

انتخاب ایستگاه پایه در شبکه‌های دو-رده‌ای فمتوسل با رویکردی مبتنی بر نظریه بازی

آزاده پورکبیریان^۱، مهدی دهقان تخت فولادی^{۲*}، اسماعیل زینالی^۳، امیر مسعود رحمانی^۱

^(۱) گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^(۲) استاد دپارتمان مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^(۳) استادیار دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

چکیده

تخصیص منابع همواره یکی از چالش‌های اساسی در طراحی شبکه‌های بی‌سیم سلولی بوده است. تخصیص مناسب منابع شبکه که به بیانی دقیق‌تر شامل انتخاب ایستگاه پایه مناسب و تخصیص پهنای باند کافی برای کاربران می‌باشد، نقش مؤثری در کاهش تداخل، تأمین انتظارات و تضمین الزامات کیفیت سرویس کاربر ایفا می‌کند. در این مقاله، رویکردی مبتنی بر چارچوب ریاضی نظریه بازی برای حل مسأله انتخاب ایستگاه پایه در ارتباطات فرو-سو شبکه‌های بی‌سیم دو-رده‌ای فمتوسل ارائه می‌شود. در رویکرد پیشنهادی، رفتار رقابتی کاربران شبکه برای در اختیار گرفتن منابع مورد نیاز به شکل یک بازی تکاملی فرمول‌بندی می‌شود. ما همچنین در رویکرد پیشنهادی، احتمال انتخاب یک ایستگاه پایه، محاسبه بار سلولی هر ایستگاه پایه و تجزیه و تحلیل احتمال رد تقاضای کاربر از طرف ایستگاه پایه را محاسبه می‌کنیم. رویکرد پیشنهادی ضمن بیشینه‌سازی نرخ گذردهی شبکه، الزامات کیفیت سرویس کاربران شبکه را نیز تأمین می‌کند. در نهایت، یک الگوریتم غیر متمرکز یادگیر مبتنی بر یادگیری EXP3 برای همگرایی مسأله به تعادل تکاملی به عنوان پاسخ بازی ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نیازهای کیفیت سرویس کاربران شبکه را تأمین می‌کند و عملکرد مطلوب را به دست می‌آورد. **واژه‌های کلیدی:** شبکه‌های بی‌سیم دو-رده‌ای فمتوسل، تخصیص منابع، کیفیت سرویس، نظریه بازی تکاملی، الگوریتم یادگیری EXP3، تعادل تکاملی.

۱. مقدمه

شبکه سلولی متصل کنند. ایستگاه‌های پایه فمتو در طیف فرکانسی مجاز سرویس‌دهندگان سلولی عمل می‌کنند و جزیره‌های با ظرفیت بیشتر را برای سیستم‌های سلولی فراهم می‌کنند. علیرغم مزایای متعدد، فمتوسل‌ها برخی چالش‌های اساسی را نیز به شبکه تحمیل می‌کنند که از آن جمله می‌توان به تخصیص منابع در این شبکه‌ها اشاره کرد. از دیدگاه فنی، تخصیص منابع در شبکه‌های دو-رده‌ای فمتوسل را می‌توان به شکل انتخاب ایستگاه پایه و تخصیص طیف فرکانسی به کاربران با در نظر گرفتن قیود محدودیت توان و حداقل نرخ داده مورد نیاز کاربران در نظر گرفت. انتخاب ایستگاه پایه مناسب برای هر کاربر، با توجه به منابع محدود فرکانسی و استفاده اشتراکی از طیف فرکانسی موجود، از مسائل پراهمیت در شبکه‌های بی‌سیم دو-رده‌ای فمتوسل می‌باشد. با انتخاب ایستگاه پایه مناسب توسط هر کاربر، حجم ترافیک ایستگاه پایه ماکرو کاهش یافته و ترافیک شبکه سلولی به سوی سلول‌های فمتو توزیع می‌شود. این توزیع ترافیک، باعث توازن بار^۵ در شبکه و جلوگیری از بروز ازدحام^۶ و در نتیجه افزایش بازدهی شبکه می‌شود. کاربران بی‌سیم سلولی با نیازهای کیفیت سرویس مختلف همواره در جستجوی ایستگاه پایه‌ای مناسب برای دستیابی به کیفیت سرویس مورد نظر خود می‌باشند. در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی به منظور حل مسأله انتخاب ایستگاه پایه در شبکه‌های بی‌سیم دو-رده‌ای فمتوسل ارائه شده است [۸]-[۵] که هر یک حامیان و منتقدین خود را دارند. به طور کلی روش‌های تخصیص منابع به دو دسته کلی متمرکز و توزیع شده تقسیم می‌شوند. در روش‌های متمرکز [۹] و [۱۰] یک کنترل کننده مرکزی، وظیفه اختصاص منابع به کاربران را برعهده دارد. این شکل

امروزه گسترش روز افزون ارتباطات و نیاز کاربران برای دسترسی به نرخ‌های انتقال بالا در شبکه‌های بی‌سیم سلولی، بیش از پیش استفاده از این شبکه‌ها را همگانی کرده است و روزانه بر تعداد کاربران و درخواست‌های آنها از شبکه افزوده می‌شود. در حدود دو سوم از کاربران بی‌سیم در محیط‌های درون ساختمانی همچون محیط‌های خانگی و اداری قرار دارند [۱] و انتظار می‌رود که این مقدار در سال‌های آینده نیز بیشتر شود. با این وجود، ایستگاه‌های پایه ماکرو دارای پوشش ضعیفی در محیط‌های داخلی می‌باشند و اغلب توانایی ارائه سرویس‌هایی با کیفیت بالا، در محدوده داخلی ساختمان‌ها را ندارد. بنابراین لازم است که ظرفیت و پوشش‌دهی در محیط‌های داخلی، به منظور تامین نرخ انتقال داده بیشتر و ارائه سرویس‌های با کیفیت بالاتر، بهبود یابد. از جمله قابلیت‌هایی که یک شبکه سلولی دارد و موجب توسعه و گسترش استفاده از این شبکه‌ها می‌شود، تقسیم‌بندی سلول‌ها به سلول‌های کوچکتر و استفاده مجدد از فرکانس^۲ می‌باشد [۴]-[۲]. به کمک این دو قابلیت، می‌توان ناحیه پوشش‌دهی شبکه را توسعه داد و با افزایش ظرفیت شبکه، تعداد درخواست بیشتری را پاسخ داد. فمتوسل‌ها^۳ راهکاری اقتصادی جهت افزایش ظرفیت و پوشش‌دهی شبکه‌های بی‌سیم سلولی هستند. یک شبکه بی‌سیم دو-رده‌ای فمتوسل متشکل از ایستگاه‌های پایه ماکرو و تعدادی ایستگاه پایه فمتو^۴ می‌باشد. ایستگاه‌های پایه فمتو معروف به ایستگاه‌های پایه خانگی، به عنوان نقاط دسترسی شبکه سلولی عمل میکنند تا کاربران متحرک بی‌سیم را با استفاده از خطوط DSL خانگی، اتصالات پهن باند کابلی یا فیبرهای نوری به اپراتور

² Frequency Reused

³ Femtocells

⁴ Femto base station

⁵ Load balancing

⁶ Congestion

یکسان توان انتقال بر روی همه زیرحامل‌ها (از جمله بر روی زیرحامل‌هایی که استفاده نمی‌شوند)، باعث عدم استفاده بهینه از منابع شبکه می‌شود. نویسندگان در [۱۷]، یک روش تخصیص توان با در نظر گرفتن احتمال بروز تداخل را ارائه داده‌اند و سپس روش پیشنهادی خود را به وسیله یک زنجیره مارکف دو-حالت^{۱۰} مدل کرده‌اند. هدف روش ارائه شده، طرح یک الگوریتم تخصیص بهینه توان در حوزه فرکانس-زمان به منظور حداکثر کردن نرخ انتقال کاربر فمتو می‌باشد. نویسندگان مدل زنجیره مارکف دو-حالت^{۱۱} پیشنهادی خود را با استفاده از الگوریتم Water-filling پیاده‌سازی کرده‌اند. سپس سناریوی پیشنهادی خود را به حالتی که در آن چندین کاربر حضور دارند، توسعه داده‌اند و آن چندین کاربر را به کمک فرمول‌بندی نظریه بازی مدل کرده‌اند. سپس در مدل نظریه بازی، تعادل نش را به عنوان پاسخ بازی ارائه داده‌اند و در نهایت الگوریتمی جهت اثبات همگرایی بازی به تعادل نش طراحی کرده‌اند. در [۱۸]، مسأله بیشینه‌سازی مقدار مجموع نرخ داده کاربران در تخصیص منابع، به شکل یک مسأله بهینه‌سازی محدب^{۱۱} مدل‌سازی و با استفاده از رویکرد تجزیه دوگانه^{۱۲} حل شده است. یک روش تخصیص منابع با تطبیق نرخ داده^{۱۳}، برای کاربر فمتو در [۱۹] پیشنهاد شده است؛ سپس، برای دسترسی به ایستگاه‌های پایه فمتو، راهبرد دسترسی ترکیبی در نظر گرفته شده است تا جهت بهبود عملکرد شبکه، در مواقعی، کاربران ماکرو بتوانند از سرویس‌های ایستگاه‌های پایه فمتو مجاور خود، بهره بگیرند. نویسندگان در مرجع [۲۰]، رویکردی جهت تخصیص منابع و جلوگیری از تداخل برای شبکه‌های فمتوسل مبتنی بر تکنولوژی دسترسی چندگانه به روش تقسیم فرکانسی

