

ارایه یک الگوریتم کارا برای حل مسئله زمان بندی منصفانه تخصیص کانال به کاربران در شبکه های بی سیم

مهدی کدیور*

گروه علوم کامپیوتر- دانشکده علوم ریاضی- دانشگاه شهرکرد- ایران

پست الکترونیکی: kadivar-m@sku.ac.ir

چکیده

تضمین کیفیت ارایه خدمات و خدمات بدون تاخیر در شبکه های بی سیم در مواردی مانند خودروهای خودران و ارتباط زنده اینترنتی بسیار اهمیت دارد. روش تخصیص کانال به کاربران تاثیر بسیار زیادی در کیفیت ارایه خدمات به کاربران دارد. تعیین روش تخصیص کانال و زمان بندی آن با توجه به هدف هایی مانند افزایش گذردهی، کاهش تاخیر ارسال داده مشخص می گردد. تامین هم زمان این اهداف به دلیل ناهم سو بودن آنها امکان پذیر نیست. برای تضمین کیفیت، باید کمینه پهنای باند و یا نسبت انتقال^۱ کاربران تضمین شود که ممکن است باعث کاهش گذردهی شبکه گردد. در این مقاله، برای تضمین کیفیت خدمات با حفظ گذردهی شبکه، مسئله زمان بندی تخصیص کانال به کاربران با هدف تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه فرمول بندی خواهد شد. در ادامه یک الگوریتم کارا به نام RA-F^۲ برای حل مسئله ارایه شده است که آن را در زمان چند جمله ای $O(n^5)$ حل می کند. برای ارزیابی عملکرد این الگوریتم پنج محک در نظر گرفته شد که عبارتند از: ۱- تضمین کمینه مقدار نسبت انتقال داده، ۲- میانگین نسبت انتقال داده تخصیص داده شده به کاربران، ۳- تعداد اسلات زمانی تخصیص داده شده به هر کاربر

۴- اختلاف نسبت انتقال داده با جواب بهینه و ۵- زمان اجرا. الگوریتم RA-F با در نظر گرفتن این پنج محک با الگوریتم های DRL^۳، max-s^۴ و NFP^۵ مقایسه شده است. نتایج عددی نشان می دهد که برای الگوریتم RA-F با در نظر گرفتن محک اول، دست کم ۱۴ درصد از کاربران نسبت به سه الگوریتم دیگر، کمینه نسبت انتقال داده لازم برای تضمین کیفیت خدمات را دریافت می کنند. در مورد محک دوم، دست کم ۱۲ درصد مقدار نسبت انتقال داده در الگوریتم RA-F نسبت به بقیه بیشتر است. همچنین در الگوریتم RA-F تعداد اسلات زمانی تخصیص داده شده به کاربران دست کم ۲۱ درصد بیشتر از بقیه الگوریتم های ذکر شده است. در مقایسه با جواب بهینه مسئله تخصیص منصفانه، در الگوریتم RA-F حدود ۷۰ درصد از کاربران می توانند نسبت انتقال بهینه را دریافت کنند. این در حالی است که این مقدار در بقیه الگوریتم های مقایسه شده در این مقاله کمتر از ۵۹ درصد است. زمان اجرای الگوریتم RA-F حدود ۳۹ درصد نسبت به حل مسئله تئوری کاهش داشته است. این نتایج عددی و تحلیلی نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم های موجود کارایی بهتری دارد.

واژه های کلیدی: تخصیص کانال، زمان بندی، تضمین

کیفیت، افزایش گذردهی، کاهش تاخیر ارسال

3-DRT-Max-Min Fairness UARA scheme.

4-Max-SINR User Association algorithm.

5-Normalized Fixed Point (NFP) iterative algorithm.

* نویسنده مسئول

1-Transmission rate.

2-Resource Assignment-Max-Min-Fairness.

۱. مقدمه

یک مسئله اساسی و چالش برانگیز در شبکه‌های بی‌سیم، مسئله تخصیص کانال به کاربران است. در مسئله تخصیص کانال تعیین می‌گردد که چه کاربری در کدام اسلات زمانی می‌تواند خدمات ارائه شده یک ایستگاه مخابراتی را به کار بگیرد. هر ایستگاه مخابراتی که از تک فرکانس پشتیبانی می‌کند، فقط به یک کاربر در یک زمان می‌تواند خدمات ارائه کند. زمان‌بندی تخصیص اسلات‌ها به کاربران بر اساس اهداف مختلف صورت می‌گیرد. از جمله این هدف‌ها می‌توان به افزایش گذردهی شبکه و یا تضمین کیفیت خدمات (QoS^۶) اشاره کرد.

در مدل اول زمان‌بندی، افزایش گذردهی شبکه مورد توجه است. مقدار گذردهی شبکه به میزان نسبت تبادل داده بین کاربران و ایستگاه رادیویی بستگی دارد. هر چقدر این نسبت بالاتر باشد میزان گذردهی شبکه نیز افزایش می‌یابد. در شبکه‌های بی‌سیم، شرایط کانال ارتباطی (فاصله کاربر تا ایستگاه و همچنین اثر محوشدگی امواج)، نسبت تبادل داده بین کاربر و ایستگاه مخابراتی را تعیین می‌کند. در واقع با توجه به مدل SINR [۱، ۲] که برای مدل‌سازی دریافت توان توسط کاربران ارائه شده است، کاربرانی که در فاصله کمتری از ایستگاه قرار دارند، امواج با توان بالاتری از سوی ایستگاه دریافت می‌کنند. بنابراین رابطه مقدار داده مبادله شده به توان دریافتی (که به فاصله بستگی دارد) و میزان نوفه^۷ موجود در محیط کاربر بستگی دارد. برای افزایش گذردهی شبکه، کاربران نزدیک به ایستگاه در اولویت تخصیص کانال هستند. زیرا با بیشترین مقدار نسبت انتقال می‌توانند داده بیشتری جابه‌جا کنند. همچنین، زمان‌بندی مناسب برای به‌کارگیری و تخصیص کانال‌ها نقش بسیار مهمی در میزان بهره‌برداری کاربران از شبکه و میزان گذردهی کل شبکه دارد. در بسیاری از مقاله‌های ارائه شده برای حل این مسئله، هدف اصلی افزایش گذردهی شبکه مورد توجه قرار گرفته است. این نکته

باعث می‌شود که کاربرانی که باعث افزایش گذردهی شبکه می‌شوند در اولویت تخصیص کانال قرار گیرند. بنابراین کاربرانی که به دلیل شرایط شبکه (مانند فاصله تا ایستگاه و یا میزان نوفه موجود در محیط)، امکان افزایش گذردهی را نداشته باشند، از ارائه خدمات محروم شوند. بنابراین لازم است زمان‌بندی به صورت منصفانه صورت گیرد. این نوع مسئله زمان‌بندی با هدف افزایش گذردهی شبکه، «مسئله تخصیص منصفانه متناسب» نامیده می‌شود [۲، ۳]. در الگوریتم‌های زمان‌بندی از این نوع اشتراک‌گذاری منصفانه و کارآمد پهنای باند بین کاربران فراهم می‌شود؛ به این معنا که مجموع لگاریتمی توان عملیاتی به‌دست آمده را در یک جمعیت ثابت از کاربران بیشینه می‌کند [۴، ۵]. مقاله‌های زیادی در زمینه تخصیص منصفانه متناسب ارائه شده است [۴-۹].

