر مشخصه  $I_{cell}$  و  $I_{wf}$  تعریف می‌شوند. رابطه (۹) نشان می‌دهد که اگر ترافیک ارسالی توسط خود شبکه سلولی کم‌تر از آستانه ازدحام شبکه شود  $I_{cell} = 0$  و در غیر این صورت  $I_{cell} = 1$  است. رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که اگر ترافیک برون‌سپاری شده کم‌تر از ظرفیت شبکه WiFi باشد  $I_{wf} = 0$  و در غیر این صورت  $I_{wf} = 1$  است.

$$I_{cell} = \begin{cases} 1, & D \cdot (1 - \eta \cdot \theta) > Th_{cell} \\ 0, & D \cdot (1 - \eta \cdot \theta) \leq Th_{cell} \end{cases} \quad (9)$$

$$I_{wf} = \begin{cases} 1, & \eta \cdot \theta \cdot D > Th_{wf} \\ 0, & \eta \cdot \theta \cdot D \leq Th_{wf} \end{cases} \quad (10)$$

با در نظر گرفتن موارد فوق، مسئله به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\min_{\eta, t_i} (1 - I_{cell}) \cdot [\alpha \cdot D \cdot (1 - \eta \cdot \theta)] + I_{cell} \cdot [\alpha \cdot Th_{cell} + \alpha \cdot [1 + C_{cell}(v/Th_{cell})] \cdot v] + (1 - I_{wf}) \cdot [\beta \cdot \eta \cdot \theta \cdot D + \sum_{i \in N} \sum_{k=1}^{t_i} b_i^k] + I_{wf} \cdot [\beta \cdot Th_{wf} + \beta \cdot [1 + C_{wf}(v/Th_{wf})] \cdot v] + \sum_{i \in N} \sum_{k=1}^{t_i} b_i^k \quad (11)$$

### ۳-۴- ارائه الگوریتم‌های ابتکاری برای حل مدل‌های پیشنهادی

#### ۱-۳-۴ - برپاسازی هدفمند شبکه مکمل

مسئله برپاسازی هدفمند شبکه مکمل به تنهایی و با فرض  $q_j = 1$  به مسئله ساده‌تر کوله‌پشتی 0-1 تبدیل می‌شود. حل مسئله کوله‌پشتی 0-1 از نوع NP-hard است که حل آن را برای سناریوهای بزرگ در واقعیت دشوار می‌کند. به‌منظور حل این مسئله در زمان قابل قبول یک الگوریتم ابتکاری با زمان اجرای چندجمله‌ای، پیشنهاد می‌شود. شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی در شکل ۲ آورده شده است.

#### Algorithm 1: Minimizing Cellular Fix Cost

```

// Input: extracted Weight W from historical data, N, M, bmin, bmax, Thcell, l̄, d̄, l;
// مشاهده جدول
// Output: X*: optimal APs deployment, Q*: optimal bandwidth, Cost*: optimal cost
1: Initialize IX []; {Sorted regions based on their weight W}
2: APnumber = the number of APs based on coverage rate; // بر اساس معادله ۷
3: For k = 1 to APnumber
4: X [k] = IX [k]; // استقرار نقاط دسترسی
5: End
6: For q = bmin to bmax do // بر اساس معادله ۸
7: Q = Allocated bandwidth to APs in X set according to their weights // بر اساس معادله ۹
8: V = Calculated offloading potential of the users (∑i∈N Vid̄(l̄)) // پیش‌بینی قابلیت برون‌سپاری کاربران بر اساس مرجع [۱۹]
9: If V ≥ Thcell // based on Eq. (6)
10: CandidateCost(X, Q) = Calculate Cost(X, Q) // بر اساس معادله ۵
11: end
12: end
13: (Cost*, X*, Q*) = FindBest (CandidateCost) // بر اساس معادله ۵
14: Return Cost*, X*, Q*;
    
```

شکل ۲: شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی برای مدل (۱)

الگوریتم، مقدار پهنای باند APها با توجه به وزن‌هایشان و حداکثر و حداقل پهنای باند مجاز هر AP تنظیم می‌شود. با در نظر گرفتن پهنای باند هر AP، با استفاده از یک مدل پیش‌بینی شبه‌مارکوف، ترافیکی که انتظار می‌رود کاربران در متوسط تأخیر در نظر گرفته‌شده برای همه کاربران بر اساس نحوه برپاسازی شبکه مکمل WiFi، برون‌سپاری کنند، تخمین زده می‌شود ( $V_i^d(\bar{l})$  (خط ۸). سپس در صورت برقراری محدودیت‌های مقدار ترافیک برون‌سپاری موردنظر اپراتور سلولی (خط ۹)، هزینه‌های مالی مربوط به استقرار و پهنای باند تخصیص‌یافته به APها، در خط ۱۰ الگوریتم پیشنهادی محاسبه می‌شود. در خط ۱۳ از بین هزینه‌های محاسبه‌شده در خط ۱۰ که شرط برون‌سپاری مقدار ترافیک مورد انتظار اپراتور را نیز برآورده می‌کنند، گزینه دارای کم‌ترین هزینه مالی ( $Cost^*$ ) محاسبه‌شده بر اساس  $X^*$  (مکان‌های مناسب برای استقرار APها) و بردار  $Q^*$  (پهنای باند تخصیص‌یافته به هر AP) توسط تابع FindBest انتخاب می‌شود. خط ۱۴ خروجی این الگوریتم کم‌ترین هزینه ( $Cost^*$ ) و بردارهای  $X^*$  و  $Q^*$  متناسب با آن را نشان می‌دهد. پیچیدگی زمانی الگوریتم پیشنهادی  $O(mb_{max})$  است.