متمرکز، باعث افزایش بار ترافیکی بر روی کنترل‌کننده مرکزی، ایجاد گلوگاه^۷ و کاهش کارایی شبکه می‌شود. در مقابل، روش‌های توزیع شده به علت داشتن مزایایی از قبیل کاهش بار محاسباتی در ایستگاه پایه و کاهش سربار ارتباطی میان ایستگاه پایه و کاربران بیشتر مورد توجه طراحان شبکه قرار می‌گیرند. نویسندگان در مرجع [۱۱]، مسأله تخصیص منابع را به شکل دو زیر-مسأله بررسی کرده‌اند؛ در زیر-مسأله اول، به هر کاربر با توجه به مقدار سیگنال به نوبت مورد نیاز، زیرحامل‌هایی اختصاص داده می‌شود، سپس به کمک یک الگوریتم حریصانه، مقدار توان بر روی زیرحامل‌ها تنظیم می‌شود. مرجع [۱۲]، در تخصیص زیرحامل‌ها به کاربر، مشابه مرجع [۱۱] عمل می‌کند، اما جهت تنظیم توان انتقال بر روی زیرحامل‌ها مسأله را به شکل یک بازی غیر-همکارانه^۸ فرمول‌بندی می‌کند. در [۱۳]-[۱۵]، نویسندگان به جای تلاش برای دستیابی به حداکثر ظرفیت کانال، تأمین نیازهای کیفیت سرویس را به عنوان هدف در تخصیص منابع دنبال کرده‌اند، ضمن آنکه با کاهش توان انتقال بر روی کانال، احتمال بروز تداخل را کاهش می‌دهند. در [۱۶]، مسأله تخصیص منابع در انتقالات فرو-سو برای شبکه‌های بی‌سیم فمتوسل مورد بررسی قرار گرفته است. به بیان دقیق‌تر، نویسندگان مسأله انتخاب ایستگاه پایه را با هدف بیشینه‌سازی رضایتمندی کاربر (در جهت افزایش مجموع نرخ انتقال داده) مورد بررسی قرار داده‌اند. مسأله با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی صحیح^۹ فرمول‌بندی می‌شود. در روش مذکور، تلاش بر آن است که از زیرحامل‌های بلااستفاده، جهت تخصیص به کاربران فمتوسل استفاده شود تا تداخلی برای کاربران ماکرو ایجاد نشود. با این حال، تنظیم مقدار

¹⁰ Two state Markov chain

¹¹ Convex optimization problem

¹² Double decomposition

¹³ Adapting data rate

⁷ Bottleneck

⁸ Non-cooperative game

⁹ Integer linear programming

ارسال، کنترل توان و کنترل تداخل استفاده شده است. در مرجع [۲۵]، نویسندگان، مسأله انتخاب نقطه دسترسی^{۱۶} در شبکه را، به کمک یک بازی غیرهمکارانه مدل کرده‌اند. در این مسأله، هدف انتخاب نقطه دسترسی با کمترین ازدحام، برای کاربران متحرک در شبکه می‌باشد، با فرض آنکه هر کاربر ممکن است چندین انتخاب برای دسترسی داشته باشد. مجموعه نقاط دسترسی قابل دسترس برای هر کاربر، به عنوان مجموعه راهبردهای آن کاربر تعریف شده است. نویسندگان با بررسی و تحلیل تعادل نش برای این بازی نشان داده‌اند که پایداری^{۱۷} سیستم به هنگام ورود و خروج همزمان کاربران بالا است. نویسندگان در [۲۶]، سناریو پیشنهادی در [۲۵]، را به حالتی که در آن چندین اپراتور وجود دارد، توسعه داده‌اند. سپس یک تابع مجموع وزن دار^{۱۸}، بر حسب میزان بار موجود در نقاط دسترسی، قیمت و فاصله‌ای که کاربر از نقطه دسترسی دارد، تعریف کرده‌اند و به کمک آن میزان بهره اکتسابی بازیکنان را محاسبه کرده‌اند. نویسندگان وجود تعادل نش در مدل بازی خود را اثبات کرده‌اند و نشان داده‌اند که روش پیشنهادی آنها به تعادل نش همگرا می‌شود. در مراجع [۳۰-۲۷] مجموعه کارهایی به منظور انتخاب شبکه مناسب برای کاربران بی‌سیم، به شکل بازی‌های غیرهمکارانه حراج^{۱۹} مطرح شده است. در مدل‌های پیشنهادی، سه عامل اصلی در بازی در نظر گرفته شده است: فروشندگان^{۲۰}، خریداران^{۲۱} و یک دلال^{۲۲}. نویسندگان، کاربران بی‌سیم را به عنوان خریداران، اپراتورهای شبکه را به عنوان فروشندگان و پهنای‌باند موجود در شبکه را به عنوان کالا، در نظر

متعامد^{۱۴} ارائه کرده‌اند؛ به طوریکه با طرح یک الگوریتم حریصانه، امکان خود-سازماندهی^{۱۵} را برای فمتوسل‌ها فراهم کرده‌اند. در [۲۱] و [۲۲] نویسندگان چارچوبی جهت انتخاب ایستگاه پایه و حل مشکل تداخل میان-رده در شبکه‌های فمتوسل مبتنی بر تکنولوژی دسترسی چندگانه به روش تقسیم فرکانسی متعامد ارائه داده‌اند. در روش ارائه شده، مسأله به شکل یک مسأله غیرخطی مدل شده است و برای حل آن در زمان چندجمله‌ای، از الگوریتم‌های تقریب خطی استفاده شده است. به‌رحال، راهکارهای ارائه شده فوق، متکی بر رویکردهای بهینه‌سازی غیرپویا هستند [۲۳] و [۲۴]. در این نوع مسائل، فرآیند رقابتی تخصیص منابع مدل‌سازی نمی‌شود. مسأله انتخاب ایستگاه پایه و تخصیص کانال یک مسأله تصمیم‌گیری استراتژیک می‌باشد که در آن کاربران شبکه با منافع متضاد بر سر منابع شبکه با یکدیگر رقابت می‌کنند؛ به گونه‌ای که تصمیمات هر کاربر بر تصمیم‌گیری سایرین تأثیرگذار است. رویکردهای بهینه‌سازی قادر به توصیف و مدل‌سازی این ویژگی رقابتی نمی‌باشند. ما در این مقاله رویکردی مبتنی بر چارچوب ریاضی نظریه بازی، به منظور فرمول‌بندی مسأله تصمیم‌گیری استراتژیک چند عامله تخصیص ایستگاه پایه ارائه می‌دهیم. چارچوب ریاضی نظریه بازی راهکاری به مراتب واقع‌بینانه‌تر برای مدل‌سازی مسأله تصمیم‌گیری استراتژیک انتخاب ایستگاه پایه می‌باشد، چرا که این چارچوب توانایی فرمول‌بندی شرایط استراتژیک را دارد. نظریه بازی در فرمول بندی مسائل مهم و مطرح گوناگونی از شبکه‌های سلولی مانند مدیریت دسترسی به کانال، کنترل نرخ

¹⁶ Access point selection

¹⁷ Stability

¹⁸ Weighted-sum function

¹⁹ Non-cooperative auction game

²⁰ Sellers

²¹ Buyers (Bidders)

²² Auctioneer

¹⁴ Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

¹⁵ Self-organization

الگوریتم یادگیری Q نشان داده‌اند که بازی به تعادل تکاملی همگرا می‌شود. بهرحال در روش‌های مذکور، هیچ راهبردی جهت تأمین الزامات کیفیت سرویس کاربران ارائه نشده است.

در این مقاله ما سه هدف عمده بیشینه‌سازی مجموع نرخ گذردهی شبکه، کاهش سطح تداخل و تضمین نیازهای کیفیت سرویس کاربران شبکه را در مسأله انتخاب ایستگاه پایه در ارتباطات فرو-سو یک شبکه فمتوسل دنبال می‌کنیم. بنابر آنچه بیان شد و با توجه به ماهیت مسأله، به طراحی و ارائه رویکردی غیرمتمرکز و پویا مبتنی بر نظریه بازی‌ها خواهیم پرداخت که با حداقل فرض اطلاعاتی و در چارچوب عقلانیت محدود^{۲۶} قادر به محاسبه راهبردهای بهینه^{۲۷} کاربران در فرآیند تصمیم‌گیری می‌باشد. در کنار آن، همگرایی به تعادل تکاملی به عنوان پاسخ بازی نیز با استفاده از طراحی و توسعه الگوریتم یادگیری بر مبنای الگوریتم یادگیری EXP3 انجام می‌شود. به کمک این الگوریتم، می‌توان امکان تطبیق رفتار کاربرها نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به محیط عملیاتی را با حداقل فرض اطلاعاتی محاسبه نمود به طوری که در نهایت بتوان به یک نقطه پایدار^{۲۸} رسید که در آن اعمال^{۲۹} انتخابی هر کاربر یک پاسخ بهینه به محیط و عمل سایرین می‌باشد. این مقاله در ادامه به شرح زیر سازمان‌دهی شده است:

در ادامه مقاله در بخش دوم رویکرد پیشنهادی، بر مبنای نظریه بازی تکاملی برای حل مسأله انتخاب ایستگاه پایه ارائه می‌شود؛ سپس الگوریتم یادگیری بر مبنای الگوریتم EXP3 به منظور یادگیری راهبردهای بهینه و تعادلی بازیکنان در بازی در بخش سوم مطرح می‌شود. فصل چهارم به تجزیه و تحلیل داده‌ها و بررسی نتایج شبیه‌سازی اختصاص