در مدل دوم، زمان‌بندی بر اساس تضمین کیفیت خدمات صورت می‌گیرد. در شبکه‌های نسل پنجم، برای افزایش کیفیت خدمات، داشتن حداقل نسبت انتقال داده الزامی است [۱۰]. به‌ویژه در شبکه‌های خودرویی و کارخانه‌های مجهز به شبکه‌های هوشمند، تخصیص نسبت انتقال منصفانه بین کاربران اهمیت زیادی دارد. به دلیل ارتباط این موضوع با روش زمان‌بندی تخصیص کانال به کاربران، می‌توان گفت در شبکه‌های بی‌سیم، مسئله زمان‌بندی تخصیص کانال به کاربران نقش اساسی در بهبود عملکرد شبکه دارد. در این مقاله می‌خواهیم مسئله زمان‌بندی به‌کارگیری کانال‌های شبکه را به گونه‌ای انجام دهیم که ضمن افزایش گذردهی شبکه، تخصیص کانال به صورت منصفانه برای همه کاربران مورد توجه قرار گیرد. حل مسئله تخصیص منصفانه کانال به کاربران به گونه‌ای که کمترین مقدار نسبت انتقال تخصیص داده شده به کاربران بیشینه شود، به مسئله «تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه» معروف شده است [۴، ۳].

نوآوری‌های این مقاله دو مورد است. نخست این که در این مقاله، مدل تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه کانال را

6-Quality of Services.

7-Noise

تعریف می‌کنیم و سپس یک الگوریتم با نام RA-F با مرتبه زمانی چند جمله‌ای $O(n^5)$ برای حل مسئله ارایه کرده‌ایم. دو ویژگی مهم این الگوریتم عبارتند از: ۱- تخصیص بهینه کانال به کاربران را، مطابق تعریف ۲-۳، تضمین می‌کند و یک جواب دقیق برای آن ارایه می‌کند. در صورتی که تعداد محدود الگوریتم‌های موجود برای حل این نوع مسئله مانند max-s و NFP به صورت حریصانه و تقریبی مسئله را حل می‌کنند و الگوریتم DRL نیز با کمک شبکه‌های عصبی یک جواب تقریبی برای مسئله ارایه می‌دهد. ۲- سریع‌ترین الگوریتم با جواب‌های دقیق است. هر چند الگوریتم DRL بعد از RA-F دقیق‌ترین جواب را ارایه می‌دهد ولی اگر زمان یادگیری شبکه عصبی و سپس اجرای آن را در نظر بگیریم، RA-F سریع‌تر است. الگوریتم NFP از بین این چهار الگوریتم زمان اجرای کمتری دارد ولی جواب‌های آن دقیق نیستند. دومین نوآوری تجزیه و تحلیل الگوریتم RA-F و اثبات درستی و هزینه اجرای آن در قضیه‌های ۴-۲ و ۴-۳ است. همچنین با اجرای شبیه‌سازی‌ها، عمل‌کرد الگوریتم به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است و کارایی آن با بهترین الگوریتم‌های موجود مقایسه شده است. با توجه به این که پاسخ‌های این الگوریتم‌ها دیگر دقیق نیستند، می‌توان گفت که RA-F با توجه به زمان اجرای مناسب و جواب دقیق، انتخاب بسیار مناسبی برای حل مسئله است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر، RA-F در افزایش کیفیت خدمات موفق بوده است زیرا نسبت به DRL به صورت میانگین ۱۴ درصد و نسبت به max-s حدود ۱۰۷ درصد و در نهایت نسبت به NFP حدود ۶۳ درصد در اختصاص کمینه نسبت انتقال، افزایش داشته است. همچنین، تعداد کاربرانی که الگوریتم RA-F نتوانسته است کمینه نسبت انتقال را برای تضمین کیفیت خدمات، تضمین کند به طور میانگین نسبت به الگوریتم max-s حدود ۶۷ و نسبت به الگوریتم DRL حدود ۱۹ درصد و نسبت به NFP حدود ۳۷ درصد کمتر

بوده است. در الگوریتم RA-F کاربران ۲۱ درصد بیشتر نسبت به DRL، اسلات دریافت کرده‌اند. این نسبت در مورد الگوریتم‌های NFP و max-s به ترتیب ۳۳ و ۱۲۳ درصد است. با توجه به این که هدف ما تخصیص منصفانه کانال است، می‌توان دید که الگوریتم پیشنهادی با بیشینه کردن کمترین نسبت اختصاصی، میانگین را نسبت به دو الگوریتم دیگر بالاتر نگه داشته است. این میانگین تا ۱۲ درصد نسبت به DRL، تا ۲۸ درصد نسبت به NFP و تا ۶۳ درصد نسبت به max-s بهتر است. کمترین زمان اجرا مربوط به الگوریتم‌های max-s و NFP است که ۸۰ درصد نسبت به حل مسئله زمان اجرای کمتری دارند. زمان اجرای DRL حدود ۴۷ درصد کاهش زمان اجرا ایجاد شده است.

در ادامه مقاله، در بخش دوم پیشینه کارهای انجام شده در زمینه تخصیص منصفانه پیشینه- کمینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم مسئله بر خلاف کارهای گذشته که فقط به افزایش گذرشی و کاهش انرژی مصرفی پرداخته‌اند، مسئله با هدف افزایش کمترین نسبت انتقال و با هدف تضمین کیفیت خدمات، فرمول‌بندی خواهد شد. در بخش چهارم الگوریتم کارای پیشنهادی خود را با نام RA-F برای حل مسئله ارایه خواهد شد. این الگوریتم مسئله را با روش تکراری حل خواهد کرد و جز محدود الگوریتم‌های تضمین‌کننده کیفیت خدمات در شبکه‌های بی‌سیم است. در بخش پنجم نشان خواهیم داد که الگوریتم RA-F نسبت به الگوریتم‌های موجود کارایی بالاتری دارد. در پایان در بخش ششم نتیجه‌گیری کار خود را ارایه خواهیم داد.

۲. پیشینه تحقیق

در بیشتر تحقیقات کنونی، ضمن توزیع عادلانه کانال‌ها، دو هدف مهم کاهش مصرفی انرژی و افزایش گذرشی شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. این دو، در تضاد با یکدیگر هستند، یعنی؛ کاهش مصرف انرژی منجر به کاهش گذرشی شبکه است و برعکس، افزایش گذرشی باعث افزایش مصرف انرژی خواهد شد. بنابراین در تحقیقات

مسئله در مقاله آن‌ها براساس نظریه بازی‌ها استوار است. جنومی و همکارانش [۱۹] با ارایه یک مدل تصادفی برای شبکه‌های با تعداد کاربران زیاد، مسئله تخصیص توان و طیف فرکانسی را بررسی کرده‌اند. در این مقاله تاثیر تداخل امواج در تخصیص عادلانه و کاهش کمینه نسبت انتقال کاربران بررسی شده است. بررسی تضمین کیفیت خدمات در این مقاله ها مورد توجه قرار نگرفته است.