#### ۲-۳-۴ - کمینه کردن هزینه‌های متغیر شبکه سلولی

مسئله کمینه کردن هزینه تشویق کاربران در مبادله تأخیر با آن‌ها به‌عنوان بخشی از مسئله اصلی کمینه کردن هزینه‌های متغیر شبکه سلولی، در نظر گرفته شده است. همان‌طور که ذکر شد برای کمینه کردن هزینه‌های تشویق کاربران، چارچوب تشویقی توسعه داده‌شده و مدلی برای کمینه‌کردن هزینه‌های متغیر شبکه سلولی پیشنهاد شده است. در [۱۹] اثبات می‌شود که تخصیص مبتنی بر حراج معکوس در چارچوب تشویقی، با فرض  $l_i = 1$  برای هر  $i$ ، به یک مسئله کوله‌پشتی ساده‌تر 0-1 تبدیل می‌شود، مسئله کوله‌پشتی 0-1 از نوع NP-hard است؛ بنابراین مدل پیشنهادی در این مقاله نیز از نوع NP-hard خواهد بود. به‌منظور حل این مسئله با زمان اجرای قابل قبول، یک الگوریتم ابتکاری ارائه شده است. شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

پارامترهای معرفی‌شده در بخش‌های قبل و خروجی الگوریتم (۱) یعنی بردار  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)$  و  $Q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_m^*)$  به‌عنوان ورودی به الگوریتم (۲) داده می‌شود. سپس با استفاده از مدل پیش‌بینی شبه‌مارکوف مقدار ترافیکی که انتظار می‌رود کاربران در زمان‌های تأخیر پیشنهادیشان بر اساس نحوه برپاسازی شبکه مکمل WiFi، برون‌سپاری کنند، تخمین زده می‌شود (خط ۱). در خطوط ۲ الی ۶ اپراتور سلولی با تعیین مقدار ترافیک برون‌سپاری متفاوت و محاسبه هزینه‌های آن به انتخاب مقدار ترافیک مناسب برای برون‌سپاری می‌پردازد. پس از تعیین درصدی از ترافیک شبکه برای برون‌سپاری، الگوریتم تخصیص حراج (Win-Coupon-Allocation) اجرا می‌شود (خط ۴). این الگوریتم بر اساس مقدار ترافیک پیش‌بینی‌شده و پیشنهاد‌های تخفیف خواسته‌شده از طرف کاربران درباره میزان تأخیر تخصیص داده‌شده به هر کاربر با هدف برقراری

اولویت‌دهی و وزن‌دهی نواحی پرتراکم با استفاده از تاریخچه حرکتی کاربران و نمونه‌های به‌دست‌آمده از موقعیت کاربران در هر بازه زمانی، انجام می‌شود. پارامترهای معرفی‌شده در بخش‌های قبل و بردار وزن  $W$  به‌عنوان ورودی و برای حل مدل‌های بهینه‌سازی پیشنهادی استفاده می‌شوند. در خط ۱ الگوریتم، نواحی بر اساس تراکم جمعیت و وزن  $W$  محاسبه‌شده برای آن‌ها به‌صورت نزولی مرتب می‌شوند. تعداد APهای موردنیاز برای استقرار در ناحیه تحت پوشش شبکه سلولی بر اساس نرخ پوشش از پیش تعیین‌شده ( $R$ ) در خط ۲ محاسبه می‌شود و بر اساس وزن  $W$  محاسبه‌شده برای هر ناحیه به ترتیب اولویت هر ناحیه مستقر می‌شوند (خطوط ۳ الی ۵). پس از تعیین نواحی مناسب برای استقرار APها می‌بایست درباره نحوه تخصیص پهنای باند به آن‌ها تصمیم‌گیری شود. در خطوط ۶ الی ۱۲ برپاسازی شبکه مکمل بر اساس ترافیک ملازاد بر ظرفیت شبکه سلولی صورت می‌گیرد. در خط ۷