می‌گیرند. کالای حراج شده، به خریداری اعطا می‌شود که بهترین پیشنهاد^{۲۳} قیمت را ارائه کرده باشد. یکی از مسائل و مشکلات مطرح در بازی‌های حراج، مسأله تبانی^{۲۴} خریداران می‌باشد که در نهایت باعث شکست حراج می‌شود. رویکردهای فوق هیچ مکانیزی به منظور پیگیری و بررسی احتمال بروز این مسأله، ارائه نداده‌اند. یک رویکرد تخصیص منابع در [۳۱] مطرح شده است که نویسندگان در آن مسأله را به شکل یک بازی همکارانه چانه‌زنی^{۲۵}، فرمولبندی کرده‌اند. در بازی چانه‌زنی این احتمال وجود دارد که یکی از بازیکنان نسبت به دیگری اطلاعات بیشتری در اختیار داشته باشد. اثر این اطلاعات نامتقارن، شکست چانه‌زنی و یا توافق بعد از تحمل هزینه بیشتر است. نظریه بازی کلاسیک، فرض بسیار قوی راجع به میزان عقلانیت بازیکنان در نظر می‌گیرد که این خود مستلزم برخورداری از توانایی‌های پردازشی و ذخیره‌سازی بالا است. چنین فرض‌هایی معمولاً قادر به توصیف رفتار در مسائل دنیای واقعی نیستند و در نظر گرفتن آنها در مورد تجهیزات کاربر در شبکه‌های بی‌سیم سلولی واقع‌بینانه نمی‌باشد. از آنجائیکه در نظریه بازی تکاملی فرض به مراتب ضعیفتری در زمینه عقلانیت بازیکنان در نظر گرفته می‌شود، این امید وجود دارد که این بازی بتواند در توصیف و پیش‌بینی رفتار بازیکنان در حیطه مسائل دنیای واقعی موفقیت بیشتری کسب کند. از طرفی، نظریه بازی تکاملی، با ارائه مفهوم تعادل تکاملی، راه حل مناسب‌تری برای مسائلی با چند نقطه تعادل نش را فراهم می‌کند. نویسندگان در [۳۲] و [۳۳]، راهبردی مبتنی بر نظریه بازی تکاملی برای حل مسأله انتخاب سلول در شبکه‌های دو-رده‌ای فمتوسل ارائه کرده‌اند. نویسندگان با بکارگیری

²⁶ Bounded rationality

²⁷ Optimal strategies

²⁸ Stable point

²⁹ Actions

²³ Best bid

²⁴ Collusion

²⁵ Bargaining game

تأمین نیازهای کیفیت سرویس آن می‌باشد. در مسأله انتخاب ایستگاه پایه، هر کاربر در تلاش است تا ایستگاه پایه‌ای را انتخاب کند که بیشترین نرخ انتقال داده را برای آن فراهم کند. برای کاربر i که ایستگاه پایه j را انتخاب می‌کند، نرخ انتقال داده قابل حصول، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{ij} = \sum_{s=1}^S b_{i,m,s}^j C_{i,m,s}^j \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $b_{i,m,s}^j$ یک متغیر باینری است که مقدار $b_{i,m,s}^j = 1$ نشان‌دهنده تخصیص زیرکانال s از ایستگاه پایه j به کاربر i می‌باشد و مقدار $b_{i,m,s}^j = 0$ به معنای آزاد بودن زیرکانال^{۳۰} مذکور می‌باشد؛ $C_{i,m,s}^j$ ظرفیت زیرکانال^{۳۱} s از ایستگاه پایه j می‌باشد که به کاربر i اختصاص داده شده است و مقدار آن براساس نظریه شانون-هارتلی^{۳۲}، مطابق با رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

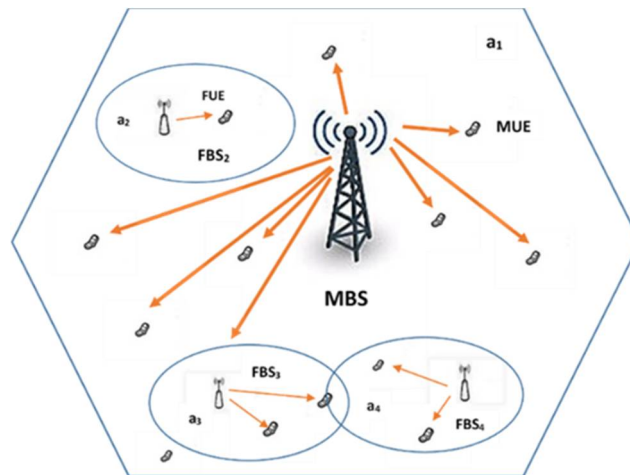
$$C_{i,m,s}^j = W_s \log_2(1 + SINR_{i,m,s}^j) \quad (2)$$

دارد. در پایان، در فصل پنجم به جمع‌بندی مطالب و ارائه نتایج خواهیم پرداخت.

۲. روش پیشنهادی

سناریوی پیشنهادی ما در این بخش، شامل یک سلول ماکرو مجهز به یک ایستگاه پایه ماکرو و چندین ایستگاه پایه فمتو می‌باشد (شکل ۱). به منظور کاهش تداخل درون-رده و میان-رده در شبکه، مدل فیزیکی کانال ارتباطی بیسیم را بر مبنای تکنولوژی دسترسی چندگانه با روش تقسیم فرکانس متعامد در نظر می‌گیریم. بر اساس این تکنولوژی، زیرکانال‌ها کوچکترین واحد انتقال در نظر گرفته می‌شوند که به هر کاربر اختصاص داده می‌شوند.

به منظور جلوگیری از بروز تداخل فرض می‌کنیم در هر زمان، هر زیرکانال، تنها به یک کاربر اختصاص می‌یابد. تعداد زیرکانال‌های تخصیص داده شده به هر کاربر متناسب با نرخ انتقال مورد نیاز کاربر جهت



FUE: Femto User Equipment, MUE: Macro User Equipment

شکل ۱- نمای کلی از سناریوی پیشنهادی

³⁰ Idle sub-channel

³¹ Capacity of sub-channel

³² Shannon-Hartley theorem

در رابطه فوق $d_{i,j}$ ، مقدار تأخیری است که داده متعلق به کاربر i در ایستگاه پایه j تجربه می‌کند و D_{max} حداکثر تأخیر قابل تحمل برای ترافیک کاربر i را مشخص می‌کند. بنابراین، مسأله تصمیم‌گیری استراتژیک تخصیص ایستگاه پایه مناسب به کاربران شبکه، با هدف بیشینه سازی نرخ گذردهی شبکه و در کنار قید تضمین نیازهای کیفیت سرویس را می‌توان به صورت رابطه زیر تعریف نمود.

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^N U_i \quad (5)$$

$$\text{S.t: } C_1: d_{i,j} < D_{max} \quad \forall i \in \theta_D$$

$$C_2: \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \{BS\}} \sum_{s \in \{S\}} b_{i,j,s} \leq N_s$$

$$C_3: \sum_{i=1}^N b_{i,j,s} = 1$$

$$C_4: b_{i,j,s} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, s$$

$$C_5: \sum_{j \in \{BS\}} X_{i,j} \leq 1, \quad i \in N$$

قید اول (C_1) بیانگر آن است که ضرب العجل «ترافیک حساس به تأخیر» به عنوان نیاز «کیفیت سرویس» برای کاربر i ، در طول فرآیند انتخاب ایستگاه پایه تضمین می‌شود. دومین قید (C_2)، بر این موضوع تأکید می‌کند که مجموع زیر حامل‌های اختصاص داده شده به هر ایستگاه پایه باید کوچکتر یا مساوی با تعداد کل زیر حامل‌ها باشد. سومین و چهارمین قید (C_3) و (C_4)، تأکید می‌کنند که هر زیرکانال در هر بازه زمانی مشخص، تنها به یک کاربر اختصاص می‌یابد؛ این امر موجب جلوگیری از بروز تداخل درون-رده می‌شود. در نهایت پنجمین قید (C_5)، بیان می‌کند که هر کاربر در هر لحظه، تنها می‌تواند به یک ایستگاه پایه متصل شود.

