

## بهینه‌سازی تخصیص توأم پیوند کاربر، تخصیص زیر کانال و

### تخصیص توان در شبکه‌های OFDMA ناهمگون

سیده مریم هاشمی<sup>۱</sup>، سروش اخلاقی<sup>۲\*</sup>، ملیحه فروزان‌مهر<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی ارشد دانشگاه شاهد، ۲- عضو هیات علمی دانشگاه شاهد، ۳- دانشجوی دکتری دانشگاه شاهد

(دریافت: ۹۸/۰۷/۳۰، پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۲)

#### چکیده

این مقاله مسئله پیوند کاربر، تخصیص زیرکانال و تخصیص توان به صورت توأم را در کانال فراسوی یک شبکه مخابراتی ناهمگون با بهره‌مندی از راهکار تسهیم فرکانسی متعامد (OFDMA) و با فرض محدود بودن حداکثر توان ارسالی هر کاربر مورد بررسی قرار می‌دهد. نشان داده می‌شود که مسئله پیش رو یک مسئله غیر خطی ترکیبی پیوسته گسسته غیر محدب است. در این راستا جهت قابل حل نمودن آن، شرط گسسته بودن متغیرهای مسئله رهاسازی شده و در عوض یک عبارت هزینه به تابع هدف اضافه می‌شود تا گسسته بودن این متغیرها در جواب نهایی تضمین شود. در نهایت برای حل مسئله، تابع هدف به صورت تفاضل دو تابع محدب (D.C) بازنویسی شده و سپس با استفاده از روش تقریبی سلسله مراتبی محدب، مسئله ساده‌سازی شده حل می‌شود. شایان ذکر است تا آنجایی که نویسندگان مطلع می‌باشند، مسئله تخصیص زیرکانال، پیوند کاربر و کنترل توان تاکنون به صورت توأم در کانال فراسوی شبکه‌های مخابراتی ناهمگون مورد بررسی قرار نگرفته است. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی ملاحظه می‌شود که راهکار پیشنهادی نسبت به راهکارهای ارائه شده موجود با تحمل پیچیدگی محاسباتی بالاتر، نرخ بهتری را حاصل می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** مسئله پیوند کاربر، تخصیص زیرکانال و توان، شبکه‌های ناهمگون، شبکه فراسو

#### ۱. مقدمه

در طرف مقابل، افزایش تعداد کاربران در این شبکه‌ها و به تبع آن افزایش تقاضای استفاده از خدمات اینترنتی پهن‌بند از یک سو و همچنین محدودیت پهنای باند فرکانسی و محدودیت توان از سوی دیگر موجب افزایش اهمیت پاسخگویی به مسائل مختلف مخابرات بی‌سیم در شبکه‌های چند سلولی شده است [۱]. پیش‌بینی‌های انجام شده در مورد روند افزایش استفاده از مخابرات سلولی نشانگر این موضوع است که ارتقای روش‌های تبادل اطلاعات و نیاز به وجود شبکه‌های مخابراتی گسترده و مقیاس‌پذیر، برای پاسخگویی به نیاز کاربران در سال‌های آتی اجتناب‌ناپذیر است. به همین دلیل، ارائه راهکارهایی به منظور استفاده کارا از منابع پهنای باند و توان ضروری است و نقش به‌سزایی در بهره‌وری شبکه و نرخ انتقال اطلاعات کاربران در شبکه‌های چند سلولی آینده خواهد داشت. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در خصوص مسئله تخصیص منابع در شبکه‌های مخابراتی نسل جدید پرداخته شده است. در این مطالعات، راهکارهای مختلفی بسته به جهت ارسال داده در کانال فراسو یا فرسو و همچنین اهداف مختلفی همچون افزایش نرخ گذردهی شبکه، مدیریت تداخل، کنترل توان، بهبود بهره‌وری انرژی،