مقاله‌های زیادی در زمینه تخصیص منصفانه متناسب پهنای باند در شبکه‌های بی‌سیم، به کاربران ارایه شده است [۲۰-۲۳]. ولی در زمینه تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه کانال مطالعات کمی وجود دارد. سه مقاله تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه کانال ارایه شده در مرجع‌های [۲۴ و ۱۰] و مقاله جدید [۲۵] مسئله تخصیص کانال با هدف کاهش توان مصرفی کاربران ارایه شده است. اما مسئله تضمین کیفیت خدمات در این سه مقاله مورد توجه قرار نگرفته است.

۳. مدل بندی مسئله تخصیص کانال

در این بخش مسئله تخصیص کانال به کاربران در یک شبکه با یک ایستگاه مخابراتی فرمول بندی می‌شود. در مدل در نظر گرفته شده، یک ایستگاه مخابراتی (BS) به کاربران حاضر در برد مخابراتی خود خدمات ارایه می‌دهد. تعداد N کاربر به صورت یکنواخت در برد مخابراتی این ایستگاه پراکنده هستند. بر اساس مدل SINR این ایستگاه می‌تواند با کاربر i که در فاصله d_i از ایستگاه قرار دارد با نسبت $r_i = b \times \log_r(1 + SINR_i)$ تبادل داده داشته باشد که در آن b پهنای باند ایستگاه است و $SINR_i$ نسبت سیگنال به نوفه و تداخل است که در مقاله [۱] معرفی شده است. برای زمان بندی، فرض بر این است که یک دوره زمانی $[0, T]$ به اسلات‌های زمانی کوچک (حدود ۲ میلی ثانیه) تقسیم می‌شوند که در هر اسلات یک کاربر می‌تواند داده‌های خود را ارسال و یا دریافت کند. در هر اسلات ایستگاه مخابراتی می‌تواند به یک کاربر خدمات ارایه دهد

برقراری یک تعادل بین این دو مورد بررسی قرار گرفته است [۷، ۳]. دو تعریف درباره انصاف در تخصیص کانال بیشتر به کار می‌رود؛ انصاف بیشینه-کمینه و انصاف متناسب. در روش منصفانه بیشینه-کمینه پهنای باند کانال به صورت منصفانه بین کاربران به گونه‌ای توزیع می‌شود که پهنای باند تخصیص داده شده به یک کاربر را نتوان بدون کاهش پهنای باند دیگر کاربران، افزایش داد [۲]. در توزیع منصفانه متناسب، نسبت سهم هر کاربر از پهنای باند بر اساس یک و یا چند پارامتر شبکه (مانند میزان ترافیک شبکه و نسبت داده) تعیین می‌شود [۴، ۳]. در این مدل بیشینه مقدار ممکن به مجموع لگاریتم پهنای باند تخصیص داده شده به کاربران، به دست می‌آید [۱۱]. تابع هدف در نسخه توزیع منصفانه متناسب، غیرخطی و نامحدب است و از این رو، نسبت به روش توزیع منصفانه بیشینه-کمینه، حل آن با چالش‌هایی روبه‌رو هستیم. در مرجع‌های مانند [۱۲، ۱۳، ۱۴] تابع هدف، بیشینه کردن مجموع نسبت انتقال کاربران است. این به معنی افزایش گزردهی شبکه است. مهمت و همکاران [۱۵] برای شبکه‌های SD-RAN که اولین بار در شبکه‌های نسل پنجم معرفی شدند، مقدار کمینه نسبت انتقال کاربران و همچنین گزردهی شبکه در ایستگاه‌های مخابراتی را تا ۴ برابر افزایش دادند. صالحی و همکاران [۱۶] در شبکه‌های براساس مدل NOMA با به‌کارگیری مشارکت کاربران با توان بالاتر، برای کمک به کاربران با سیگنال ضعیف‌تر، سعی کردند تخصیص منصفانه‌ای در جهت افزایش کمینه نسبت انتقال کاربران انجام دهند. داکال و همکاران [۱۷] برای شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر NOMA مسئله را برای مسئله تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه وزن دار فرمول بندی کردند و با توجه به محدب بودن فضای شدنی آن مسئله را به صورت تحلیلی حل کردند. کو و همکاران [۱۸] به جای تعریف یک تابع هدف یکسان برای همه کاربران، شمای کلی برای مسئله تعریف کردند که در آن برای هر کانال معیار مخصوص به آن کانال، برای منصفانه بودن تعریف کردند. روش حل

تعریف ۳-۱ فرض کنید ماتریس $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ را بتوان با جابه‌جا کردن سطرهای آن به ماتریس همانی تبدیل کرد. در این صورت این ماتریس در محدودیت‌های مسئله یعنی محدودیت ۳-۲ و ۳-۳ صدق می‌کند. بردار تخصیص شدنی متناظر با ماتریس A را با نماد $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ نمایش می‌دهیم که در آن $r_j = r_{ij}$ اگر $a_{ij} = 1$. در واقع هر r_j در این بردار نشان می‌دهد که در اسلات j کاربر i با مقدار نسبت انتقال r_{ij} فعال است. این بردار تخصیص را جواب شدنی مسئله می‌نامیم.

بردار تخصیص $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ را منصفانه بیشینه-کمینه گوئیم هرگاه افزایش مقدار r_i منجر به کاهش مقدار یکی از r_j ها در این بردار شود. در واقع اگر در این بردار کمترین مقدار r_i ها بیشینه شده باشد و افزایش نسبت انتقال هر اسلات به ناچار کاهش مقدار این نسبت در اسلات دیگر را منجر شود، می‌گوییم این بردار، به صورت منصفانه بیشینه-کمینه نسبت‌های انتقال را در اسلات‌ها تخصیص داده است. بنابراین توضیح‌ها می‌توان تعریف زیر را ارایه کرد.

تعریف ۳-۲ بردار $(r_1^*, r_2^*, \dots, r_n^*)$ تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه نسبت تبادل داده است اگر برای هر بردار تخصیص شدنی دیگر مانند $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ ، اگر برای برخی مقادیر $i = 1, 2, \dots, n$ رابطه $r_i^* < r_i$ برقرار باشد آن‌گاه $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ وجود داشته باشد به‌طوری‌که $r_j < r_j^*$ و اگر $r_{\min}^* = \min_{i=1,2,\dots,n} r_i^*$ و $r_{\min} = \min_{i=1,2,\dots,n} r_i$ آن‌گاه مقدار $r_{\min}^* \geq r_{\min}$ اگر برداری برای مسئله تخصیص، منصفانه بیشینه-کمینه باشد، آن را کارا می‌نامیم.