### ۵-۱- پیکربندی شبیه‌سازی

منطقه تحت پوشش شبکه سلولی به  $225 (15 \times 15)$  بخش مساوی تقسیم شده است. اندازه داده درخواستی برای هر کاربر به‌طور تصادفی در محدوده  $100 \text{ Mb}$  تا  $500 \text{ Mb}$  تولید می‌شود. فرض شده است که شبکه سلولی  $3\text{G}$  با پوشش سراسری برای هر کاربر توسط یک اپراتور سلولی فراهم می‌شود. سپس اپراتور به برپاسازی شبکه مکمل WiFi در ناحیه می‌پردازد. دامنه پهنای باند تخصیص داده شده به هر AP در بازه  $64 \text{ Kbps}$  و  $1 \text{ Mbps}$  در نظر گرفته شده است. تعداد نقاط دستیابی بر اساس نرخ پوشش شبکه مکمل در سناریوها تعیین شده‌اند. برای نرخ پوشش شبکه مکمل  $(R)$ ، مقادیر  $0.2$ ،  $0.4$  و  $0.6$  در نظر گرفته شده است و تأثیر آن بر روی بهره‌وری فرآیند برون‌سپاری بررسی می‌شود. ظرفیت شبکه سلولی به سه حامل (carriers) تنظیم می‌شود (به‌عنوان مثال سه برابر  $3/84$  مگاهرتز). دامنه تغییرات بهره‌وری طیف داده در کل ناحیه تحت پوشش شبکه سلولی در بازه  $0.5$  تا  $2 \text{ bps/Hz}$  است. در این مقاله بهره‌وری طیف داده به مقدار  $1 \text{ bps/Hz}$  تنظیم می‌شود. فرض می‌شود که اگر کل ترافیک شبکه‌ها کمتر از  $80\%$  ظرفیت شبکه آن‌ها باشد ازدحام رخ نمی‌دهد.

تابع  $C_{cell}(\cdot)$  برای شبکه سلولی بر اساس مقاله [۱۷] به‌صورت  $C_{cell}(\cdot) = 2 \cdot (v/Th_{cell})^2$  در نظر گرفته می‌شود. در شبکه WiFi هم تابع  $C_{wf}(\cdot)$  به‌صورت  $C_{wf}(\cdot) = 0.5 \cdot (v/Th_{wf})$  تنظیم می‌شود [۱۷]. فاز دوم مسئله که شامل کمینه کردن هزینه‌های متغیر شبکه سلولی است، به‌صورت دوره‌ای اجرا می‌شود. در طول هر دوره ترافیک درخواستی کاربران ثابت است. اما در دوره‌های متفاوت کاربران و ترافیک درخواستی آن‌ها تغییر می‌کند.

حرکت کاربران با استفاده از مدل تحرک Levy Walk [۲۴] ایجاد می‌شود که یک مدل تحرک واقع‌گرایانه برای شبیه‌سازی متوسط حرکت روزانه کاربران است. در اینجا فرض می‌شود که کاربر در یک منطقه به ابعاد  $3 \text{ Km} \times 3 \text{ Km}$  در حال حرکت است. در این مدل، برای هر جابجایی کاربر خصوصیتی از قبیل سرعت (۵ الی ۲۰) کیلومتر بر ثانیه، زاویه (۰ الی ۳۶۰) درجه، گام حرکت (۵۰ الی ۳۰۰) متر و مدت‌زمان اقامت (۳۰ الی ۶۰۰) ثانیه تعریف می‌شود. به جابجایی‌های کاربر در اصطلاح «پرواز» گفته می‌شود. کاربر پس از طی مسافت پرواز و رسیدن به موقعیت جدید، مدت‌زمانی را توقف می‌کند که آن را «مدت‌زمان اقامت» می‌نامند. سرعت و زاویه هر پرواز با استفاده از توزیع یکنواخت تعیین می‌شود. برای تعیین مسافت پرواز و مدت اقامت، توزیع Truncated Pareto مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل تحرک، در نرم‌افزار متلب برای ۳۰ روز شبیه‌سازی شده و از موقعیت هر کاربر در هر بازه زمانی (۲ دقیقه) نمونه‌برداری می‌شود.

در نهایت برای تعیین سناریوهایی با تحمل تأخیر متفاوت از سوی کاربران یک تابع رضایت به‌صورت  $S(t) = f - a \cdot t^b$  مطابق مقاله [۱۹] معرفی می‌شود که  $f$  هزینه سرویس ترافیک اولیه است، فرض می‌شود که همه اقلام داده‌های درخواستی دارای هزینه سرویس یکسان

تبادل بین کاهش هزینه‌های تشویق و درصد ترافیک برون‌سپاری شده تصمیم‌گیری می‌کند. در خط ۵ هزینه‌های متغیر اپراتور سلولی (مجموع هزینه‌های تشویق و هزینه‌های سرویس‌دهی کاربران) برای ترافیک هدف برون‌سپاری متفاوت محاسبه می‌شود. تابع FindBest در خط ۷ از بین هزینه‌های محاسبه شده، کم‌ترین هزینه را به‌عنوان هزینه بهینه اپراتور سلولی ( $Cost^*$ ) انتخاب می‌کند و ترافیک هدف برون‌سپاری ( $V^* = VO$ ) و بردار تأخیر ( $t^* = T_B^{VO}$ ) متناظر با هزینه بهینه را به‌عنوان خروجی الگوریتم باز می‌گرداند.