۳. فرمول‌بندی مسأله انتخاب ایستگاه پایه بر پایه نظریه بازی تکاملی

در این بخش، مسأله را به شکل «بازی تکاملی»

در رابطه فوق، W_s ، نمایانگر پهنای باند زیرکانال s می‌باشد به طوریکه $W_s = \frac{W}{N_s}$ ؛ که در آن W پهنای باند شبکه و N_s تعداد کل زیرکانال‌ها می‌باشد و $SINR_{i,m,s}^j$ ، معرف نسبت سیگنال به نویز دریافتی کاربر i ، بر روی زیرکانال s از ایستگاه پایه m در رده j می‌باشد که مقدار آن را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$SINR_{i,m,s}^j = \frac{P_{i,m,s}^j L_{mi}^{-\alpha_j} B_m^j}{\sigma_l + \sigma_n^2} \quad (3)$$

در رابطه فوق، $P_{i,m,s}^j$ به توان انتقال دریافتی کاربر i از ایستگاه پایه m در رده j بر روی زیرکانال s اشاره می‌کند؛ $L_{mi}^{-\alpha_j}$ نمایانگر میزان تضعیف بر روی زیرکانال s ، میان کاربر i و ایستگاه پایه m می‌باشد، B_m^j بیانگر ضریب بایس^{۳۳} ایستگاه پایه m در رده j می‌باشد به طوریکه ($B_m^j > 0$ for $j = 1, 2, \dots, J$)، $\sigma_l = \sum_{j=1}^J \sum_{l \in BS, l \neq m} (P_{l,i}^j L_{li}^{-\alpha_j} B_l^j)$ ، $(1, 2, \dots, J)$ بیانگر مجموع میزان تداخل ایجاد شده برای کاربر i ، ناشی از ارسال سایر ایستگاه‌های پایه ($l \in BS$) بر روی زیر کانال s می‌باشد و σ_n^2 ، نمایانگر توان نویز سفید می‌باشد. برای سادگی، در این رساله فرض می‌شود که تمام ایستگاه‌های پایه در رده j دارای توان انتقال یکسانی ($\{P_m^j\}_{m=1, \dots, M} = P^j$) هستند یعنی ($SINR_m^j = SINR^j$). با توجه به این که تأخیر^{۳۴}، یکی از پارامترهای اصلی «کیفیت سرویس» در جریان‌های ترافیکی^{۳۵} شبکه و متمایز کننده جریان‌های مختلف از همدیگر می‌باشد، در این مقاله پارامتر تأخیر به عنوان معیار کیفیت سرویس در نظر گرفته می‌شود بنابراین هر بسته باید در طی زمان مشخصی به گیرنده تحویل داده شود (رابطه ۴).

$$Pr\{d_{i,j} > D_{max}\} \leq \varepsilon \quad (4)$$

³³ Bias factor

³⁴ Delay

³⁵ Traffic flows

بازیکن i ، از ایستگاه پایه انتخابی خود (BS_m^j) می‌باشد.

از طرفی در رابطه (۶)، $\check{C}_i(\sigma_I(s_i, s_{-i}))$ ، نمایانگر تابع هزینه می‌باشد که برابر است با مجموع توان تداخل ناشی از سایر ایستگاه‌های پایه و به صورت رابطه (۸) قابل توصیف می‌باشد.

$$\check{C}_i(\sigma_I(s_i, s_{-i})) = \sigma_I = \sum_{j=1}^J \sum_{I \in BS, I \neq k} (P_{I,S}^j L_{II}^{-\alpha_j} B_I^j) \quad (۸)$$

در بازی تکاملی، بهره یک بازیکن در چارچوب جمعیتی که به آن تعلق دارد، ارزیابی می‌شود. به بیان دقیق‌تر، هر بازیکن راهبردی را انتخاب می‌کند و پس از آن بهره دریافتی حاصل از انتخاب راهبرد خود را مشاهده می‌کند، اگر بهره دریافتی بازیکن کمتر از متوسط بهره دریافتی جمعیتی که بازیکن به آن تعلق دارد، باشد؛ بازیکن راهبرد انتخابی خود را تغییر می‌دهد. به طور کلی متوسط بهره جمعیت را با استفاده از رابطه (۹) می‌توان محاسبه نمود.

$$\bar{v}^a(t) = \sum_{s_{-i} \in \delta(s_i)} y_{s_{-i}}^a(t) v_{s_{-i}}^a(t) \quad (۹)$$

در حالت کلی، سهم بازیکنانی که در لحظه t ، در جمعیت a ، راهبرد s_i را انتخاب کرده‌اند برابر است با:

$$y_i^a(t) = \frac{n(s_i)}{Z^a} \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، $y_i^a(t)$ ، فرکانس انتخاب s_i در جمعیت a تعریف می‌شود و سهم جمعیت را تعیین می‌کند، $n(s_i)$ نمایانگر تعداد بازیکنانی است که راهبرد s_i را انتخاب می‌کنند و Z^a اندازه جمعیت a را نشان می‌دهد به طوریکه $N = \sum_{a \in A} Z^a$ بنابراین وضعیت جمعیت در لحظه t به صورت زیر قابل نمایش است:

$$Y^a(t) = \{y_1^a, y_2^a, \dots, y_k^a\}, a \in A \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i=1, a \in A}^S y_i^a(t) = 1$$

به این ترتیب، مقدار بهره حاصل از انتخاب

توصیف می‌کنیم. در مدل پیشنهادی ما، کاربران بیسیم شبکه به عنوان بازیکنان بازی و مجموعه ایستگاه‌های پایه در دسترس برای هر کاربر به عنوان مجموعه راهبردهای آن

$$S_i = \{BS_1^j, BS_2^j, \dots, BS_M^j\}_{j=1}^J \quad \forall i \in N$$

در نظر گرفته می‌شوند. فرض می‌شود، هر بازیکن با احتمال q راهبرد s_i را انتخاب می‌کند، بنابراین مجموعه راهبرد مختلط بازیکن i به صورت یک بردار احتمالی برابر خواهد بود با

$$\delta(S_i) = \sum_{s_i \in S_i} q(s_i) s_i = \{q_1(BS_1^j), q_2(BS_2^j), \dots, q_K(BS_M^j)\}_{j=1}^J.$$

یک بازی تکاملی می‌تواند دارای یک یا چندین جمعیت باشد که هر جمعیت در برگیرنده گروهی از بازیکنان بازی می‌باشد. در مدل پیشنهادی، مجموعه‌ای از کاربران که در یک منطقه پوشش‌دهی یکسان قرار دارند و متعلق به یک کلاس ترافیکی مشابه هستند، تشکیل یک جمعیت را می‌دهند. هر کاربر i ، از مجموعه راهبردهای خود، یک راهبرد s_i را انتخاب می‌کند؛ در واقع یکی از ایستگاه‌های پایه در دسترس خود را انتخاب می‌کند (BS_m^j) . سپس بهره حاصل از راهبرد انتخابی خود را طبق رابطه (۶) محاسبه می‌کند.

$$v^a(s_i, s_{-i}) = U_i(P_i(s_i, s_{-i})) - \check{C}_i(\sigma_I(s_i, s_{-i})) \quad (۶)$$

در رابطه فوق $v^a(s_i, s_{-i})$ ، بیانگر تابع بهره پیشبینی شده برای بازیکن i ، در ازای انتخاب راهبرد s_i می‌باشد؛ $U_i(P_i(s_i, s_{-i}))$ نمایانگر تابع سود آنی بازیکن i ، می‌باشد که از طریق رابطه (۷) قابل محاسبه است.

$$U_i(P_i(s_i, s_{-i})) = P_{i,m}^j l_{mi}^{-\alpha_j} B_m^j \quad (۷)$$

در رابطه فوق $P_i(s_i, s_{-i})$ ، معرف توان دریافتی

بازی تکرار می‌شود و در طول تکرار بازی، بازیکنان ایستگاه‌های پایه بهتر را شناسایی و انتخاب می‌کنند؛ با این عمل سهم راهبردهای بهتر (راهبردهایی که بهره بالاتری را تولید می‌کنند) در جمعیت افزایش می‌یابد.

در نظریه بازی تکاملی دو مفهوم اساسی تعریف می‌شود: پویایی‌های تکرارکننده و تعادل تکاملی. پویایی‌های تکرارکننده، در حقیقت، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل معمولی میباشند که فرآیند تکامل^{۳۶} در جمعیت را در طول زمان توصیف میکنند (فرکانس نسبی راهبردهای موفق‌تر با گذشت زمان در جمعیت افزایش می‌یابد). به بیان دقیق‌تر، پویایی‌های تکرارکننده، تکامل جمعیت در جهت راهبردهای بهینه را توصیف می‌کند و نرخ تغییر هر راهبرد^{۳۷} را مشخص می‌کند. بر اساس مرجع [۳۴] پویایی‌های تکرارکننده را می‌توان به صورت رابطه زیر توصیف کرد.

$$\dot{y}_i = \rho [y_i(v(s_i, Y) - \bar{v}(Y))] \quad (17)$$

در رابطه فوق ρ ، ضریب معادله می‌باشد؛ y_i ، به سهم بازیکنانی که راهبرد s_i را انتخاب کرده‌اند، اشاره می‌کند؛ $v(s_i, Y)$ ، بیانگر بهره دریافتی بازیکن، حاصل از انتخاب راهبرد s_i می‌باشد و $\bar{v}(Y)$ ، نمایانگر متوسط بهره دریافتی جمعیت می‌باشد. هم اکنون می‌توان برای سناریوی پیشنهادی، پویایی‌های تکرار کننده را به صورت روابط (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} \dot{y}_{MBS}^2 &= \rho (y_{MBS}^2) [v_{MBS}^2 - \bar{v}^2] = \\ &\rho (y_{MBS}^2 - (y_{MBS}^2)^2) (v_{MBS}^2 - \\ &v_{FBS_2}^2) \end{aligned} \quad (18)$$

و

$$\begin{aligned} \dot{y}_{FBS_4}^{3, UU} &= \rho (y_{FBS_4}^{3, UU}) [v_{FBS_4}^{3, UU} - \bar{v}^{3, UU}] = \\ &\rho y_{FBS_4}^{3, UU} (v_{FBS_4}^{3, UU} - y_{FBS_4}^{3, UU} v_{FBS_4}^{3, UU} - \end{aligned}$$