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش روزافزون کاربران تلفن همراه و محدودیت‌های شبکه‌های سلولی همگون، توسعه شبکه‌های مخابراتی ناهمگون که در آن در کنار ایستگاه‌های پایه ماکرو، چندین ایستگاه پایه میکرو نیز در محدوده پوشش ایستگاه‌های پایه ماکرو به سرویس‌دهی کاربران نزدیک به خود بپردازند، مورد علاقه طراحان سامانه‌های مخابراتی قرار گرفته است. در این شبکه‌ها، کاربران لبه سلول به دلیل فاصله به نسبت زیاد از مرکز و اثرات محوشدگی عمیق، سیگنال دریافتی ضعیفی را تجربه می‌کنند. در این راستا برای بالا بردن کیفیت خدمات و همچنین کاهش بار شبکه، ترافیک این دسته از کاربران بر دوش سلول‌های کوچک قرار می‌گیرد. شبکه‌های سلولی مخابرات بی‌سیم تاکنون چهار نسل را پشت سر گذاشته و در حال حاضر سیر تحولی عظیم خود را به سوی نسل پنجم سپری می‌کند. چالش‌های اصلی در طراحی این شبکه‌ها، ناشی از محدودیت توان، کمبود پهنای باند، وجود تداخل و تغییرات کانال است. این در حالی است که

\* رایانامه نویسنده مسئول: akhlaghi@shahed.ac.ir

گشته‌اند تا بتوانند در مقایسه با شبکه‌های مرسوم گذشته، ظرفیت و پوشش بالاتری ایجاد نمایند. به همین منظور در سال‌های اخیر فناوری‌های قدرتمندی همچون شبکه‌های ناهمگون (HetNets)، شبکه‌های چند ورودی چند خروجی عظیم<sup>۲</sup> و روش‌های میلی‌متری<sup>۳</sup> (mmWave) معرفی شده‌اند. در این شبکه‌ها، میکروسول‌ها شامل پیکوسول‌ها، فمتوسول‌ها و رله‌ها، نقشی اساسی در کاهش حجم داده ورودی به ماکروسول‌ها ایفا می‌کنند و در نتیجه بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی بالاتری حاصل می‌شود [۷].

در سامانه‌های مخابرات بی‌سیم صرف نظر از فناوری اتخاذ شده، جهت انتقال داده با نرخ بالا کاربران می‌باید به ایستگاه پایه مناسب متصل شوند که به راهکار در نظر گرفته شده جهت این مهم «پیوند کاربر» می‌گویند. در سامانه‌های مخابراتی جدید این امکان برای کاربران وجود دارد تا به فراخور نیاز خود از بین زیرکانال‌های آزاد موجود در ایستگاه‌های پایه مختلف، زیرکانال‌های با شرایط مناسب را در اختیار بگیرند. از این رو، تخصیص منابع به کاربران بین سلولی نیز بهتر انجام می‌شود. به‌طور کلی پیوند کاربر به معنی تصمیم‌گیری برای کاربرانی است که در محدوده پوششی بیش از یک ایستگاه پایه قرار دارند. پیوند کاربر نقش مهمی در میزان بهره‌وری طیف، بهره‌وری انرژی و متعادل‌سازی ترافیک ایستگاه‌های پایه شبکه ایفا می‌کند. همچنین اتصال کاربر به یک ایستگاه پایه مشخص، بر میزان نرخ آن تأثیر می‌گذارد، چرا که نرخ کاربر در یک شبکه ناهمگون، تابعی از تعداد کاربران پیوندی به یک ایستگاه پایه بر روی یک زیرکانال، تعیین زمان‌بندی کاربران توسط ایستگاه پایه و همچنین نحوه تخصیص منابع به کاربران است. از این رو، تحقیقات بسیاری در زمینه روش‌های مختلف پیوند کاربر در حال انجام است [۸-۱۲]. در شبکه‌های فعلی، یکی از رایج‌ترین راهکارهای انتخاب ایستگاه پایه برای کاربر مبتنی بر حداکثر توان دریافتی<sup>۴</sup> (Max-RSS) است. اما این راهکار در شبکه‌های ناهمگون مناسب نیست، زیرا اختلاف توان ارسالی ماکروسول‌ها و میکروسول‌ها منجر به تمایل بیشتر کاربران به ایجاد پیوند با ایستگاه پایه ماکرو و در نتیجه سبب افزایش بار شبکه خواهد شد. از طرفی ایستگاه‌های پایه کوچک به جهت عدم ارائه خدمات به کاربران، ناکارآمد خواهند شد. برای مقابله با این مشکل، در کنار قید حداکثر توان دریافتی، از راهکاری استفاده می‌شود که در آن کاربران نیازمند به برقراری پیوند با ایستگاه‌های پایه کوچک باشند تا بتوان از این طریق اهدافی چون کنترل توان، کیفیت سرویس‌دهی و درنهایت ظرفیت شبکه را ارتقاء داد [۸].