#### Algorithm 2: Minimizing Cellular Overall Cost

```

// Input:  $X^*, Q^*$  // خروجی الگوریتم ۱
مشاهده جدول ۱ //  $N, \alpha, \beta, Th_{cell}, Th_{wf}, \theta, B, l_i, d_i, D;$ 
// Output:  $t^*[N]$ : optimal delay,  $V^*$ : optimal offloading traffic,  $Cost^*$ : optimal cost;
پیش‌بینی قابلیت //  $V_i^d(t_i)$  = Calculated offloading potential of the users // بر اساس تحلیل فرآیندهای تصادفی مرجع [۱۹]
1:  $V_i^d(t_i)$  = Calculated offloading potential of the users // بر اساس معادله ۳۰
2: For  $\eta = 0$  to 1 do // حجم هدف برای برون‌سپاری
3:  $VO = \eta \cdot \theta \cdot D$  // بر اساس معادله ۱۶ و معادله ۱۹ و الگوریتم ۱ در مرجع [۱۹]
4:  $[C_B^{VO}, T_B^{VO}] = \text{Win-Coupon-Allocation}(N, B, VO, V_i^d(t_i))$  // بر اساس معادله ۱۵
5:  $CandidateCost(\eta) = \text{Calculated cellular overall cost by considering } \alpha, \beta, Th_{cell}, Th_{wf};$ 
6: End
7:  $(Cost^*, V^*, t^*) = \text{FindBest}(CandidateCost);$  // بر اساس معادله ۱۵
8: Return  $Cost^*, V^*, t^*;$ 

```

شکل ۳: شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی برای مدل (۲)

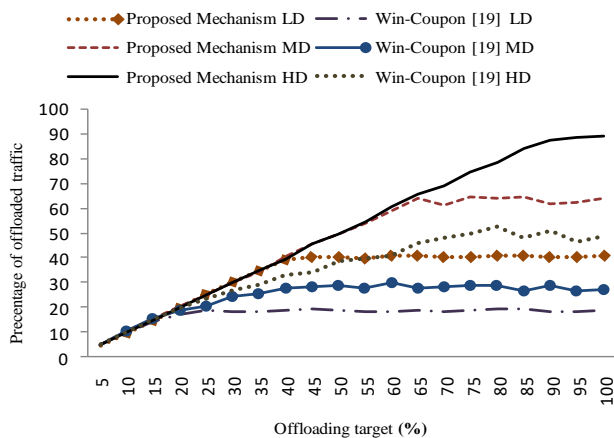
### ۵- ارزیابی کارایی مکانیسم پیشنهادی

در این بخش کارایی مکانیسم پیشنهادی ارزیابی و نتایج حاصل از مکانیسم پیشنهادی با نتایج به‌دست‌آمده از چارچوب تشویقی Win-Coupon [۱۹]، مقایسه می‌شود. در این مقاله برای شبیه‌سازی سناریوی ارائه شده در مدل آزمایشی از نرم‌افزار Matlab استفاده شده است. در سناریوهای مدل آزمایشی، شبکه ناهمگن متشکل از شبکه سلولی  $3\text{G}$  و WiFi است که هر دو متعلق به اپراتورهای جداگانه هستند و با توزیع هوشمندانه APها تحت نرخ پوشش مشخص مسئله کمینه‌کردن کل هزینه‌های اپراتور سلولی که هزینه‌های تشویق نیز بخشی از آن است بررسی می‌شود. در صورتی که در چارچوب تشویقی Win-Coupon فرض می‌شود که هر دو شبکه  $3\text{G}$  و WiFi متعلق به یک اپراتور است و مسئله کمینه کردن هزینه‌های تشویق کاربران به تنهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه نحوه پیکربندی شبیه‌سازی بیان می‌شود و بعد از معرفی معیارهای ارزیابی، نتایج شبیه‌سازی ذکر می‌شوند.

مکانیسم پیشنهادی نسبت به چارچوب تشویقی Win-Coupon است.

### ۵-۳-۱ - سنجش تأثیر تحمل تأخیر

به منظور بررسی تأثیر تحمل تأخیر کاربران بر روی فرآیند برون‌سپاری، سناریوهایی با تحمل تأخیر کم، متوسط، زیاد و نرخ پوشش ۰/۴، با هر دو روش مکانیسم پیشنهادی و چارچوب تشویقی Win-Coupon اجرا می‌شوند. نتایج ارزیابی در شکل ۴ نشان داده می‌شود. محور افقی نمایانگر ترافیک هدف (مقدار ترافیک مورد نظر اپراتور سلولی برای برون‌سپاری) است که به صورت درصدی از کل ترافیک شبکه در نظر گرفته شده است. محور عمود نمایانگر درصدی از ترافیک است که در عمل از شبکه برون‌سپاری شده است.



شکل ۴: تأثیر تحمل تأخیر کاربران بر روی فرآیند برون‌سپاری

همان‌طور که مشاهده می‌شود تحمل تأخیر بیشتر کاربران موجب بهبود عملکرد فرآیند برون‌سپاری می‌شود و شیب نمودار درصد ترافیک برون‌سپاری شده در سناریوی با تحمل تأخیر زیاد نسبت به دو سناریوی با تحمل تأخیر کم و متوسط، بیشتر است. همچنین مشاهده می‌شود که برای هر سه سناریوی تحمل تأخیر متفاوت، درصد ترافیک برون‌سپاری شده در مکانیسم پیشنهادی نسبت به چارچوب تشویقی Win-Coupon بهبود داشته است.