ایستگاه‌های پایه مختلف برای بازیکنان بازی در نواحی مختلف پوششدهی در سناریوی پیشنهادی، به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$v_{MBS, s}^1 = U(P_{MBS, s}^1) - \check{C}_{MBS, s}^1(\sigma_I) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $v_{MBS, s}^1$ ، بهره دریافتی کاربر در ناحیه پوششدهی a_1 را نشان می‌دهد؛ که ایستگاه پایه MBS را جهت اتصال به شبکه انتخاب کرده است. همچنین، تعداد کل کاربرانی که ایستگاه پایه MBS را جهت اتصال به شبکه انتخاب کرده‌اند (n_{MBS})، با استفاده از رابطه (۱۳) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\begin{aligned} n_{MBS} &= N^1 y_{MBS}^1 + N^2 y_{MBS}^2 + \\ &N^3 y_{MBS}^{3, UU} + N^3 y_{MBS}^{3, LU} + N^4 y_{MBS}^{4, UU} + \\ &N^4 y_{MBS}^{4, LU} \end{aligned} \quad (13)$$

در این حالت، وضعیت جمعیت در قالب رکورد زیر قابل توصیف است.

$$Y = \{y_{MBS}^1, y_{MBS}^2, y_{MBS}^{3, UU}, y_{MBS}^{3, LU}, y_{MBS}^{4, UU}, y_{MBS}^{4, LU}\} \quad (14)$$

به طوریکه در رابطه (۱۴)، متغیر Y ، بیانگر سهم کاربران در کل نواحی پوششدهی می‌باشد. بر اساس فرمول‌بندی ارائه شده، همچنین می‌توان مقدار بهره کاربرانی، که ایستگاه پایه FBS_3 را جهت اتصال به شبکه انتخاب کرده‌اند، را نیز محاسبه کرد.

$$v_{FBS_3, s}^3 = U(P_{FBS_3, s}^3) - \check{C}_{FBS_3, s}^3(\sigma_I) \quad (15)$$

و

$$\begin{aligned} n_{FBS_3} &= N^3 y_{FBS_3}^{3, UU} + N^3 y_{FBS_3}^{3, LU} + \\ &N^4 y_{FBS_3}^{4, UU} + N^4 y_{FBS_3}^{4, LU} \end{aligned} \quad (16)$$

همچنین بر اساس فرمول‌بندی ارائه شده، می‌توان به طریق مشابه مقادیر $v_{FBS_2, s}^2$ و $v_{FBS_4, s}^4$ را محاسبه نمود.

³⁶ Evolution process

³⁷ Rate of strategy change

قضیه ۲. برای هر ناحیه پوشش‌دهی با دو ایستگاه پایه، تعادل تکاملی داخلی^{۳۸} حاصل از بازی پیشنهادی پایدار است.

اثبات. تعادل تکاملی داخلی پایدار است اگر همه عناصر متناظر با پویایی‌های تکرارکننده در ماتریس ژاکوبین، مقادیری منفی داشته باشند. به طور مثال برای ناحیه پوشش‌دهی a_1 با دو ایستگاه پایه BS_1 و BS_2 ، پویایی‌های تکرارکننده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{y}_{BS_1}^{a_1} &= \rho [y_{BS_1}^{a_1} (v(BS_1, Y) - \bar{v}(Y))] = \\ \rho y_{BS_1}^{a_1} (v_{BS_1}^{a_1} - y_{BS_1}^{a_1} v_{BS_1}^{a_1} - y_{BS_2}^{a_1} v_{BS_2}^{a_1}) &= \\ \rho y_{BS_1}^{a_1} (v_{BS_1}^{a_1} (1 - y_{BS_1}^{a_1}) - y_{BS_2}^{a_1} v_{BS_2}^{a_1}) \end{aligned} \quad (24)$$

با توجه به رابطه $y_{BS_1}^{a_1} + y_{BS_2}^{a_1} = 1$ می‌توان عبارت زیر را محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \rho y_{BS_1}^{a_1} (v_{BS_1}^{a_1} (1 - y_{BS_1}^{a_1}) - y_{BS_2}^{a_1} v_{BS_2}^{a_1}) &= \\ \rho y_{BS_1}^{a_1} y_{BS_2}^{a_1} (v_{BS_1}^{a_1} - v_{BS_2}^{a_1}) &= \\ \rho y_{BS_1}^{a_1} (1 - y_{BS_1}^{a_1}) (v_{BS_1}^{a_1} - v_{BS_2}^{a_1}) \end{aligned} \quad (25)$$

به منظور محاسبه مقادیر عناصر ماتریس ژاکوبین، عبارت محاسباتی زیر را محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \frac{df}{dy_{BS_1}^{a_1}} &= y_{BS_1}^{a_1} (1 - y_{BS_1}^{a_1}) \times \\ &\left(\frac{dv_{BS_1}^{a_1}}{dy_{BS_1}^{a_1}} - \frac{dv_{BS_2}^{a_1}}{dy_{BS_1}^{a_1}} \right) + (v_{BS_1}^{a_1} - v_{BS_2}^{a_1}) (1 - \\ 2y_{BS_1}^{a_1}) &= y_{BS_1}^{a_1} (1 - y_{BS_1}^{a_1}) \times \\ &\left(\frac{dv_{BS_1}^{a_1}}{dy_{BS_1}^{a_1}} - \frac{dv_{BS_2}^{a_1}}{dy_{BS_1}^{a_1}} \right) + (v_{BS_1}^{a_1} - \\ v_{BS_2}^{a_1}) (y_{BS_2}^{a_1} - y_{BS_1}^{a_1}) \end{aligned} \quad (26)$$

مشخص است که نقطه $v_{BS_1}^{a_1} = v_{BS_2}^{a_1}$ یک نقطه تعادل است، بنابراین:

$$(v_{BS_1}^{a_1} - v_{BS_2}^{a_1}) (y_{BS_2}^{a_1} - y_{BS_1}^{a_1}) = 0 \quad (27)$$

با محاسبه $\frac{dv_{BS_1}^{a_1}}{dy_{BS_1}^{a_1}}$ و $\frac{dv_{BS_2}^{a_1}}{dy_{BS_1}^{a_1}}$ و با استفاده از رابطه (۶)

$$y_{FBS_3}^{3, UU} v_{FBS_3}^{3, UU} - (1 - y_{FBS_4}^{3, UU} - y_{FBS_3}^{3, UU}) v_{MBS}^{3, UU} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_{MBS}^{3, UU} &= \rho (y_{MBS}^{3, UU}) [v_{MBS}^{3, UU} - \bar{v}^{3, UU}] = \\ \rho y_{MBS}^{3, UU} (v_{MBS}^{3, UU} - y_{MBS}^{3, UU} v_{MBS}^{3, UU} - \\ y_{FBS_3}^{3, UU} v_{FBS_3}^{3, UU} - (1 - y_{MBS}^{3, UU} - \\ y_{FBS_4}^{3, UU}) v_{FBS_4}^{3, UU}) \end{aligned} \quad (20)$$

همچنین می‌توان به طریق مشابه، با فرمول‌بندی ارائه شده، پویایی‌های تکرار کننده برای سایر نواحی پوشش‌دهی را نیز محاسبه کرد (به طور مثال $\dot{y}_{FBS_3}^{3, LU}$ یا $\dot{y}_{FBS_3}^{4, UU}$ یا ...).

قضیه ۱. میانگین تعداد بازیکنانی که ایستگاه پایه m را در رده j انتخاب می‌کنند برابر است با:

$$\bar{n}(BS^j) = \frac{\lambda_U}{\lambda_j + \sum_{k=1, k \neq j} \lambda_k (\bar{P}_k \cdot \bar{B}_k)^{2/\alpha}} \quad (21)$$

اثبات. در رابطه بالا، پارامترهای J ، M و N به ترتیب بیانگر تعداد رده‌ها، ایستگاه‌های پایه و بازیکنان در شبکه می‌باشند. بنابراین، می‌توان متوسط کسر بازیکنانی که ایستگاه پایه m را در رده j انتخاب کرده‌اند را به صورت زیر بیان کرد:

$$\bar{n}(BS^j) = \frac{N}{J} = \left(\frac{\lambda_U A}{\lambda_j A} \right) \cdot q_i^j = \left(\frac{\lambda_U}{\lambda_j} \right) \cdot q_i^j \quad (22)$$

در رابطه بالا A به ناحیه تحت پوشش شبکه اشاره می‌کند. براساس رابطه (۲۲)، می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \bar{n}(BS^j) &= \\ &\left(\frac{\lambda_U}{\lambda_j} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_j}{\sum_{k=1, k \neq j} \lambda_k \left(\frac{P^k B^k}{P^j B^j} \right)^{2/\alpha} + \lambda_j} \right) = \\ &\frac{\lambda_U}{\sum_{k=1, k \neq j} \lambda_k \left(\frac{P^k B^k}{P^j B^j} \right)^{2/\alpha} + \lambda_j} \end{aligned} \quad (23)$$

بنابراین قضیه اثبات شد.