در مرجع [۹]، طرح متمایل‌ساز پیوند کاربر<sup>۵</sup> پیشنهاد شده

متعادل‌سازی بار ترافیکی شبکه و مواردی از این دست مورد بررسی قرار گرفته است [۶-۲].

در مرجع [۲] مسئله تخصیص منابع در یک شبکه مخابراتی امن انرژی کارآمد در شبکه OFDMA در کانال فرسوسو بررسی شده است. مسئله مورد نظر، یک مسئله بهینه‌سازی غیر محدب است. ابتدا مسئله مورد نظر، با استفاده از خواص برنامه‌ریزی کسری<sup>۱</sup> به صورت یک مسئله محدب بازنویسی شده و سپس به کمک یک الگوریتم تکراری کارا حل شده است که در هر بار تکرار، مسئله تخصیص منابع با کمک تجزیه دوگان حل می‌شود. در مرجع [۳] مسئله بهینه‌سازی سنجش طیف و تخصیص توان به صورت هم‌زمان با هدف بیشینه‌سازی نرخ ارسال در یک شبکه رادیوشناختی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله با در نظر گرفتن محدودیت تداخل اعمال شده بر روی شبکه کاربر اولیه و محدودیت توان شبکه مدل‌سازی شده است. در این مرجع مسئله بهینه‌سازی غیر محدب بوده و برای حل آن از دو راهکار مبتنی بر الگوریتم ژنتیک که شامل بهینه‌سازی محدب با استفاده از ضرایب لاگرانژ و روش برنامه‌ریزی خطی است، استفاده می‌شود. در مرجع [۴] تخصیص منابع در کانال فراسوی یک شبکه چند سلولی انجام می‌شود. در این پژوهش تبادل اطلاعات کاربران در سلول‌های مختلف باعث به وجود آمدن تداخل در دیگر سلول‌ها می‌شود که مسئله متناظر تخصیص منابع و کنترل توان با استفاده از یک راهکار تقریب مناسب و با استفاده از روش تبدیل مربعی و به‌کارگیری راهکار لاگرانژ پاسخ داده می‌شود. در مرجع [۵] یک شبکه چند سلولی در کانال فراسو در نظر گرفته شده است. در این شبکه هدف بیشینه کردن نرخ گذردهی شبکه به گونه‌ای است که تداخل ایجاد شده توسط هر کاربر از سطح معینی کمتر باشد. در این راستا برای کاهش پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی از یک الگوریتم دو مرحله‌ای برای تخصیص منابع و کنترل توان جهت کاهش تداخل بین سلولی استفاده شده است. تخصیص منابع در این الگوریتم ابتدا با فرض ثابت بودن توان صورت می‌گیرد و سپس کنترل توان با فرض تخصیص منابع ثابت انجام می‌شود. در مرجع [۶] نیز مسئله تخصیص زیرکانال و کنترل توان با هدف بیشینه‌سازی نرخ یک شبکه چند سلولی حل شده است. در این راستا با اضافه کردن یک تابع هزینه به تابع اصلی به منظور رهاسازی متغیر باینری و با فرض محدودیت تداخل کاربران شبکه میکرو بر روی ایستگاه پایه ماکرو، یک الگوریتم زیربهینه برای حل مسئله بهینه‌سازی با هدف بیشینه کردن نرخ گذردهی شبکه استفاده شده است.

اخیراً مصرف توان پایین‌تر و ارتقای کیفیت سرویس‌دهی در شبکه‌های مخابراتی نسل جدید از اهمیت به‌سزایی برخوردار

<sup>۲</sup> Massive Multiple-Input Multiple-Output

<sup>۳</sup> Millimeter Wave Techniques (mmWave)

<sup>۴</sup> Maximum Receive Signal Strength (Max-RSS)