### ۵-۳-۲ - سنجش تأثیر نرخ پوشش شبکه مکمل

به منظور بررسی تأثیر دسترس‌پذیری WiFi بر روی عملکرد مکانیسم پیشنهادی سناریوهایی را با تحمل تأخیر متوسط و نرخ پوشش‌های متفاوت (R) ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ در نظر گرفته شده است. درصد ترافیک برون‌سپاری شده بر حسب ترافیک هدف برون‌سپاری در شبیه‌سازی این سناریوها با هر دو روش مکانیسم پیشنهادی و روش Win-Coupon برای نرخ پوشش‌های متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مکانیسم پیشنهادی نسبت به نرخ پوشش‌های متفاوت حساسیت کم‌تری از خود نشان می‌دهد. در

$f = 0.8$  هستند. پارامتر  $a$  مقیاس تابع  $S(t)$  است و مقادیر آن بر روی تحمل تأخیر کاربران تأثیر می‌گذارد، هرچه این پارامتر کوچک‌تر باشد تحمل تأخیر کاربران بیشتر می‌شود. با استفاده از تنظیم تصادفی پارامتر تابع رضایت ( $a$ ) درون محدوده‌های  $[0.1, 0.2]$ ،  $[0.1, 0.3]$  و  $[0.3, 0.4]$  به ترتیب سناریوهای با تحمل تأخیر زیاد  $(HD)^2$ ، متوسط  $(MD)^4$  و کم  $(LD)^5$  ایجاد می‌شود. پارامتر  $b$  شیب تابع  $S(t)$  را تعیین می‌کند و زمانی که  $b > 1$ ،  $b = 1$  و  $b < 1$ ، تابع رضایت  $S(t)$  به ترتیب به صورت تابع مقعر، خطی و محدب است. در شبیه‌سازی‌ها پارامتر  $b$  در محدوده  $[0.8, 1.2]$  در نظر گرفته می‌شوند. مقادیر پارامترهای  $a$  و  $b$  برای هر ترافیک و هر کاربر در محدوده گفته شده با استفاده از توزیع یکنواخت تولید می‌شود.

### ۵-۲ - معیارهای ارزیابی

کارایی مکانیسم پیشنهادی بر اساس معیارهای زیر ارزیابی می‌شود:

- درصد ترافیک برون‌سپاری شده که نسبت ترافیک ارسال شده از طریق شبکه WiFi را به کل ترافیک تولیدشده در شبکه سلولی توسط کاربران مشخص می‌کند.

درصد ترافیک برون‌سپاری شده

$$= \frac{\text{کل ترافیک برون‌سپاری شده به شبکه مکمل}}{(\text{کل ترافیک شبکه سلولی}) \times 100}$$

- متوسط هزینه کلی انتقال هر مگابایت ترافیک برای اپراتور سلولی که به صورت حاصل تقسیم مجموع هزینه‌های ترافیک منتقل شده توسط شبکه سلولی و مکمل، بر کل ترافیک شبکه سلولی بر حسب مگابایت است.

متوسط هزینه انتقال هر مگابایت

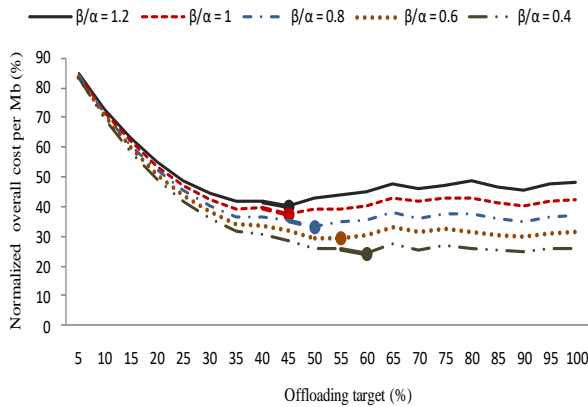
$$= \frac{\text{هزینه انتقال ترافیک توسط شبکه سلولی بر اساس } \alpha}{\text{هزینه انتقال ترافیک توسط شبکه مکمل بر اساس } \beta} \times (\text{کل ترافیک شبکه سلولی})$$

### ۵-۳ - نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به ارزیابی مکانیسم پیشنهادی و مقایسه آن با چارچوب تشویقی Win-Coupon [۱۹] در سناریوهای مختلف پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی در تمام سناریوها بر اساس میانگین ۱۲۰ بار اجرا ارائه شده‌اند. در تعدادی از نمودارهای این بخش، به هزینه کلی نرمال شده و بهبود نسبی اشاره شده است که در زیر شرح داده می‌شوند:

- هزینه کلی نرمال شده (Normalized overall cost): از تقسیم متوسط هزینه انتقال هر مگابایت ترافیک توسط شبکه سلولی و مکمل، به هزینه انتقال هر مگابایت ترافیک از طریق شبکه سلولی محاسبه شده است.
- بهبود نسبی (Relative improvement): شامل میزان بهبود ایجادشده در معیارهای ارزیابی فرآیند برون‌سپاری توسط

کمینه نرمال شده و کاهش درصد ترافیک هدف قابل تحقق با کمترین هزینه است. به عنوان مثال با افزایش نسبت  $\beta$  به  $\alpha$  از  $0.4$  به  $1.2$  هزینه کمینه نرمال شده از  $25/5\%$  به  $4/4\%$  افزایش و درصد ترافیک هدف با کمترین هزینه، از  $60\%$  به  $45\%$  کاهش می یابد.