الگوریتم پیشنهادی، قادر به دستیابی به کران پشیمانی^{۳۹} "لگاریتمی" در محیط‌های تصادفی^{۴۰} می‌باشد. در الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر EXP3، در هر گام زمانی، هر بازیکن عملی، a_j ، (انتخاب ایستگاه پایه j) را با احتمال $q_{j,t}$ ، انتخاب می‌کند. سپس بهره دریافتی $(v_{i,j,t})$ از عمل انتخابی خود را محاسبه می‌کند. در پایان هر دور تکرار الگوریتم، مقدار پشیمانی برای هر بازیکن محاسبه می‌شود. این مقدار از اختلاف میان مجموع بالاترین بهره‌های ممکن دریافتی و مجموع بهره‌های حاصل از عمل‌های انتخابی توسط بازیکنان محاسبه می‌شود. هدف ما، یافتن مجموعه اعمال بهینه برای بازیکنان می‌باشد، به طوریکه مجموع بهره‌های دریافتی بازیکنان در دنبال‌های از تصمیمات بیشینه گردد. برای تکرار بعدی، الگوریتم، احتمال انتخاب هر عمل را برای هر بازیکن، بر مبنای مقدار پاداش حاصل بهنگام می‌کند. بدیهی می‌باشد که، بازیکنان عمل انتخابی خود را تغییر می‌دهند در صورتیکه پاداش دریافتی آنها از عمل انتخابی کمتر از متوسط پاداش دریافتی جمعیت باشد. الگوریتم، جهت محاسبه مقدار پشیمانی برای هر بازیکن، پارامتری به نام خسارت را معرفی می‌کند. در واقع این پارامتر، بیانگر میزان ضرری است که بازیکن به علت انتخاب عمل غیر بهینه (غیر مطلوب) متحمل می‌شود که از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\hat{l}_{j,t} = 1 - v_{j,t} \quad (28)$$

در رابطه فوق، $\hat{l}_{j,t}$ ، بیانگر خسارت تحمیل شده به بازیکن در اثر انتخاب عمل j در زمان t می‌باشد، همچنین می‌توان مقدار نرمال شده پارامتر خسارت $l_{j,t} \in [0,1]$ را به صورت $l_{j,t} = E[\hat{l}_{j,t} | q_{j,t}]$ محاسبه نمود. در ادامه، الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر EXP3 در جدول ۱، توصیف می‌شود.

می‌توان ادعا کرد که $y_{BS_1}^{a_1}, y_{BS_2}^{a_1} > 0$ و در نتیجه

$$\frac{\partial v_{BS_2}^{a_1}}{\partial y_{BS_2}^{a_1}} < 0 \text{ و } \frac{\partial v_{BS_1}^{a_1}}{\partial y_{BS_1}^{a_1}} > 0$$

اگر $y_{BS_i} = 0, v_{BS_i} = 0$ و $BS_j \neq BS_i$ ، بنابراین، آنگاه v_{BS_j} یک مقدار ثابت دارد. بنابراین،

$$\frac{dv_{BS_1}^{a_1}}{dy_{BS_1}^{a_1}} - \frac{dv_{BS_2}^{a_1}}{dy_{BS_1}^{a_1}} < 0 \text{ و در نتیجه}$$

$$\frac{df}{dy_{BS_1}^{a_1}} < 0, \forall y_{BS_i}^{a_1} > 0$$

مقدار $\frac{df}{dy_{BS_1}^{a_1}}$ برای $y_{BS_1}^{a_1}, y_{BS_2}^{a_1} > 0$ اکیداً منفی

می‌باشد، بنابراین مقدار $y_{BS_i}^{a_1}$ در هر نقطه تعادل

درونی منفی می‌باشد و بنابراین قضیه اثبات می‌شود.

بازی تکاملی مبتنی بر فرایند انتخاب استراتژی‌ها

است به طوریکه در طی این فرایند انتخاب، همواره

استراتژی‌های موفق‌تر انتخاب می‌شوند و

استراتژی‌های مغلوب حذف می‌گردند. تعادل تکاملی

از طریق این سازگاری استراتژی به دست می‌آید، به

گونه‌ای که با توجه به وضعیت اولیه بازی، همواره

یک نقطه تعادل در طول تکرار بازی به دست

می‌آید. اگر حالت اولیه بازی تغییر کند، این احتمال

وجود دارد که نقطه تعادل دیگری حاصل شود با این

حال در هر زمان تنها یک نقطه تعادل برای بازی

وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که

رویکرد پیشنهادی با شروع از هر وضعیت اولیه در

طول تکرار بازی به یک نقطه تعادل تکاملی همگرا

می‌شود.

۴. الگوریتم پیشنهادی انتخاب ایستگاه پایه

در این قسمت یک الگوریتم نامتمرکز مبتنی بر

الگوریتم یادگیری EXP3، برای حل مسأله

تخصیص ایستگاه پایه ارائه می‌شود. بازدهی الگوریتم

مطرح شده در قالب پارامتری تحت عنوان پشیمانی

ارزیابی می‌شود. به بیان دقیق‌تر، الگوریتم مقدار

پشیمانی هر بازیکن را در ازای اینکه همواره در بازی

به شکل بهینه عمل نکرده است، محاسبه می‌کند.

³⁹ Regret bound

⁴⁰ Stochastic environments

جدول ۱- الگوریتم پیشنهادی انتخاب ایستگاه پایه مبتنی بر EXP3

1. Initialize a probability $q_{j,t}$ with $q_{j,0} = 1/M$ for each BS_j
2. Initialize a cumulative lost $\tilde{L}_{j,t}$ with $\tilde{L}_{j,0} = 0$ for each BS_j
3. For each round $t=1,2,\dots$
4. For all users
5. Select BS_j according to the probability $q_{j,t}$ (take an action)
6. Observe reward (payoff) of each user $v_{i,j,t}$
7. Compute actual loss $\hat{l}_{j,t}$, ($\hat{l}_{j,t} = (1 - v_{j,t})$) and biased loss $l_{j,t} \in [0,1]$
8. Compute $\tilde{l}_{j,t} = I_{j,t} l_{j,t} / q_{j,t}$, $I_{j,t} = 1$ if BS_j is selected by user otherwise $I_{j,t} = 0$
9. Update cumulative lost $\tilde{L}_{j,t} = \tilde{L}_{j,t-1} + \tilde{l}_{j,t}$
10. Update probabilities, $q_{j,t+1} = \frac{\exp(-\eta t+1 \tilde{L}_{j,t})}{\sum_{k=1}^n \exp(-\eta t+1 \tilde{L}_{k,t})}$
11. End for user loop
12. End for round loop

۵. نتایج شبیه‌سازی

نتایج حاصل از پیاده‌سازی و شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در این بخش، بر پایه سناریویی به شکل یک شبکه بی‌سیم دو-رده‌ای فمتوسل، شامل یک ایستگاه پایه ماکرو و سه ایستگاه پایه فمتو می‌باشد. در سناریو پیشنهادی، تعداد ۴۰ کاربر بی‌سیم در نظر گرفته شده است و به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، فرض می‌شود که ایستگاه‌های پایه فمتو و کاربران بی‌سیم به شکل تصادفی در محیط توزیع شده‌اند. جهت توصیف واقع‌بینانه‌تر و پیاده‌سازی نزدیک‌تر به محیط واقعی، نوع دسترسی به ایستگاه پایه، برای ایستگاه‌های پایه FBS_3 و FBS_4 به صورت ترکیبی تعریف می‌شود. همچنان مانند بخش قبل، مدل کانال ارتباطی بی‌سیم در شبیه‌سازی، بر پایه مدل مطرح شده در مرجع [۳۵] در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه آسان‌تر، هزینه دریافت هر واحد از نرخ انتقال داده، برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود و همچنین جهت رعایت مساوات میان کاربران، پارامتر اولویت برای همه کاربران در شبکه، به مقدار ۱ تنظیم می‌شود. در شبیه‌سازی، برای ترافیک کاربر یک آستانه تأخیر (D_{max}) با مقدار ۷ میلی ثانیه تعریف می‌شود.

- بررسی پویایی رفتار جمعیت کاربران در

نواحی پوشش‌دهی مختلف

شکل ۲، نمودار صفحه فاز^{۴۱} پویایی‌های تکرارکننده بازی را نشان می‌دهد. نمودار صفحه فاز در بازی‌های تکاملی، تطبیق راهبردهای انتخابی بازیکنان را به سوی راهبردهای بهینه نشان می‌دهد. در واقع نمودارهای صفحه فاز، سیر تکامل جمعیت به سوی وضعیت پایدار که همان نقطه تعادل تکاملی می‌باشد، را نشان می‌دهند. در شکل ۲، نمودار صفحه فاز برای بازیکنان واقع در نواحی پوشش‌دهی a_3 و a_4 ترسیم شده است، بازیکنانی که ایستگاه‌های پایه FBS_3 یا FBS_4 را انتخاب می‌کنند. سهم بازیکنان مذکور در انتخاب ایستگاه‌های پایه فوق، به ترتیب به صورت $y_{FBS_3}^{3,LU} = 0.6$ و $y_{FBS_4}^{4,LU} = 0.7$ به عنوان مقادیر اولیه، در نظر گرفته شده است. نمودار صفحه فاز، مسیرهایی را نشان می‌دهد که به طور مستقیم به سوی نقطه پایدار، یعنی تعادل تکاملی، حرکت می‌کنند. همانطور که از شکل مشخص است، نقطه تعادل بازی انتخاب ایستگاه پایه، نقطه‌ای با مقادیر $y_{FBS_3}^{3,UU} = 0.56$ و $y_{FBS_4}^{4,UU} = 0.38$ می‌باشد. به روش مشابه، می‌توان نمودار صفحه فاز را برای سایر