<sup>۵</sup> Biased User Association

<sup>۱</sup> Fractional Programming

شد. از طرفی با توجه به اینکه مسئله تخصیص منابع در دو جهت فراسو و فروسو امکان‌پذیر است، اما بررسی اینگونه مسائل در کانال فراسو نسبت به کانال فروسو چالش برانگیزتر است و دلیل این امر وجود تداخل بیشتر نسبت به کانال فروسو و همچنین محدودیت توان باتری کاربران در کانال فراسو است. از این رو هدف اصلی در این مقاله تخصیص توأم زیرکانال، توان و پیوند کاربر در کانال فراسوی یک شبکه چند سلولی ناهمگون است به نحوی که نرخ گذردهی شبکه بیشینه شود. در ادامه راهکاری جدید جهت دستیابی به بیشترین نرخ گذردهی شبکه در کانال فراسو ارائه می‌شود و نشان داده خواهد شد که این مسئله از نوع مسائل بهینه‌سازی «غیر محدب»<sup>۳</sup> است. برای حل اینگونه مسائل ابتدا باید مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی محدب تبدیل شود. در اینجا ابتدا این مسئله به کمک تقریب «DC» به صورت مسائل شبه محدب بازنویسی می‌شود و سپس به کمک راهکار تقریب سلسله مراتبی محدب<sup>۴</sup> حل می‌شود.

## ۲- مدل سامانه

در مقاله پیش رو، یک شبکه مخابراتی ناهمگون OFDMA مطابق شکل (۱) شامل یک ایستگاه پایه ماکرو و تعدادی ایستگاه پایه میکرو مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در شبکه تعدادی کاربر وجود دارد که در حال ارسال اطلاعات خود به سمت ایستگاه‌های پایه هستند. در این مقاله، مجموعه کل ایستگاه‌های میکرو به صورت  $J = \{1, \dots, N_j\}$  نشان داده می‌شود. همچنین مجموعه زیرکانال‌های مدولاسیون OFDMA به صورت  $N = \{1, 2, \dots, N_s\}$  است. همچنین مجموعه کاربران شبکه به صورت  $I$  نمایش داده می‌شود. شدت کانال فراسو از کاربر  $i$  به ایستگاه پایه  $j$  بر روی زیرکانال  $n$  به صورت  $|h_{i,j}^n|^2$  تعریف می‌شود. به علاوه  $p_{ij}^n$  توان ارسالی کاربر فراسوی  $i$  به ایستگاه پایه  $j$  در زیرکانال  $n$  و  $x_{ij}^n$  اندیس تخصیص زیرکانال شماره  $n$  به کاربر  $i$  در ایستگاه پایه  $j$  را نشان می‌دهد. اگر متغیر  $x_{ij}^n$  برابر با یک باشد، به این معناست که زیرکانال شماره  $n$  از ایستگاه پایه شماره  $j$  به کاربر شماره  $i$  اختصاص داده شده است؛ در غیر این صورت اندیس تخصیص زیرکانال صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین بردار توان ارسالی هر کاربر در هر سلول به صورت  $p_{ij} = [p_{ij}^1, \dots, p_{ij}^N]$  و بردار توان کل کاربران به صورت  $P = [p_{11}, \dots, p_{IJ}]^T$  است. به‌طور مشابه بردار اندیس تخصیص زیرکانال در هر سلول به صورت  $x_{ij} = [x_{ij}^1, \dots, x_{ij}^N]$  و بردار اندیس تخصیص زیرکانال در

است که بر اساس آن کاربران به برقراری پیوند با ایستگاه‌های پایه کم توان سوق داده می‌شوند. در این طرح برای ایستگاه‌های پایه کم توان یک ضریب برای جبران توان تعیین می‌گردد. سپس کاربر متناسب با آن، ایستگاه پایه‌ای را انتخاب می‌کند که بیشترین توان نسبی را از آن دریافت می‌کند. به کمک این راهکار می‌توان با تعیین ضریب بزرگ‌تر جهت افزایش توان نسبی ایستگاه‌های پایه کم توان، شرایط تخصیص کاربران به آن‌ها را فراهم کرد.