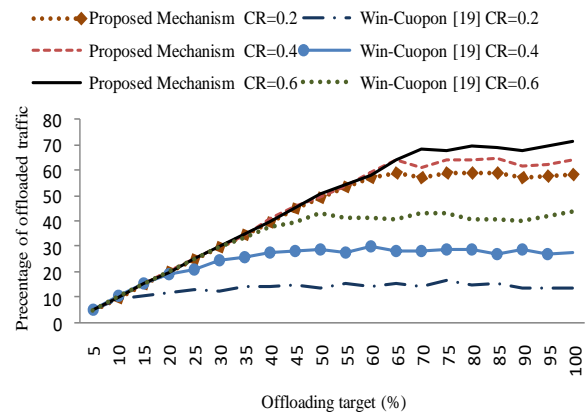
شکل ۶: بررسی تأثیر نسبت  $\beta$  به  $\alpha$  متفاوت بر هزینه های کلی نرمال شده و درصد ترافیک هدف با کمترین هزینه

شکل ۷ تأثیر نسبت های  $\beta$  به  $\alpha$  متفاوت را روی هزینه کمینه نرمال شده هر مگابایت ترافیک و درصد ترافیک برون سپاری شده با کمترین هزینه در مکانیسم پیشنهادی و چارچوب Win-Coupon مقایسه می کند. مطابق شکل ۷ - الف در هر دو روش با افزایش نسبت  $\beta$  به  $\alpha$  هزینه کمینه نرمال شده هر مگابایت ترافیک افزایش می یابد اما مقادیر آن برای هر نسبت  $\beta$  به  $\alpha$  در مکانیسم پیشنهادی کم تر از چارچوب Win-Coupon است. در شکل ۷ - ب، درصد ترافیک برون سپاری شده با کمترین هزینه در مکانیسم پیشنهادی با  $\alpha = 0.4$  معادل  $65\%$  است در صورتی که در چارچوب Win-Coupon مقادیر آن معادل  $40\%$  است. با افزایش نسبت  $\beta$  به  $\alpha$  مقدار آن در هر دو مکانیسم کاهش می یابد ولی کماکان در مکانیسم پیشنهادی بالاتر از چارچوب Win-Coupon است. این نتایج نشان می دهد که مکانیسم پیشنهادی، قادر به برون سپاری مقدار بیش تری از ترافیک است.

### ۶- نتیجه گیری و پیشنهاد کارهای آینده

در این مقاله مکانیسمی پیشنهاد شده است که همه بازیگران (اپراتور سلولی، اپراتور شبکه مکمل و کاربران) و رابطه اقتصادی بین آن ها را در نظر می گیرد و مسئله کمینه کردن کل هزینه های شبکه سلولی به همراه حفظ رضایت کاربر را بررسی می کند. کارایی مکانیسم پیشنهادی در سناریوهایی با تحمل تأخیر و نرخ پوشش متفاوت ارزیابی شده است. نتایج ارزیابی ها نشان می دهد درصد ترافیک برون سپاری شده و متوسط هزینه کلی نرمال شده به ازای هر مگابایت، بهبود یافته است و در سناریوهایی با نرخ پوشش و تحمل تأخیر کم، بهبود بیش تری مشاهده شده است. به علاوه، نتایج بیانگر آن است که مقدار ترافیک برون سپاری شده در مکانیسم پیشنهادی نسبت به کاهش

مکانیسم پیشنهادی  $60\%$  از کل ترافیک درخواستی کاربران به آسانی و با هر سه نرخ پوشش قابل برون سپاری است اما در Win-Coupon برون سپاری  $15\%$  کل حجم ترافیک با هر سه نرخ پوشش میسر است. حداکثر درصد ترافیک برون سپاری شده در مکانیسم پیشنهادی برای سه نرخ پوشش  $0.2$ ،  $0.4$  و  $0.6$  به ترتیب  $60\%$ ،  $65\%$  و  $70\%$  و در چارچوب Win-Coupon به ترتیب حدود  $15\%$ ،  $30\%$  و  $45\%$  است.



شکل ۵: تأثیر نرخ پوشش شبکه WiFi بر روی فرآیند برون سپاری

### ۵-۳-۳- سنجش تأثیر هزینه های شبکه سلولی و مکمل

در این بخش مقدار ترافیک هدف برای برون سپاری بر اساس مجموع هزینه های اپراتور سلولی تعیین می شود. این هزینه ها شامل هزینه مالی برای انتقال هر واحد ترافیک توسط شبکه سلولی و WiFi در شرایط ازدحام و عدم ازدحام و هزینه تشویق کاربران برای تحمل تأخیر توسط آن ها است. سناریویی با نرخ پوشش  $0.4$  برای شبکه مکمل و تحمل تأخیر متوسط (MD) برای کاربران در نظر گرفته می شود و تأثیر نسبت های متفاوت  $\beta$  به  $\alpha$  بررسی می شود. با افزایش نسبت  $\beta$  به  $\alpha$ ، هزینه های برون سپاری ترافیک به شبکه WiFi نسبت به هزینه ارسال ترافیک توسط خود شبکه سلولی افزایش می یابد. تخمین دقیق هزینه های اپراتور سلولی در انتقال ترافیک از طریق شبکه سلولی و یا برون سپاری به شبکه WiFi مشکل است، بنابراین مکانیسمی ارائه شده است که اپراتور بتواند با توجه به نیازش مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  را تنظیم کند.