۴. الگوریتم پیشنهادی زمان‌بندی منصفانه برای

شبکه‌های بی سیم

در این بخش، الگوریتم زمان‌بندی فعالیت کاربران در شبکه ارایه خواهد شد. این زمان‌بندی، فعال شدن کاربران را به صورت منصفانه بیشینه-کمینه کارا، ارایه شده در

و بقیه کاربران باید تا شروع اسلات بعد غیرفعال بمانند. متغیر دودویی a_{ij} را برای تخصیص کانال در اسلات j به کاربر i تعریف می‌کنیم. $a_{ij} = 1$ یعنی کاربر i در اسلات j فعال است. مقدار a_{ij} برابر با صفر اگر در اسلات j کانال در اختیار کاربر i نباشد. متغیر r_{ij} مقدار نسبت انتقالی که ایستگاه می‌تواند در اسلات j در اختیار کاربر i قرار دهد را نشان می‌دهد. این مقادیر در ماتریس $R = [r_{ij}]_{(n \times n)}$ ذخیره می‌شود. در این مقاله، هدف ما توزیع منصفانه کانال‌های مخابراتی بین کاربران است به گونه‌ای که مقدار کمینه نسبت انتقال در اسلات‌ها، بیشینه شود. فرض بر این است که تعداد کاربران و تعداد اسلات‌ها برابر است و هر کاربر در هر دوره زمانی تنها یک‌بار می‌تواند فعال شود. بنابراین توضیحات بالا می‌توان این مسئله را به صورت زیر فرمول‌بندی کرد.

$$\max_j \min_i a_{ij} r_{ij} \quad (1-0-3)$$

به طوری که:

$$\sum_{j=1}^T a_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, N, \quad (2-0-3)$$

$$a_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (3-0-3)$$

تابع هدف این مسئله کمترین مقدار نسبت انتقال تخصیص داده شده به کاربران را بیشینه می‌کند. محدودیت اول نشان می‌دهد که هر کاربر فقط یک‌بار می‌تواند در دوره زمانی فعال باشد. در محدودیت دوم مسئله، متغیر دودویی a_{ij} نیز نشان می‌دهد که هر کاربر در هر اسلات یا فعال است و یا خاموش است. اگر تعداد اسلات‌ها بیشتر از کاربران باشد، یعنی $T > N$ آن‌گاه برای N اسلات اول مسئله حل می‌شود و برای باقی‌مانده اسلات‌ها دوباره برنامه‌ریزی خواهد شد. این تعریف و فرمول‌بندی از مسئله تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه کانال جز مسایل NP-Hard است [۲۶]. بنابراین تعیین جواب بر اساس این مدل‌بندی در زمان معقول امکان‌پذیر نیست. در ادامه یک تعریف دیگر از مسئله تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه کانال ارایه خواهد شد که در عمل نیز این تعریف برای حل مسئله مورد توجه است [۲۶، ۱۰].

با یک است و مقدار $a_{i_1 k}$ و $a_{i_2 l}$ برابر با صفر هستند که در گام‌های الگوریتم تنظیم شده‌اند. برای کاربر i_1 در اسلات‌های l و k مقدار نسبت انتقال داده به ترتیب $r_{i_1 l}$ و $r_{i_1 k}$ است. این مقادیر برای کاربر i_2 برابر است با $r_{i_2 k}$ و $r_{i_2 l}$. اگر بخواهیم مقدار نسبت انتقال داده را در اسلات‌های l و k جابه‌جا کنیم باید مقدار متغیرهای $a_{i_1 l}$ و $a_{i_2 k}$ را به صفر و مقدار $a_{i_1 k}$ و $a_{i_2 l}$ را به یک تغییر دهیم. در این صورت مقدار نسبت انتقال داده در اسلات l از مقدار $r_{i_1 l}$ به $r_{i_2 l}$ تغییر می‌کند و مقدار نسبت انتقال داده در اسلات k از مقدار $r_{i_2 k}$ به $r_{i_1 k}$ تغییر می‌کند. از فرض داریم که مقدار r_l قبل از مقدار r_k محاسبه شده است. از آنجایی که مقدار بیشینه ستون l برای a_l انتخاب می‌شود پس $r_{i_1 l} \leq r_{i_2 l}$. بنابراین $r_{i_2 l} \leq r_{i_1 l}$ و $r_{i_2 k} \leq r_{i_1 k}$ که نشان می‌دهد نسبت انتقال در اسلات k افزایش یافته است ولی این نسبت در اسلات l کاهش پیدا کرده است.

قضیه ۲-۴ الگوریتم RA-F جواب شدنی کارا برای مسئله تخصیص منصفانه نسبت انتقال به دست می‌آورد. اثبات. نخست باید نشان دهیم که ماتریس A به دست آمده از الگوریتم RA-F شدنی است. ابتدا ماتریس برابر با ماتریس صفر است. در گام‌های پنجم تا دهم الگوریتم وقتی که مقدار a_{ij} برابر با یک قرار می‌گیرد، همه درایه‌های سطر i و ستون j صفر می‌شود. بنابراین در تکرارهای بعدی گام‌های ۵ تا ۱۰، این سطر و ستون نادیده گرفته می‌شود و در تکرارهای بعدی درایه‌های این دو صفر باقی می‌مانند. بنابراین ماتریس A شدنی است.

اکنون باید نشان دهیم که جواب به دست آمده کارا است. نخست این که اگر ماتریس R_i وارون‌پذیر نباشد امکان ایجاد جواب شدنی وجود ندارد. در هر مرحله اگر R_i وارون‌پذیر نباشد مقادیرهای کوچک‌تر از M_i یعنی M_{i-1} را انتخاب می‌کنیم و ماتریس R_{i-1} را در نظر می‌گیریم. با توجه به گزینش بزرگ‌ترین M_i برای محاسبه ماتریس R_k می‌توان گفت که کوچک‌ترین مقدار نسبت انتقال ممکن برای تخصیص بیشینه شده است، زیرا انتخاب M_i بزرگ‌تر

تعریف ۲-۳، اریه می‌دهد. قبل از ارایه رسمی الگوریتم در الگوریتم ۱، نمادهای به کار رفته در آن را معرفی می‌کنیم. فرض کنید ماتریس وارون‌پذیر $R = [r_{ij}]_{n \times n}$ داده شده باشد. همچنین فرض کنید M_k ، k امین درایه بزرگ ماتریس R باشد، یعنی: $M_1 \geq M_2 \geq \dots \geq M_n$. حال ماتریس $R_k = [\hat{r}_{ij}]_{n \times n}$ را تعریف می‌کنیم که در آن اگر آن‌گاه $\hat{r}_{ij} = r_{ij}$ و در غیر این صورت $\hat{r}_{ij} = 0$ حال فرض کنید k کوچک‌ترین مقداری باشد که به ازای آن R_k وارون‌پذیر باشد.

برای حل مسئله، الگوریتم RA-F ارایه شده است. در این الگوریتم ابتدا تعداد درایه‌های ناصفر هر سطر و هر ستون ماتریس R_k شمارش می‌شود. سپس سطر i (و یا ستون j) به عنوان سطر (ستونی) با کمترین تعداد درایه ناصفر انتخاب می‌شود. در سطر i بیشترین مقدار نسبت انتقال را می‌یابیم. فرض کنید $\hat{r}_{i,j} = \max_{j \in R_k} \hat{r}_{i,j}$ که در آن $1 \leq j \leq n$. در این صورت در اسلات j_1 کاربر i, i با مقدار نسبت انتقال r_{i,j_1} فعال خواهد بود، یعنی؛ به ازای $j = 1, 2, \dots, n$ داریم $a_{i,j} = 1$ و $a_{i,j} = 0$. همچنین در ادامه ماتریس R_k به روز می‌شود یعنی قرار می‌دهیم $\hat{r}_{i,j} = 0$ و $\hat{r}_{i,j_1} = 0$ برای $i, j = 1, 2, \dots, n$. به همین ترتیب اگر ستون j کمترین تعداد درایه ناصفر R_k را داشته باشد و $i_1 = \max_{i \in R_k} \hat{r}_{i,j}$ که $1 \leq i \leq n$ آن‌گاه به ازای $i = 1, 2, \dots, n$ قرار می‌دهیم $a_{i,j} = 1$ و $a_{i,j} = 0$. همچنین در ادامه ماتریس R_k به روز می‌شود یعنی؛ $\hat{r}_{i,j} = 0$ و $\hat{r}_{i_1,j} = 0$ برای $i, j = 1, 2, \dots, n$.