در مرجع [۱۰] مسئله پیوند کاربر، تخصیص زیرکانال و توان به‌طور مشترک با هدف بیشینه‌سازی مجموع نرخ در حالت فروسو بررسی شده است. در این پژوهش به دلیل پیچیدگی بالا، مسئله مورد نظر به دو زیرمسئله مجزا تقسیم شده است. در زیرمسئله اول با ثابت در نظر گرفتن توان ارسالی ایستگاه پایه، مسئله تخصیص زیرکانال و پیوند کاربر به کمک نظریه گراف دو بخشی حل شده است که به کمک این راهکار از تداخل سلول-های دیگر صرف نظر می‌شود. سپس در زیرمسئله دوم با فرض ثابت بودن زیرکانال و پیوند کاربر، مسئله تخصیص توان حل شده است. با اعمال یک الگوریتم با پیچیدگی پایین به کمک تقریب D.C، پاسخ زیربهینه به دست می‌آید. در مرجع [۱۱] مسئله پیوند کاربر و تخصیص منابع انرژی کارآمد، در حالت فراسو برای یک شبکه ناهمگون مطالعه شده است. در این پژوهش فرض شده است بیشینه توان ارسالی هر کاربر محدود است و نیز هر کاربر حداقل نرخ مورد نیاز را دریافت می‌کند. در این پژوهش، یک روش تخصیص منبع انرژی کارآمد، متناسب با نسبت شدت کانال به نویز<sup>۱</sup> (CNR) مطرح شده است که در این روش کاربران دارای نسبت CNR پایین، از ایستگاه پایه ماکرو به یک ایستگاه پایه کوچک منتقل می‌شوند. همچنین در این پژوهش، مسئله بیشینه‌سازی بهره‌وری انرژی یک کاربر تک حامله و چند کاربر چند حامله با فرض محدود بودن توان ارسالی، به کمک شرایط KKT<sup>۲</sup> حل شده است. یکی از راهکارهای مؤثر دیگر در جهت افزایش نرخ گذردهی شبکه، ایجاد چند پیوندی برای کاربران در یک بازه زمانی است، زیرا این کار انعطاف‌پذیری بیشتری را برای کاربران شبکه فراهم می‌کند. این راهکار در مرجع [۱۲] در کانال فروسو و در راستای دستیابی به متعادل‌سازی بار شبکه بررسی شده است.

تاکنون تحقیقات مختلفی در خصوص مسئله تخصیص منابع توان و زیرکانال در شبکه‌های مخابراتی ناهمگون صورت گرفته است. در پژوهش پیش رو علاوه بر بررسی مسئله تخصیص زیرکانال و توان، به بررسی مسئله پیوند کاربر نیز پرداخته خواهد

<sup>۴</sup> Non-Convex

<sup>۳</sup> Successive Convex Approximation (SCA)

<sup>۱</sup> Channel to Noise Ratio (CNR)

<sup>۲</sup> Karush Kukh Tucker (KKT)

بر این اساس سیگنال دریافتی در ایستگاه پایه  $j$  به صورت زیر است:

$$y_j^n = \sqrt{p_{ij}^n} h_{i,j}^n s_{ij}^n + \sum_{\substack{k \in I \\ j' \neq j}} \sqrt{p_{kj}^n} h_{k,j}^n s_{k,j}^n + z_j^n \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $s_{ij}^n$  سیگنال ارسالی از سوی کاربر  $i$  بر روی زیرکانال  $n$  و  $z_j^n$  نویز دریافتی در ایستگاه پایه  $j$  بر روی زیرکانال شماره  $n$  است.

در این ساختار با فرض اینکه کاربر شماره  $i$  به ایستگاه پایه شماره  $j$  بر روی زیرکانال شماره  $n$  متصل شده است، نسبت سیگنال به نویز و تداخل (SINR)<sup>۷</sup> دریافتی در ایستگاه پایه  $j$  بر روی زیرکانال شماره  $n$  به صورت زیر بیان می شود:

$$SINR_{i,j}^n = \frac{p_{ij}^n |h_{i,j}^n|^2}{\sum_{\substack{k \in I \\ j' \neq j}} p_{kj}^n |h_{k,j}^n|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $\sigma^2$  واریانس نویز گوسی سفید جمع شونده است. همچنین نرخ داده دریافتی از سوی کاربر  $i$  در ایستگاه پایه شماره  $j$  بر روی زیرکانال شماره  $n$  به صورت زیر است:

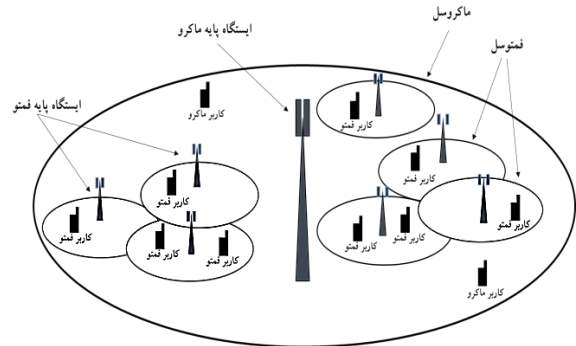
$$R_{i,j}^n = \log(1 + SINR_{i,j}^n) \quad (3)$$