شکل ۶ هزینه کلی نرمال شده سرویس دهی هر مگابایت ترافیک در شبکه سلولی را برای نسبت های متفاوت  $\beta$  به  $\alpha$ ، در مکانیسم پیشنهادی نشان می دهد. نقاط مشخص شده در هر کدام از منحنی ها، نقاط بهینه را نشان می دهند که در این نقاط، هزینه های کلی نرمال شده برای انتقال هر مگابایت ترافیک اپراتور سلولی حداقل مقدار را دارد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود این نقاط از منحنی همان نقاطی هستند که از این نقطه به بعد با افزایش بیش تر ترافیک هدف، مقدار ترافیک برون سپاری شده تغییر محسوسی نمی نماید و با توجه به شکل ۶ هزینه کلی نرمال شده اپراتور سلولی نیز افزایش یافته است. با افزایش نسبت  $\beta$  به  $\alpha$  منحنی هزینه های کلی نرمال شده سلولی به سمت بالا و چپ شیفت می یابد که نشان دهنده افزایش هزینه

*Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs) IEEE Conference*, pp. 351-356, Turin, April 2013.

[3] K. Lee, J. Lee, Y. Yi, I. Rhee and S. Chong, "Mobile data offloading: How much can WiFi deliver?," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 21, no. 2, pp.536-550, 2013.

[4] B. Han, P. Hui, V. A. Kumar, M. V. Marathe, J. Shao and A. Srinivasan, "Mobile data offloading through opportunistic communications and social participation," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 5, pp.821-834, 2012.

[5] A. Balasubramanian, R. Mahajan, and A. Venkataramani, "Augmenting mobile 3G using WiFi," In *Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services, ACM*, pp. 209-222, San Francisco, California, USA, June 2010.

[6] J. M. Koo, J. P. Espino, I. Armuelles and R. Villarreal, "Use of open software tools for data offloading techniques analysis on mobile networks," *Open Source Software: Mobile Open Source Technologies*, pp. 111-112, Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[7] فرهاد دانائی یگانه و افشین ابراهیمی، «مدیریت انتخاب مجدد سلول در نسل‌های مختلف شبکه‌های سلولی مبتنی بر 3GPP و تحلیل دو چالش یک اپراتور داخلی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۳، صفحات ۱۶۱-۱۷۹، ۱۳۹۵.

[8] F. T. Hsu and H. J. Su, "When does the AP deployment incentivize a user to offload cellular data: An energy efficiency viewpoint," In *IEEE Communications, Control and Signal Processing, 6th International Symposium*, pp. 210-213, Athens, May 2014.

[9] F. Rebecchi, M. Dias de Amorim, V. Conan, A. Passarella, R. Bruno and M. Conti, "Data Offloading Techniques in Cellular Networks: A Survey," *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol. 17, issue. 2, pp. 580-603, 2015.

[10] I. Komnios, F. Tzapeli and S. Gorinsky, "Cost-Effective Multi-Mode Offloading with peer-assisted communications," *Ad Hoc Networks*, vol. 25, pp.370-382, 2015.

[11] Y. Li, J. Depeng, W. Zhaocheng, Z. Lieguang, and C. Sheng "Coding or not: Optimal mobile data offloading in opportunistic vehicular networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 318-333, 2014.

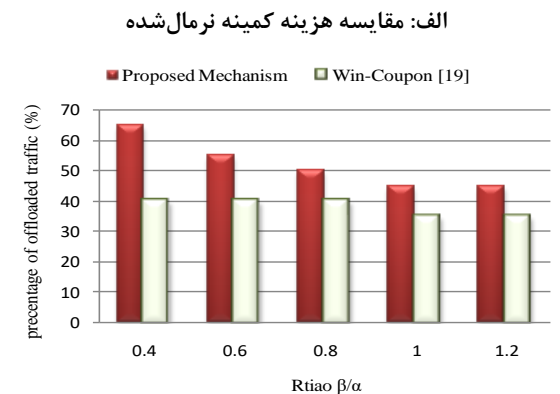
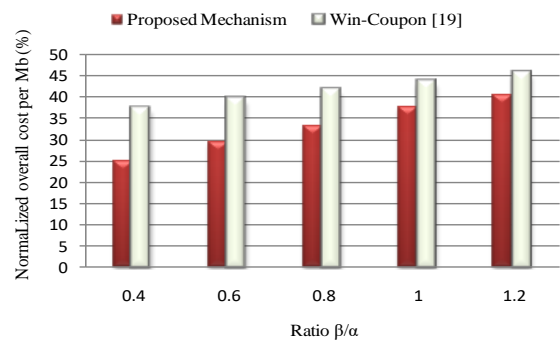
[12] V. F. Mota, D. F. Macedo, Y. Ghamri-Doudanez and J. Nogueira, "Managing the decision-making process for opportunistic mobile data offloading," In *IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, pp. 1-8, Krakow, May 2014.