لم ۱-۴ فرض کنید $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ بردار تخصیص ارایه شده توسط الگوریتم RA-F است و $r_l = r_{i_1 l}$ و $r_k = r_{i_2 k}$ در این صورت اگر در الگوریتم RA-F مقدار r_l قبل از مقدار r_k محاسبه شده باشد و $r_{i_1 k} \leq r_{i_2 k}$ و زمان بندی اسلات‌های l و k جابه‌جا شود، یعنی: $a_l = r_{i_1 k}$ و $a_k = r_{i_2 l}$ آن‌گاه نسبت انتقال در اسلات k افزایش یافته است ولی این نسبت در اسلات l کاهش پیدا کرده است.

اثبات. طبق فرض، مقدار متغیرهای $a_{i_1 l}$ و $a_{i_2 k}$ برابر

باعث می شود ماتریس R_i وارون ناپذیر شود و مسئله جواب نخواهد داشت. فرض کنیم جواب $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ متناظر با ماتریس R_k است. بنابراین تمام درایه های جواب r از M_k بیشتر هستند، یعنی؛ $r_i \geq M_k$. با توجه به خط ۵ الگوریتم RA-F می توان گفت که اگر r_1 اولین مقداری باشد که در جواب r مقدار آن محاسبه شده باشد، آن گاه بیشترین مقدار ممکن توسط الگوریتم انتخاب می شود. پس امکان افزایش r_1 وجود ندارد. فرض کنید $r_1 = \hat{r}_{i_1}$ اولین درایه ای از r نباشد که مقدار آن تعیین شده است و C_1 ستون مربوط مربوط به آن در ماتریس R_k باشد. فرض کنید سطر i_2 این ستون مقداری بیشتر از r_1 داشته باشد.

علت عدم انتخاب این مقدار برای اسلات i این است که این مقدار در مراحل قبلی که اسلاتی مانند k بررسی می شد، مقدار $\hat{r}_{i_1}$ به صفر بروزرسانی شده است. بنابراین مقدار r_k قبل از r_1 محاسبه شده است و $r_{i_1 k} \leq r_k$. طبق لم ۴-۱ افزایش r_1 موجب کاهش r_k می شود. بنابراین طبق تعریف ۳-۲ بردار تخصیص تولید شده توسط الگوریتم RA-F کارا است.

با توجه به توضیح های بالا می توان گفت که پاسخ تعیین شده توسط الگوریتم، یک جواب منصفانه بیشینه کمینه است.

الگوریتم ۱ الگوریتم RA-F: تخصیص کانال بیشینه-کمینه منصفانه برای یک ایستگاه مخابراتی

ورودی: ماتریس نسبت انتقال $R = [r_{ij}]_{n \times n}$

خروجی: ماتریس زمانبندی $A = [a_{ij}]_{n \times n}$

۱: ماتریس R_{k0} را محاسبه کن و مقدار همه a_{ij} ها را صفر قرار بدهید؛

۲: تا زمانی که تا زمانی که ماتریس R_{k0} دارای درایه ناصفر است

۳: برای هر ستون j ماتریس R_{k0} (که قبلاً بررسی نشده است) که مقدار Col_j که برابر با تعداد درایه های غیر صفر این ستون است را محاسبه کن؛

۴: برای هر سطر i ماتریس R_{k0} که مقدار Row_i (که قبلاً بررسی نشده است) که برابر با تعداد درایه های غیر صفر این سطر است را محاسبه کن؛

۵: فرض کنید $i_0 = \arg \min_{1 \leq i \leq n} Row_i$ و $j_0 = \arg \min_{1 \leq j \leq n} Col_j$ ؛

۶: اگر $Col_{j_0} < Row_{i_0}$ آنگاه

۷: برای $i_1 = \arg \max_{1 \leq i \leq n} \hat{r}_{i j_0}$ قرار بدهید $a_{i_1 j_0} = 1$ و درایه های سطر i_1 و ستون j_0 ماتریس R_{k0} را صفر قرار دهید؛

۸: وگرنه

۹: برای $j_1 = \arg \max_{1 \leq j \leq n} \hat{r}_{i_0 j}$ قرار دهید $a_{i_0 j_1} = 1$ و همه درایه های سطر i_0 و ستون j_1 ماتریس R_{k0} را صفر کنید؛

۱۰: پایان شرط

۱۱: پایان حلقه

۱۲: ماتریس A را برگردان؛

الگوریتم ۱: تخصیص کانال بیشینه-کمینه منصفانه برای یک ایستگاه مخابراتی

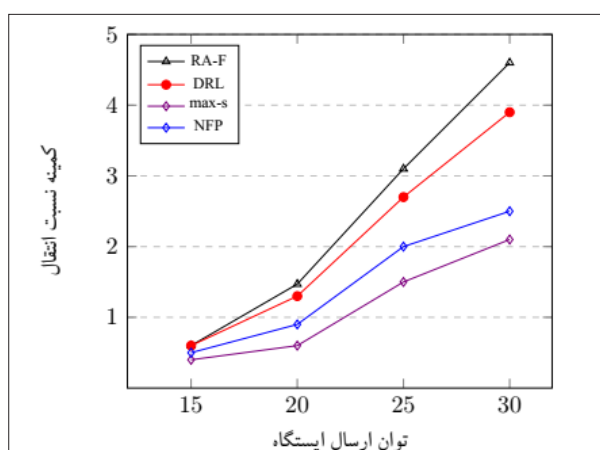
k باید معکوس پذیر بودن ماتریس های M_k برای مقدارهای k از یک تا n^2 بررسی شود که در زمان $O(n^5)$ اجرا می شود. حلقه سطر ۲ در الگوریتم ۱، n بار اجرا می شود؛ زیرا در هر اجرای این حلقه، در گام های ۷ و ۸، درایه های یک سطر و ستون ماتریس صفر می شود. بنابراین حداکثر پس از n بار همه درایه های ماتریس صفر خواهند شد. هزینه اجرای هر کدام از گام های ۳ تا ۹ متناسب با n است.

قضیه ۳-۴ الگوریتم RA-F جواب مسئله تخصیص منصفانه میزان انتقال داده را در زمان $O(n^5)$ به دست می آورد.

اثبات. برای محاسبه R_k لازم است ابتدا درایه های ماتریس R را به صورت نزولی مرتب کنیم که می تواند با اجرای الگوریتم «مرتب سازی سریع» در زمان $O(n^2 \log n)$ اجرا شود. سپس برای به دست آوردن مقدار

دومین الگوریتم، الگوریتم max-SINR UA که به اختصار آن را با max-s نمایش می‌دهیم) است که در آن کانال به کاربری اختصاص می‌یابد که بیشترین مقدار توان را داشته باشد [۲، ۲۵]. همچنین الگوریتم NFP را در مد SISO که در آن فقط یک ایستگاه مخابراتی تعریف شده است را در نظر می‌گیریم [۱۰]. فرستنده و گیرنده شبکه هر دو تک آنتن هستند. پارامترهای مورد نظر برای مقایسه عبارتند از: کمینه نسبت انتقال تضمینی برای کاربران، میزان در دسترس بودن کاربران شبکه است.