با فرض آنکه توان ارسالی هر کاربر در تمام زیرکانالها محدود است، مسئله بهینه سازی به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$\begin{aligned} \max_{x_{ij}^n, p_{ij}^n} & \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{n=1}^{N_n} x_{ij}^n R_{i,j}^n \\ \text{s.t. C1:} & \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{n=1}^{N_n} x_{ij}^n p_{ij}^n \leq P_{\max}, \forall i \in I \\ \text{C2:} & p_{i,j}^n \geq 0, \forall n \in N, i \in I \\ \text{C3:} & \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} x_{ij}^n p_{ij}^n |h_{i,0}^n|^2 \leq I_{th}^n, \forall n \in N \\ \text{C4:} & \sum_{n=1}^{N_n} x_{ij}^n R_{i,j}^n \geq R_{\min}, \forall j \in J, i \in I \\ \text{C5:} & \sum_{i=1}^{N_i} x_{ij}^n \leq 1, \forall n \in N, j \in J \\ \text{C6:} & x_{ij}^n \in \{0,1\}, \forall i \in I, j \in J, n \in N \\ \text{C7:} & \sum_{j=1}^{N_j} x_{ij}^n \leq 1, \forall n \in N, i \in I \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه (۴) هدف یافتن بهترین تخصیص زیرکانال، پیوند کاربر و تخصیص توان است به نحوی که نرخ گذردهی کل شبکه بیشینه شود. در این رابطه شرط اول بیان می کند که توان ارسالی هر کاربر بر روی هر زیرحامل از یک توان بیشینه کمتر است. شرط دوم نمایانگر این است که توان ارسالی هر کاربر مثبت است.

کل شبکه به صورت  $X = [X_{11}, \dots, X_{Ij}]^T$  در نظر گرفته می شود.



شکل (۱): مدل سامانه یک شبکه فراسوی ناهمگون

در ادامه چهار فرض اساسی در این پژوهش به صورت خلاصه آمده است:

۱- اتصالات زیرشبکه<sup>۱</sup>: در این شبکه فرض شده است تمامی ایستگاههای پایه از طریق کابل فیبر نوری به یک کنترل کننده مرکزی متصل شده اند. این کنترل کننده به اطلاعات حالت کانال دسترسی دارد که به این صورت حاصل می شود: ابتدا هر ایستگاه پایه، یک سیگنال از پیش تعیین شده به سوی کاربران ارسال می کند، سپس هر کاربر اطلاعات حالت کانال خود را تخمین زده و از طریق کانال بازخورد به ایستگاه پایه مربوطه ارسال می کند. در آخر نیز تمامی ایستگاههای پایه، اطلاعات کانال خود را از طریق فیبر نوری به کنترل کننده مرکزی ارسال می کنند.

۲- اشتراک هم کانال<sup>۲</sup> (CCD): در این سامانه، تعداد  $N$  زیرکانال وجود دارد. این زیرکانالها به جهت بهره‌وری مناسب طیف، در تمامی ایستگاههای پایه به طور جداگانه به اشتراک گذاشته شده اند.

۳- چند پیوندی<sup>۳</sup>: بر خلاف فرض مرسوم که در آن هر کاربر در هر بازه زمانی تنها با یک ایستگاه پایه ارتباط برقرار می کند، در راهکار پیشنهادی فرض می شود که هر کاربر در هر بازه زمانی می تواند با چند ایستگاه پایه ارتباط برقرار کند و اطلاعات خود از طریق زیرکانالهای مختلف به آنها ارسال می کند.

۴- محوشدگی کانال<sup>۴</sup>: در شبکه مفروض، مدل محوشدگی کانال، محوشدگی فرکانس گزین<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که در هر بازه زمانی ضرایب کانال ثابت هستند و هر زیرکانال دارای محوشدگی تخت<sup>۶</sup> است.