[13] S. Paris, F. Martignon, I. Filippini, "An Efficient Auction-based Mechanism for Mobile Data Offloading," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, no. 8, pp. 1573 – 1586, 2015.

[14] J. Lee, Y. Yi, S. Chong and Y. Jin, "Economics of WiFi offloading: Trading delay for cellular capacity," *IEEE Transactions on Wireless Communications* 13, no. 3, pp.1540-1554, 2014.

[15] C. W. Patterson, *An Economic Model of Subscriber Offloading between Mobile Network Operators and WLAN Operators*, Master of Science Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, September 2014.

سطح پوشش شبکه WiFi حساسیت کم‌تری دارد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که برای یک نسبت معین  $\beta$  به  $\alpha$  می‌توان ترافیک بیش‌تر با هزینه متغیر کم‌تری را در مکانیسم پیشنهادی نسبت به چارچوب Win-Coupon برون‌سپاری کرد. با توجه به مطالب ذکرشده می‌توان نتیجه گرفت که مکانیسم پیشنهادی نسبت به چارچوب Win-Coupon در تعادل بار شبکه سلولی و کاهش هزینه‌ها موفق‌تر بوده است. درواقع مکانیسم پیشنهادی یک چارچوب کلی را با در نظر گرفتن یک شبکه مکمل WiFi ارائه می‌دهد که می‌تواند برای سناریوهایی با شبکه مکمل متفاوت، یا ترکیبی از چند شبکه مکمل مانند Femtocell و WiFi گسترش داده شود. مکانیسم پیشنهادی به‌گونه‌ای است که می‌تواند با مدل‌های پیش‌بینی دیگر برای سناریوهای متفاوت نیز تطبیق داده شود. از لحاظ اقتصادی می‌توان با در نظر گرفتن چند اپراتور برای هر شبکه، تأثیر رقابت و همکاری بین اپراتورها را در بهبود فرآیند برون‌سپاری مورد بررسی قرار داد و مکانیسم پیشنهادی را مطابق با آن توسعه داد.



شکل ۷: مقایسه نتایج بهینه حاصل از اجرای مکانیسم پیشنهادی و چارچوب تشویقی Win-Coupon [۱۹] در نسبت‌های  $\beta$  به  $\alpha$  متفاوت

## مراجع

[1] Cisco and/or its affiliates, *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015–2020 White Paper*, Cisco Public, 2016.

[2] L. Gao, G. Iosifidis, J. Huang and L. Tassiulas, "Economics of mobile data offloading," *Computer*

- [21] P. Samimi, Y. Teimouri, and M. Mukhtar, "A combinatorial double auction resource allocation model in cloud computing," *Information Science*, vol. 357, pp. 201-216, 2016.
- [۲۲] مجید حروفیانی، علی زنگنه و رضا قندهاری، «مدل چندهدفه قیمت‌گذاری تزریق توان راکتیو منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۳، صفحات ۱۴۹-۱۵۹، ۱۳۹۵.
- [23] M. Roughan, M. Thorup and Y. Zhang, "Traffic engineering with estimated traffic matrices", In *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM conference on Internet measurement*, pp. 248-258, Miami Beach, FL, USA, October 2003.
- [24] R. M. Shin, S. Hong, K. Lee and S. Chong, "On the Levy-walk nature of human mobility: Do humans walk like monkeys?." In *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 924-932, 2008.
- [16] L. Gao, G. Iosifidis, J. Huang, L. D. Tassiulas and Li, "Bargaining-based mobile data offloading," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp.1114-1125, 2014.
- [17] L. Qiu, H. Rui and A. Whinston, "When cellular capacity meets WiFi hotspots: A smart auction system for mobile data offloading," *System Sciences (HICSS), 48th Hawaii International Conference, IEEE*, pp. 4898-4907, January 2015.
- [18] W. Dong, S. Rallapalli, R. Jana, L. Qiu, K.K. Ramakrishnan, L. Razoumov, Y. Zhang and T.W. Cho, "iDEAL: Incentivized dynamic cellular offloading via auctions," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 22, no. 4, pp.1271-1284, 2014.
- [19] X. Zhuo, W. Gao, G. Cao and S. Hua, "An incentive framework for cellular traffic offloading," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 3, pp. 541-555, 2014.
- [20] S. Costa Ci An, *Mobile Offloading in Residential Wireless Access Markets*, Master of science Dissertation, Alto University, 2014.

## زیرنویس‌ها

<sup>1</sup> Cellular Traffic Offloading

<sup>2</sup> On-the-Spot

<sup>3</sup> Delay Tolerant Offloading

<sup>4</sup> Capital expenditure

<sup>5</sup> Operating Expenditures

<sup>6</sup> Opportunistic

<sup>8</sup> Mobile Network Operator

<sup>8</sup> Small-Scale Operator

<sup>9</sup> Access Point Owner

<sup>10</sup> In Round

<sup>11</sup> Bid

<sup>12</sup> Non Linear Integer Programming

<sup>14</sup> High Delay

<sup>15</sup> Middle Delay

<sup>16</sup> Low Delay