شکل ۱ نمودار میانگین کمترین میزان نسبت انتقالی تخصیص داده شده به کاربران خودرویی شبکه را نمایش می‌دهد. در واقع همه ۵۰۰ اسلات به ۱۰ دوره که هر کدام دارای ۵۰ اسلات است تقسیم شده‌اند. میانگین کمترین نسبت انتقال در این ۱۰ دوره در جدول نمایش داده شده است.



شکل ۱: نمودار میانگین کمترین میزان نسبت انتقالی تخصیص داده شده به کاربران.

داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش توان انتشار ایستگاه مخابراتی، مقدار توان اختصاص یافته به کاربران نیز افزایش می‌یابد. نسبت به سه الگوریتم دیگر، الگوریتم پیشنهادی بیشترین نسبت را برای کاربران تعیین کرده است. در الگوریتم max-s در هر اسلات کانال، به کاربر با بیشترین مقدار SINR تخصیص داده می‌شود. بنابراین در هر دوره ممکن است کاربران امکان ارسال داده نداشته باشند. این باعث کاهش میانگین نسبت انتقال اختصاصی

بنابراین گام ۲ در زمان n^2 اجرا می‌شود. پس به طور خلاصه می‌توان گفت که الگوریتم RA-F در زمان $O(n^5)$ اجرا خواهد شد.

۵. بررسی عمل کرد الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، کارایی الگوریتم RA-F مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور یک شبکه از خودروهای در حال حرکت در یک بزرگراه در نظر می‌گیریم که در یک نقطه از آن یک آنتن BTS به عنوان ایستگاه مخابراتی به کاربران خودرویی خدمات ارایه می‌کند. حداکثر توان مصرفی ایستگاه متغیر است و کاربران از حداکثر توان ۴۰ dBm است. خودروها با سرعت حداکثر ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در این بزرگراه در حال حرکت هستند. طول مسیر ۱۰ کیلومتر است که به صورت یک خط راست از نقطه $z=0$ تا نقطه $z=10000$ در نظر گرفته می‌شود. فاصله ایستگاه تا مسیر ۱۰۰ متر است و نزدیک‌ترین نقطه مسیر به ایستگاه در $z=5000$ است. نسبت انتقال داده در طول مسیر و در فاصله z از ایستگاه از رابطه ۱-۵ محاسبه می‌شود.

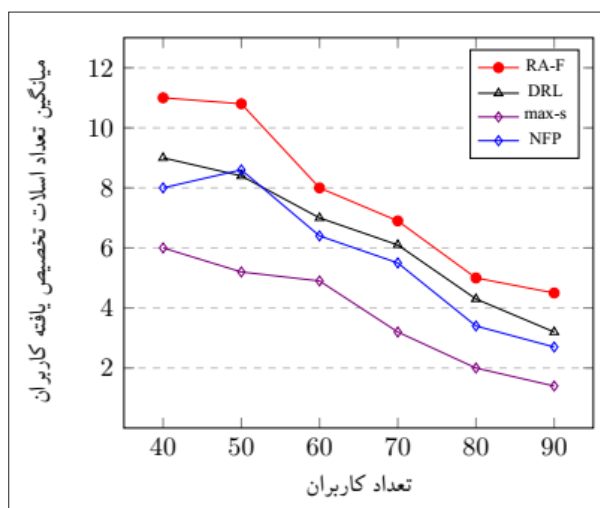
$$r(z) = \eta(1 + \kappa \exp(\frac{|z-5000|}{\sigma})), \quad (1-5)$$

که در آن κ یک عدد حقیقی مثبت است و η یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت است که مقدار آن در بازه بین ۰/۵ و ۱/۴ است. فاصله کاربران از ایستگاه از رابطه $z(t) = \sqrt{(5000 - v * t / 3600)^2 + 100^2}$ به دست می‌آید. بازه زمانی در نظر گرفته شده از صفر تا T برابر با ۵۰۰ اسلات است. تعداد کاربران برابر با ۵۰ است.

برای مقایسه عملکرد الگوریتم تخصیص، سه الگوریتم در نظر می‌گیریم. اولین الگوریتم، الگوریتم DRT-MMF UARA scheme [۲۵] (که به اختصار آن را با DRL نمایش می‌دهیم) است که تازه‌ترین الگوریتم برای حل مسئله تخصیص کانال ارایه شده و دارای بهترین عملکرد است.

در اختیار کاربران قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد. الگوریتم RA-F نسبت به سه الگوریتم DRL و NFP و max-s به ترتیب تا ۲۱ درصد و ۵۱ درصد و ۲۰۳ درصد عملکرد بهتری داشته است. الگوریتم پیشنهادی و DRL و NFP سعی در تخصیص منصفانه نسبت انتقال داده دارند ولی الگوریتم max-s صرفاً به دنبال افزایش گذردهی شبکه است. بنابراین در max-s تعداد زیادی از کاربران امکان ارسال به‌دست نیاورده‌اند. نمودار شکل ۳ نشان می‌دهد که در الگوریتم RA-F کاربران ۲۱ درصد بیشتر نسبت به DRL اسلات دریافت کرده‌اند. این نسبت در مورد الگوریتم‌های NFP و max-s به ترتیب ۳۳ و ۱۲۳ درصد است.

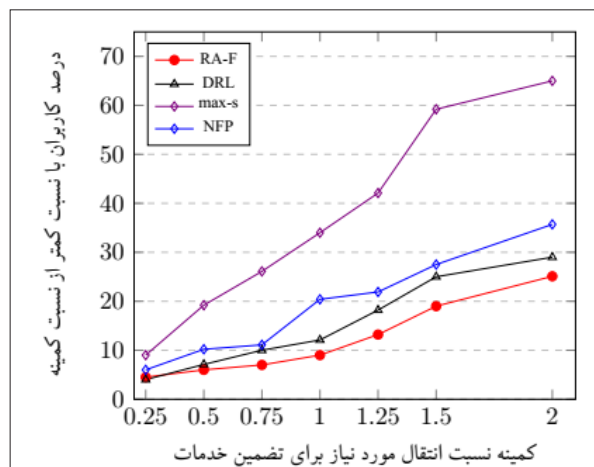
میانگین میزان نسبت انتقال داده‌ای که در اختیار آن‌ها قرار گرفته است، در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این که تنها یک ایستگاه برای ارایه خدمات وجود دارد، با افزایش تعداد کاربران میانگین نسبت داده کاربران کاهش می‌یابد. با توجه به این که هدف ما تخصیص منصفانه کانال است، می‌توان دید که الگوریتم پیشنهادی با بیشینه کردن کمترین نسبت اختصاصی، میانگین را نسبت به دو الگوریتم دیگر بالاتر نگه داشته است. این میانگین تا ۱۲ درصد نسبت به DRL، تا ۲۸ درصد نسبت به NFP و تا ۶۳ درصد نسبت به max-s بهتر است.



شکل ۳: میانگین تعداد اسلات‌های تخصیص یافته به کاربران. توان ارسالی ایستگاه 40dBm است.