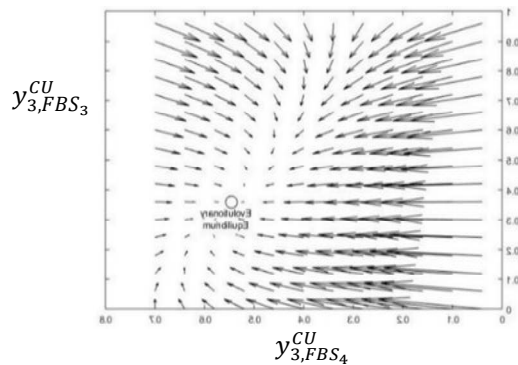
⁴¹ Phase plane

مقادیر اولیه تنظیم شده در الگوریتم وابسته است. به بیانی دیگر، تعداد کاربران در هر ناحیه پوشش‌دهی بر روی سرعت همگرایی الگوریتم تأثیرگذار است. سرعت همگرایی الگوریتم، همچنین، به مقدار پارامتر ρ (ضریب معادلات پویایی‌های تکرارکننده)، نیز بستگی دارد. از آنچه در شکل پدیدار است، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار ρ ، سرعت همگرایی الگوریتم به تعادل تکاملی افزایش می‌یابد. به بیان دقیق‌تر، با افزایش مقدار ρ ، سهم بازیکنانی که راهبردهای خود را به سمت راهبرد بهینه تطبیق می‌دهند، بیشتر می‌شود. با این وجود، اگر مقدار ρ بسیار بزرگ انتخاب شود، سرعت همگرایی بسیار کند می‌شود تا حدی که ممکن است الگوریتم ناپایدار گردد و هیچگاه به تعادل همگرا نشود.

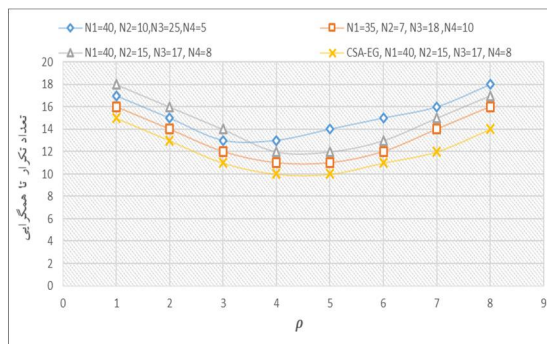
بازیکنان در نواحی پوشش‌دهی مختلف دیگر، ترسیم کرد. همچنین می‌توان نقطه تعادل تکاملی شکل فوق را، به ازای مقادیر اولیه دیگر، بررسی و محاسبه کرد.

– انطباق با تعادل تکاملی

به منظور ارزیابی عملکرد رویکرد پیشنهادی، در این بخش سرعت انطباق الگوریتم پیشنهادی با تعادل تکاملی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج تحلیل و بررسی این انطباق در شکل ۳ ترسیم شده است. همانطور که به وضوح در شکل مشخص است، الگوریتم در کمتر از ۲۰ بار تکرار، به پاسخ مسأله یعنی تعادل تکاملی، همگرا می‌شود. البته لازم به ذکر است که، سرعت انطباق الگوریتم به شرایط و



شکل ۲- صفحه فاز پویایی‌های تکرارکننده



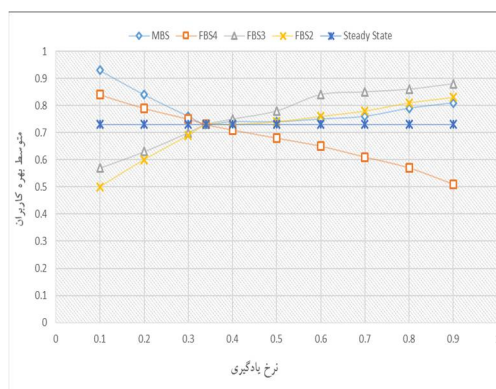
شکل ۳- تأثیر مقدار ρ بر سرعت همگرایی الگوریتم

همانطور که قبلاً اشاره شد، الگوریتم پیشنهادی نامتمرکز برای حل مسأله تخصیص ایستگاه پایه، مبتنی بر الگوریتم یادگیری $EXP3$ می‌باشد. بازدهی و راندمان الگوریتم یادگیری EXP ، براساس پارامتری تحت عنوان پشیمانی ارزیابی می‌شود. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم و محاسبه مقدار پشیمانی تجمعی بازیکنان، در شکل ۵، ارائه شده است. پشیمانی تجمعی، مجموع خطاهای پیش بینی شده در طول زمان است. هدف طراحی و توسعه الگوریتمی است که بتواند بهترین راهبردها را برای بازیکنان استخراج کند تا در نهایت میزان پشیمانی تجمعی برای همه بازیکنان، کمینه شود. الگوریتم $EXP3$ ، حتی در محیط‌های رقابتی، دارای نرخ پشیمانی برابر $\Omega(\sqrt{KT})$ می‌باشد [۳۶]. به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، آزمایشات در شبیه‌سازی، به ازای مقادیر مختلف K ، ($K=2$)، ($K=7$ و $K=20$) و تعداد ۱۰ دور تکرار الگوریتم، صورت گرفته است که K ، تعداد ایستگاه‌های پایه‌ای است که هر کاربر می‌تواند انتخاب کند (تعداد راهبردهای هر کاربر). همانطور که در شکل مشهود است، الگوریتم پیشنهادی ما به وضوح، نتایج مطلوبی را برای میزان پشیمانی تجمعی نشان می‌دهد به طوری که در بلند مدت (تعداد تکرار بالای الگوریتم)، الگوریتم قادر است، مقدار پشیمانی تجمعی را کمینه کند.

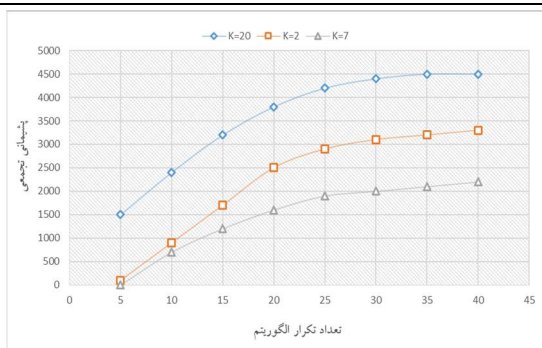
- تأثیر نرخ یادگیری بر همگرایی الگوریتم

شکل ۴، تأثیر مقدار نرخ یادگیری، η ، بر سرعت یادگیری و همگرایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی در شکل مشهود است، زمانیکه مقدار η بسیار کوچک انتخاب شود ($\eta=0.1$)، بازیکنان فرصت کمی جهت جمع‌آوری اطلاعات و یادگیری، در مورد ایستگاه‌های پایه موجود در شبکه دارند بنابراین، این امکان وجود دارد که تصمیم‌گیری آنها بر اساس اطلاعات ناقص صورت گیرد و در نتیجه انتخاب آنها یک انتخاب بهینه نشود. در مقابل، اگر مقدار η بسیار بزرگ انتخاب شود ($\eta=0.9$)، بازیکنان زمان زیادی را صرف یادگیری و جمع‌آوری اطلاعات می‌کنند. آنها با امتحان کردن گزینه‌های مختلف در شبکه به صورت تصادفی، سعی به کامل کردن اطلاعات خود می‌کنند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مناسب مقدار η ، نقش بسزایی در راندمان و بازدهی الگوریتم مبتنی بر یادگیری دارد. براساس آزمایشات و نتایج شبیه‌سازی، بالاترین راندمان برای الگوریتم پیشنهادی به ازای مقدار $\eta=0.48$ حاصل می‌شود.

- ارزیابی بازدهی و کارایی الگوریتم پیشنهادی



شکل ۴- تأثیر نرخ یادگیری بر سرعت همگرایی الگوریتم



شکل ۵ - ارزیابی کارایی الگوریتم

بازی تکاملی رفتار طولانی مدت یک جمعیت به پارامترهای مختلفی مانند تاخیر زمانی در دریافت اطلاعات شبکه، و اندازه جمعیت وابسته می‌باشد که این موضوع بر سرعت همگرایی بازی به نقطه تعادل تأثیرگذار است و به عنوان مشکلات این بازی در نظر گرفته می‌شوند. در پیاده‌سازی این روش، از الگوریتم یادگیری مبتنی بر *EXP3* استفاده شد که این امکان را فراهم کرد تا کاربران تنها با در اختیار داشتن اطلاعات محلی و بدون نیاز به دسترسی به اطلاعات جامع شبکه، بتوانند به شکل توزیع شده تصمیمات لازم جهت انتخاب ایستگاه پایه مناسب را اتخاذ نمایند. در نهایت، همگرایی الگوریتم به تعادل تکاملی مسأله در شبیه‌سازی‌ها، نمایانگر درستی عملکرد الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. در ادامه این پژوهش، می‌توان مطالعاتی گسترده‌تر در زمینه‌های مرتبط انجام داد که از آن جمله می‌توان به حل مسأله کنترل توان به کمک چارچوب نظریه بازی اشاره کرد. در یک شبکه دو-رده‌ای فمتوسل احتمال بروز تداخل، امکان استفاده مجدد فرکانس و افزایش ظرفیت را محدود می‌کند. کنترل توان نقش موثری در کاهش تداخل و همچنین تأمین حداقل نرخ انتقال داده مورد نیاز برای کاربر ماکرو را ایفا می‌کند. مسأله استراتژیک فوق، را می‌توان با استفاده از نظریه بازی فرمول بندی و مدل‌سازی کرد.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به این واقعیت که در ارتباطات بی‌سیم، طیف فرکانسی و کانال ارتباطی بی‌سیم ذاتاً منابع محدود و مشترک هستند، بنابراین انتخاب ایستگاه پایه مناسب یکی از مهمترین چالش‌های شبکه‌های بی‌سیم دو-رده‌ای فمتوسل به شمار می‌آید. در این مقاله، روشی به منظور حل مسأله انتخاب ایستگاه پایه مبتنی بر بازی تکاملی در شبکه‌های بی‌سیم فمتوسل ارائه شد. رویکرد پیشنهادی، بر تضمین پارامترهای کیفیت سرویس کاربران شبکه تأکید داشت. در این رویکرد، تأخیر به عنوان پارامتر کیفیت سرویس کاربران در نظر گرفته شد. در مدل پیشنهادی، کاربران جهت اتصال به ایستگاه‌های پایه، با یکدیگر رقابت می‌کردند و این رفتار رقابتی کاربران، به شکل یک بازی تکاملی فرمول بندی شد. از آنجائیکه در نظریه بازی تکاملی فرض به مراتب ضعیفتری در زمینه عقلانیت بازیکنان در نظر گرفته می‌شود، این مدل بازی می‌تواند در توصیف و پیشبینی رفتار بازیکنان در حیطه مسائل دنیای واقعی موفقیت بیشتری کسب کند. در نظریه بازی کلاسیک، هنگامی که یک بازی دارای چندین تعادل نش به عنوان پاسخ بازی باشد، یک راه حل مجدد برای بدست آوردن یک پاسخ یکتا مورد نیاز است. از مزایای دیگر بازی تکاملی می‌توان به این نکته اشاره کرد که در هر زمان از بازی تنها یک نقطه تعادل به عنوان پاسخ بازی حاصل می‌شود. با این حال در