<sup>1</sup> Back-Haul Connectivity

<sup>2</sup> Co-Channel Deployment (CCD)

<sup>3</sup> Multi-Association

<sup>4</sup> Channel Fading

<sup>5</sup> Frequency Selective Channel

<sup>6</sup> Flat Fading Channel

<sup>7</sup> Signal to Interference Pluse Noise Ratio (SINR)

اصلی، تابعی غیر محدب است و ثانیاً شرایط مسئله بهینه‌سازی دارای ضرایب گسسته ۰ و ۱ هستند. ابتدا این مسئله را به شکل مسئله ریاضی قابل حل بازنویسی می‌شود. این نکته قابل توجه است که  $x_{ij}^n$  یک متغیر باینری است و تابع هدف را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$x_{i,j}^n R_{i,j}^n = \log_2 \left( 1 + \frac{x_{i,j}^n P_{i,j}^n |h_{i,j}^n|^2}{\sum_{\substack{k \in I_j \\ j' \neq j}} x_{i,j'}^n P_{i,j'}^n |h_{i,j'}^n|^2 + \sigma^2} \right) \quad (5)$$

در مسئله (۴) شرط اول و سوم به دلیل عبارت  $x_{i,j}^n P_{i,j}^n$  شرایطی غیر محدب هستند. برای رفع این مشکل از نامساوی زیر برای حذف متغیر گسسته  $x_{ij}^n$  از شروط اول و سوم استفاده می‌شود و مسئله به صورت رابطه (۶) بازنویسی می‌شود.

$$0 \leq p_{i,j}^n \leq x_{i,j}^n P_{\max}, \forall i, j, n \quad (6)$$

این نامساوی برای هر دو حالت  $x_{i,j}^n = 1$  و  $x_{i,j}^n = 0$  برقرار است. اگر  $x_{ij}^n = 0$  باشد، زیرکانال شماره  $n$  در سلول شماره  $j$  به کاربر  $i$  تخصیص نیافته است، در نتیجه توان ارسالی در این زیرکانال صفر است. همچنین اگر  $x_{ij}^n = 1$  باشد، هر کاربر حداکثر می‌تواند به  $P_{\max}$  دسترسی داشته باشد. با استفاده از رابطه (۶)، مسئله بهینه‌سازی (۴) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\begin{aligned} & \max_{x_{ij}^n, p_{ij}^n} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{N_n} x_{ij}^n R_{ij}^n \\ \text{s.t. C1: } & \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{n=1}^{N_n} p_{ij}^n \leq P_{\max}, \forall i \in I \\ \text{C2: } & 0 \leq p_{ij}^n \leq x_{ij}^n P_{\max}, \forall i \in I, j \in J, n \in N \\ \text{C3: } & \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^I p_{ij}^n |h_{i,0}^n|^2 \leq I_{th}^n, \forall n \in N \\ \text{C4: } & \sum_{n=1}^{N_n} x_{ij}^n R_{i,j}^n \geq R_{\min}, \forall j \in J, i \in I \\ \text{C5: } & \sum_{i=1}^I x_{ij}^n \leq 1, \forall n \in N, j \in J \\ \text{C6: } & x_{ij}^n \in \{0,1\}, \forall i \in I, j \in J, n \in N \\ \text{C7: } & \sum_{j=1}^{N_j} x_{ij}^n \leq 1, \forall n \in N, i \in I \end{aligned} \quad (7)$$

مسئله (۷) همچنان یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی ترکیبی پیوسته گسسته غیر محدب است که راه حل آن بسیار پیچیده است. در ادامه یک روش برای حل مسئله بررسی می‌شود. ابتدا

شرط سوم محدودیت تداخل دریافتی از دیگر سلول‌ها بر روی سلول ماکرو را بیان می‌کند. شرط چهارم یک حداقل نرخ برای هر کاربر تعیین می‌کند. شرط‌های پنجم و ششم تضمین می‌کنند هر زیرکانال تنها به یک کاربر در هر سلول اختصاص داده شده است. شرط هفتم بیان می‌کند که کاربر  $i$  در هر زیرکانال حداکثر می‌تواند به یک ایستگاه پایه متصل شود.