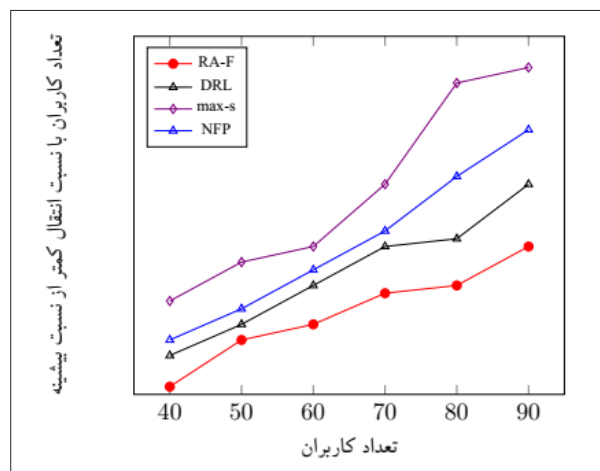
کاربران می‌شود. در الگوریتم DRL با توجه به فرایند Relaxation و تعیین جواب با کمک شبکه‌های عصبی برای حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص کانال، جواب مسئله نسبت به جواب بهینه، به صورت تقریبی تعیین می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که RA-F نسبت به DRL به صورت میانگین ۱۴ درصد و نسبت به max-s حدود ۱۰۷ درصد و در نهایت نسبت به NFP حدود ۶۳ درصد در اختصاص کمینه نسبت انتقال، افزایش داشته است. این افزایش منجر به افزایش کیفیت خدمات در ایستگاه خواهد بود.

در شکل ۲ درصد تعداد کاربرانی را نشان می‌دهد که ایستگاه موفق به تامین کمینه نسبت انتقال لازم برای تضمین کیفیت خدمات نشده است. با افزایش توان ایستگاه مخابراتی میزان عدم موفقیت ایستگاه نیز افزایش می‌یابد. دلیل آن این است که تعداد کاربرانی که امکان دریافت خدمات از ایستگاه را دارند، افزایش می‌یابد. نتیجه‌های عددی نشان می‌دهد که تعداد کاربرانی که الگوریتم RA-F نتوانسته کمینه نسبت انتقال را برای تضمین کیفیت خدمات، تضمین کند به طور میانگین نسبت به الگوریتم max-s حدود ۶۷ و نسبت به الگوریتم DRL حدود ۱۹ درصد و نسبت به NFP حدود ۳۷ درصد کمتر بوده است.

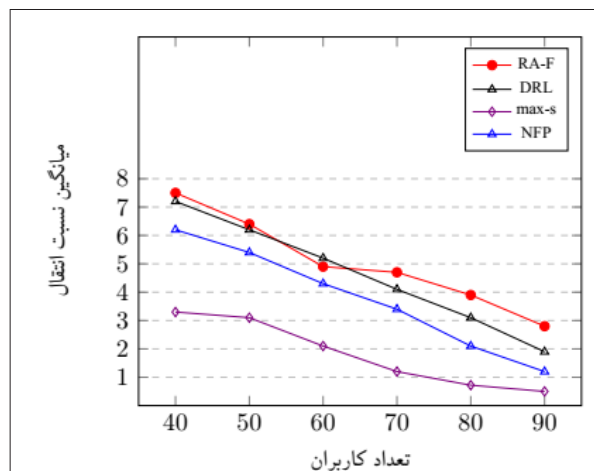


شکل ۲: کاربرانی که کمینه نسبت انتقال لازم برای تضمین کیفیت خدمات برای آن‌ها تامین نشده است.

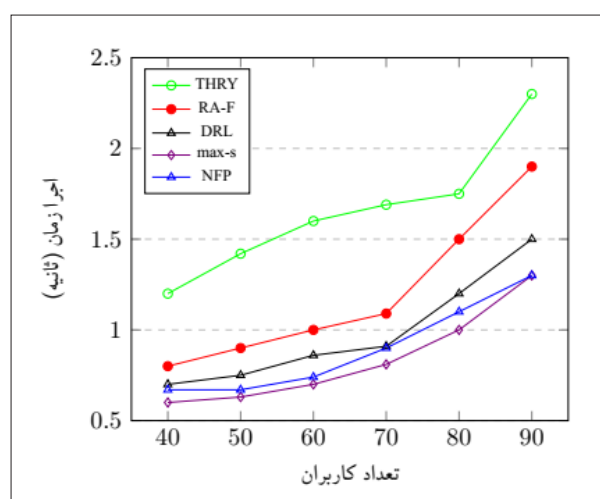
با افزایش تعداد کاربران، متوسط تعداد اسلات‌هایی که



شکل ۵: تعداد کاربرانی که در الگوریتم‌های RA-F، DRL، NFP و max-s مقدار کمتری نسبت انتقال در مقایسه با مقدار بهینه دریافت کرده‌اند.



شکل ۴: میانگین نسبت انتقال تخصیص یافته به کاربران. توان ارسالی ایستگاه 40 dBm است.



شکل ۶: زمان اجرای الگوریتم‌ها بر حسب ثانیه. زمان اجرای حل رابطه‌های (۱-۳) تا (۳-۳) با کمک ابزارهای نرم‌افزار متلب با نماد THRY نشان داده شده است.

بیشترین زمان اجرا از آن حل مسئله در رابطه‌های (۱-۳) تا (۳-۳) است که با ابزارهای متلب حل شده است. زمان اجرای الگوریتم RA-F تا ۳۹ درصد نسبت به زمان مورد نیاز حل مسئله ۱-۳ کمتر است. سه الگوریتم دیگر زمان کمتری نسبت به RA-F صرف می‌کنند. کمترین زمان اجرا مربوط به الگوریتم‌های max-s و NFP است که ۸۰ درصد نسبت به حل مسئله در متلب، زمان اجرای کمتری دارند. زمان اجرای DRL حدود ۴۷ درصد کاهش داشته شده است. نکته قابل توجه این است که حل مسئله

در شکل ۵ عمل‌کرد الگوریتم‌ها نسبت به جواب بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. فرض کنیم بردار $(r_1^*, r_2^*, \dots, r_n^*)$ جواب بهینه تخصیص منصفانه بیشینه-کمینه و $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ بردار تولید شده توسط الگوریتم‌ها باشند. فقط الگوریتم RA-F بیشینه کمینه نسبت انتقال را تضمین می‌کند. در هر چهار الگوریتم ممکن است برای برخی کاربران بیشترین نسبت ممکن برای همه کاربران را تخصیص ندهند. برای مقایسه، در بردار $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ تعداد کاربرانی که بیشترین نسبت انتقال ممکن در مقایسه با جواب بهینه را دریافت نکرده‌اند را شمارش می‌کنیم. شکل ۵، تعداد این کاربران را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که در الگوریتم RA-F به طور میانگین حدود ۲۹ درصد کاربران و در الگوریتم‌های DRL، NFP و max-s به ترتیب ۴۱، ۴۸ و ۵۱ درصد از کاربران کمتر از مقدار بهینه نسبت انتقال تخصیص داده شده است.

در شکل ۶ زمان اجرای الگوریتم‌ها مقایسه شده است. اجراها روی یک لپ‌تاپ با مشخصات Core i7 3 GHz CPU، 8GB RAM و Matlab R2014a اجرا شده‌اند. در این اجرا، حداکثر توان مصرفی ایستگاه ۱۰۰ dBm است. هر مقدار در شکل، میانگین ۳۰ بار زمان اجرا است.

Automatic Control Engineering, INSA de Toulouse, 2020.

[3] T. T. N. Nguyen, O. Brun, B. J. Prabhu, Using channel predictions for improved proportional-fair utility for vehicular users, *Computer Networks*, 208 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108872>.