- [8] Xu, C., Sheng, M., Wang, X., Wang, C.X. and Li, J., 2014. Distributed subchannel allocation for interference mitigation in OFDMA femtocells: A utility-based learning approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(6), pp.2463-2475.
- [9] Uygungelen, S., Auer, G. and Bharucha, Z., 2011, May. Graph-based dynamic frequency reuse in femtocell networks. In *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1-6). IEEE.
- [10] Widiarti, H., Pyun, S.Y. and Cho, D.H., 2010, September. Interference mitigation based on femtocells grouping in low duty operation. In *2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference-Fall* (pp. 1-5). IEEE.
- [11] Kim, K., Han, Y. and Kim, S.L., 2005. Joint subcarrier and power allocation in uplink OFDMA systems. *IEEE Communications Letters*, 9(6), pp.526-528.
- [12] u, D., Yu, D. and Cai, Y., 2008, June. Subcarrier and power allocation in uplink OFDMA systems based on game theory. In *2008 international conference on neural networks and signal processing* (pp. 522-526). IEEE.
- [13] Wu, D., Yu, D. and Cai, Y., 2008, June. Subcarrier and power allocation in uplink OFDMA systems based on game theory. In *2008 international conference on neural networks and signal processing* (pp. 522-526). IEEE.
- [14] Wong, C.Y., Tsui, C.Y., Cheng, R.S. and Letaief, K.B., 1999, September. A real-time sub-carrier allocation scheme for multiple access downlink OFDM transmission. In *Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology*
- [1] "Wifi and femtocell integration strategies 2011-2015," Juniper Research Whitepaper, <http://www.juniperresearch.com/>, Mar. 2011.
- [2] Saquib, N., Hossain, E. and Kim, D.I., 2013. Fractional frequency reuse for interference management in LTE-advanced hetnets. *IEEE Wireless Communications*, 20(2), pp.113-122.
- [3] Jin, F., Zhang, R. and Hanzo, L., 2013. Fractional frequency reuse aided twin-layer femtocell networks: Analysis, design and optimization. *IEEE Transactions on Communications*, 61(5), pp.2074-2085.
- [4] Jeon, W.S., Kim, J. and Jeong, D.G., 2013. Downlink radio resource partitioning with fractional frequency reuse in femtocell networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(1), pp.308-321.
- [5] Torregosa, J., Enkhbat, R. and Hwang, W.J., 2010. Joint power control, base station assignment, and channel assignment in cognitive femtocell networks. *EURASIP Journal on wireless communications and networking*, 2010, pp.1-14.
- [6] Chandrasekhar, V. and Andrews, J.G., 2009. Spectrum allocation in tiered cellular networks. *IEEE Transactions on Communications*, 57(10), pp.3059-3068.
- [7] Liu, D., Zhang, H., Zheng, W. and Wen, X., 2012, October. The sub-channel allocation algorithm in femtocell networks based on ant colony optimization. In *MILCOM 2012-2012 IEEE Military Communications Conference* (pp. 1-6). IEEE.

- [21] Guvenc, I., Jeong, M.R., Watanabe, F. and Inamura, H., 2008. A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation. *IEEE Communications Letters*, 12(12), pp.880-882.
- [22] Giupponi, L. and Ibars, C., 2010, September. Distributed interference control in OFDMA-based femtocells. In *21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1201-1206. IEEE.
- [23] Kim, B.G., Kwon, J.A. and Lee, J.W., 2011, July. Utility-based subchannel allocation for OFDMA femtocell networks. In *2011 Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 1-6. IEEE.
- [24] FALLAH, M.O., SHAHGHOLI, G.B., Mala, H. and MOVAHEDINIA, N., 2014. Demand based Resource Allocation to Balance the Utilization and User Level Fairness in Femtocell Networks, PP.187-204.
- [25] Mittal, K., Belding, E.M. and Suri, S., 2008. A game-theoretic analysis of wireless access point selection by mobile users. *Computer Communications*, 31(10), pp.2049-2062.
- [26] Fahimullah, K. and Hassan, S., 2010, March. Game-theory based wireless access point selection scheme. In *IEEE Silver Jubilee International Multitopic Symposium (SIMTS)*.
- [27] Khan, M.A., Toseef, U., Marx, S. and Goerg, C., 2010, May. Game-theory based user centric network selection with media independent handover services and flow management. In *2010 8th Annual Communication Networks and Services Research Conference*, pp. 248-255. IEEE.
- Conference (Cat. No. 99CH36324)* (Vol. 2, pp. 1124-1128). IEEE.
- [15] Pietrzyk, S. and Janssen, G.J., 2002, September. Multiuser subcarrier allocation for QoS provision in the OFDMA systems. In *Proceedings IEEE 56th vehicular technology conference* (Vol. 2, pp. 1077-1081). IEEE.
- [16] Estrada, R., Jarray, A., Otrok, H. and Dziong, Z., 2014. Base station selection and resource allocation in macro-femtocell networks under noisy scenario. *Wireless networks*, 20(1), pp.115-131.
- [17] Barbarossa, S., Carfagna, A., Sardellitti, S., Omilipo, M. and Pescosolido, L., 2011, May. Optimal radio access in femtocell networks based on Markov modeling of interferers' activity. In *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 3212-3215). IEEE.
- [18] Huang, J., Subramanian, V.G., Agrawal, R. and Berry, R., 2009. Joint scheduling and resource allocation in uplink OFDM systems for broadband wireless access networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 27(2), pp.226-234.
- [19] Ha, V.N. and Le, L.B., 2013. Fair resource allocation for OFDMA femtocell networks with macrocell protection. *IEEE transactions on vehicular technology*, 63(3), pp.1388-1401.
- [20] Liang, Y.S., Chung, W.H., Ni, G.K., Chen, Y., Zhang, H. and Kuo, S.Y., 2012. Resource allocation with interference avoidance in OFDMA femtocell networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(5), pp.2243-2255.

- [35] Tech. Specif. Group Radio Access Network - Physical Channel and Modulation (Release 8), 3GPP TS 36.211.
- [36] Seldin, Y., Szepesvári, C., Auer, P. and Abbasi-Yadkori, Y., 2012, December. Evaluation and Analysis of the Performance of the EXP3 Algorithm in Stochastic Environments. In *EWRL* (pp. 103-116).
- [28] Khan, M.A., Toseef, U., Marx, S. and Goerg, C., 2010, April. Auction based interface selection with Media Independent Handover services and flow management. In *2010 European Wireless Conference (EW)* (pp. 429-436). IEEE.
- [29] Pourkabirian, A., Fooladi, M.D.T., Zeinali, E. and Rahmani, A.M., 2018. Dynamic resource allocation for OFDMA femtocell networks: a game-theoretic approach. *Telecommunication Systems*, 69(1), pp.51-59.
- [30] Pourkabirian, A., Fooladi, M.D.T., Khosraghi, E.Z. and Rahmani, A.M., 2019. An Evolutionary Game-Theoretic Approach for Base Station Allocation in Wireless Femtocell Networks. *Wireless Personal Communications*, 107(1), pp.217-242.
- [31] Zhang, H., Jiang, C., Beaulieu, N.C., Chu, X., Wang, X. and Quek, T.Q., 2015. Resource allocation for cognitive small cell networks: A cooperative bargaining game theoretic approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(6), pp.3481-3493.
- [32] eng, Z., Song, L., Han, Z. and Zhao, X., 2013, April. Cell selection in two-tier femtocell networks with open/closed access using evolutionary game. In *2013 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)* (pp. 860-865). IEEE.
- [33] Niyato, D. and Hossain, E., 2008. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: An evolutionary game approach. *IEEE transactions on vehicular technology*, 58(4).
- [34] Weibull, J.W., 1997. *Evolutionary game theory*. MIT press.