[4] S. Biswas, A. Mitra, S. Mishra, T. Roy Chowdhury, S. Sinha, A. Biswas, FairIN: Throughput Fairness in Infrastructure-Based Wireless Access Networks, 2020 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN), Pondicherry, India, (2020) 1-6.

[5] F. Kelly, Charging and Rate Control for Elastic Traffic, *European Transactions on Telecommunications*, 8 (1997). 33-38.

[6] V. K. N. Lau, Proportional fair space time scheduling for wireless communications, *IEEE Transactions on Communications*, 53 (2005) 1353-1360.

[7] J. Choi, Power allocation for max-sum rate and max-min rate proportional fairness in NOMA. *IEEE Commun. Lett.*, 20 (2016) 2055-2058.

[8] H. F. Lu, Optimal sum rate-fairness tradeoff for MIMO downlink communications employing successive zero forcing dirty paper coding, *IEEE Communication Lett.*, 25 (2021) 783-787.

[9] Y. T. Cheng, H. F. Lu, Optimal sum rate-fairness tradeoff for MISO broadcast communication using zero forcing DPC, In *Proc. IEEE 90th Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, Honolulu, HI, USA, (2019) 1-5.

[10] W. Liu, R. Sun and Z. -Q. Luo, Globally Optimal Joint Uplink Base Station Association and Beamforming, *IEEE Transactions on Communications*, 67 (2019) 6456-6467, doi: 10.1109/TCOMM.2019.2914448.

[11] J. Jang, H. J. Yang, H. K. Jwa, Resource allocation and power control in cooperative small cell networks with backhaul constraint, *IEEE Transaction. Veh. Technol.*, 68 (2019) 10926-10942.

[12] A. Alwarafy, B. S. Ciftler, M. Abdallah, M. Hamdi, Deep-RAT: A DRL-based framework for multi-RAT assignment and power allocation in HetNets, in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops*, (2021) 1-6.

[13] X. Zhang, Z. Zhang, L. Yang, Learning-based resource allocation in heterogeneous ultra-se network, *IEEE Internet Things J.*, 9 (2022) 20229-20242.

[14] Z. Li, X. Wen, Z. Lu, W. Jing, A general DRL-based optimization framework of user association and power control for HetNet, in *Proc. IEEE 32nd Annu. Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Com.*, (2021) 1141-1147.

[15] F. Mehmeti, W. Keller, Max-min Fair Resource Allocation in SD-RAN, *Q2SWinet 22: Proceedings of the 18th ACM International Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks*, (2022) 27-35.

[16] F. Salehi, N. Naaser, M. H. Majidi, H. Ahmadi, Cooperative NOMA-Based User Pairing for URLLC: A Max-Min Fairness Approach, *IEEE Systems Journal*, 16 (2022) 3833 - 3843.

[17] D. Raj, D. Zhenni, P. S. Shimamoto, Resource Allocation for Weighted Max-min Fairness in NOMA with Imperfect SIC,

۳-۱۰۰ وقتی تعداد کاربران زیاد باشد بسیار زمان بر است. مثلاً براساس آزمایش‌های انجام شده، وقتی تعداد کاربران بیشتر از ۵۰۰ بشود زمان اجرا بیشتر از ۳۰ ثانیه است که برای شبکه‌های بی‌سیم که چینش و آرایش کاربران مدام در حال تغییر است قابل قبول نیست. با توجه به این که پاسخ‌های این الگوریتم‌ها دقیق نیستند، می‌توان گفت که RA-F با توجه به زمان اجرای مناسب و جواب دقیق، انتخاب بسیار مناسبی برای حل مسئله است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله تخصیص کانال و نسبت انتقال به کاربران خدمات یک ایستگاه مخابراتی مورد بررسی قرار گرفت. هدف ما فرمول‌بندی مسئله و حل آن به گونه‌ای بود که کیفیت خدمات در ایستگاه تضمین شود. برای این منظور بیشینه کردن کمترین نسبت انتقال در هر دوره زمانی به کاربران، مورد توجه قرار گرفت. یک الگوریتم تخصیص منصفانه کانال با نام RA-F ارایه کردیم و به صورت تحلیلی نشان دادیم که به درستی می‌تواند مسئله را حل کند. نتایج عددی نشان داد که نسبت به بهترین الگوریتم‌های موجود یعنی الگوریتم‌های DRL و NFP، عملکرد بهتری دارد. به عنوان مثال در تخصیص منصفانه کانال تا ۱۴ درصد نسبت به DRL و تا ۶۳ درصد نسبت به NFP، و در تخصیص تعداد کانال به کاربران تا ۲۱ و ۳۳ درصد نسبت به DRL و NFP بهبود عمل کرد را نشان می‌دهد. در مقایسه با جواب بهینه متناظر با تعریف ۲-۳، حدود ۷۰ درصد از کاربران می‌توانند نسبت انتقال بهینه را دریافت کنند. این در حالی است که این مقدار بقیه الگوریتم‌های مقایسه شده در این مقاله کمتر از ۶۰ درصد است.

مراجع

- [1] O. Abuajwa, M. Bin Roslee, Z. Binti Yusoff, L. C. Lee, W. L., Pang, Throughput fairness trade-offs for downlink non-orthogonal multiple access systems in 5G networks, *Heliyon*, 8 (2022) e11265.
- [2] T. T. N. Nguyen, Proportional-Fair Scheduling of Mobile Users based on a Partial View of Future Channel Conditions,

- IEEE SICE International Symposium on System Integration (SII), 2022.
- [18] S. K. Chen, H. Cheng, S. Hon, W. C. Liao, General Max-Min Fair Allocation, COCOON Lecture Notes in Computer Science, Springer 2021. [https://doi: 10.1007/978-3-030-89543-3_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89543-3_6)
- [19] M. H. Jeronymo, T. Abrao, Max-Min fairness-based resource allocation in massive MIMO systems, *Semina: Ciencias Exatas E Tecnológicas*, 43 (2022) 45–54.
- [20] R. Jiao, L. Dai, On the max-min fairness of beam-space MIMONOMA, *IEEE Trans. Signal Process.*, 68 (2020) 4919-4932.
- [21] M. M. Naghsh, M. Masjedi, A. Adibi, P. Stoica, Max-min fairness design for MIMO interference channels: A minorization-maximization Approach, *IEEE Trans. Signal Process.*, 67 (2019) 4707-4719.
- [22] R. Sun, M. Hong, Z. Luo, Joint downlink base station association and power control for max-min fairness: Computation and complexity. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 33 (2015) 1040-1054.
- [23] F. Luo and Y. Mao, A Practical Max-Min Fair Resource Allocation Algorithm for Rate-Splitting Multiple Access, *IEEE Communications Letters*, 27 (2023) 3285-3289. doi: 10.1109/LCOMM.2023.3329149.
- [24] W. Liu, R. Sun, Z. Q. Luo, Globally optimal joint uplink base station association and beamforming, *IEEE Trans. Commun.*, 67 (2019) 6456–6467.
- [25] Y. Kim, J. Jang, Distributed Resource Allocation and User Association for Max-Min Fairness in HetNets, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 73 (2024) 2983-2988.
- [26] U. U. Khan, N. Dilshad, M. H. Rehmani, Tariq Umer, Fairness in Cognitive Radio Networks: Models, measurement methods, applications, and future research directions, *Journal of Network and Computer Applications*, V. 73, (2016), 12-26.