## ۲-۱- نوآوری

یکی از راهکارهای مؤثر در جهت افزایش نرخ گذردهی شبکه، ایجاد چند پیوندی برای کاربران در یک بازه زمانی است. برخلاف فرض مرسوم که در آن هر کاربر در هر بازه زمانی تنها با یک ایستگاه پایه ارتباط برقرار می‌کند، در حالت چند پیوندی کاربران می‌توانند در آن واحد به چندین ایستگاه پایه به‌طور هم‌زمان متصل شوند و اطلاعات خود را از طریق زیرکانال‌های مختلف به آن‌ها ارسال کنند. این کار انعطاف‌پذیری بیشتری را برای کاربران شبکه فراهم می‌کند که این امر سبب بهبود و افزایش بهره‌وری طیفی می‌شود. در سال‌های اخیر، تحقیقات مختلفی در راستای بهینه‌سازی نرخ در جهت تخصیص زیرکانال و توان انجام گرفته است، اما تعداد کمی از مسائل به بررسی مسئله پیوند کاربر پرداخته‌اند. علاوه بر این، در بیشتر مسائل تخصیص، پیوند کل کاربران به هر سلول به صورت پیش فرض در مسئله در نظر گرفته شده است. بنابراین در این پژوهش تخصیص کاربران در کانال فراسو به صورت یک پارامتر نامشخص مسئله در نظر گرفته شده است.

همچنین با توجه به آنکه مسئله تخصیص منابع در دو جهت فراسو و فروسو امکان‌پذیر است، بررسی این مسئله در کانال فراسو نسبت به کانال فروسو چالش برانگیزتر است و دلیل این امر وجود تداخل بیشتر نسبت به کانال فروسو و همچنین محدودیت توان باتری کاربران در کانال فراسو است. با توجه به مطالب فوق و خلأ تحقیقاتی در این زمینه، در پژوهش پیش رو مسئله تخصیص منابع و مسئله پیوند کاربر در کانال فراسو بررسی شده است. در ادامه نشان داده شده است که مسئله بررسی شده یک مسئله غیر خطی پیوسته-گسسته غیر محدب است که در مقاله پیش رو راهکار مناسبی جهت حل مسئله فوق پیشنهاد شده است.

## ۲-۲- فرمول‌نویسی مسئله

مسئله (۴) در حالت کلی یک مسئله غیر خطی ترکیبی پیوسته گسسته غیر محدب<sup>۱</sup> است و دلیل این امر آن است که اولاً تابع

<sup>1</sup> Mixed Integer Non-Linear Problem (MINLP)

برای سادگی تابع  $\max_{p,x} L(p,x,\lambda)$  تعریف می‌شود. بر این اساس تابع  $\theta(\lambda^*)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\theta(\lambda^*) = \min_{\lambda} \theta(\lambda) = \min_{\lambda} \max_{p,x} L(p,x,\lambda) \leq \max_{p,x} L(p,x,\lambda) \quad (13)$$

قابل توجه است که برای ناحیه  $\forall p \in D, x \in R_1$  عبارت  $R_2: \sum_j \sum_i \sum_n (x_{ij}^n - (x_{ij}^n)^2) \geq 0$  همواره مثبت است. همچنین با توجه به رابطه (۱۱) این عبارت مضرب  $\lambda$  است که دو حالت برای آن در نظر گرفته می‌شود و هر حالت باید بررسی شود.

حالت ۱: ابتدا فرض می‌شود رابطه  $d^* = \sum_j \sum_i \sum_n (x_{ij}^n - (x_{ij}^n)^2) = 0$  با جایگزینی مقدار بهینه  $\lambda$  در مسئله بهینه‌سازی (۱۰)، با توجه به آنکه ضریب  $\lambda$  برابر صفر است بنابراین همواره رابطه زیر مستقل از مقدار  $\lambda$  برقرار است:

$$L(p,x,\lambda) = L(p,x,\lambda^*) = \min_{\lambda} L(p,x,\lambda) \quad (14)$$

با جایگذاری رابطه (۱۴) در سمت راست رابطه (۱۳)، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\min_{\lambda} \max_{p,x} L(p,x,\lambda) \leq \max_{p,x} \min_{\lambda} L(p,x,\lambda) \quad (15)$$

با مقایسه رابطه (۱۲) و رابطه (۱۵) نتیجه زیر برقرار می‌شود:

$$\max_{p,x} \min_{\lambda} L(p,x,\lambda) = \min_{\lambda} \max_{p,x} L(p,x,\lambda) \quad (16)$$

تابع  $\theta(\lambda)$  یک تابع کاهشی یکنواخت نسبت به متغیر  $\lambda$  است. از طرفی دیگر به کمک رابطه (۱۶) می‌توان تساوی زیر را برای رابطه (۱۳) نوشت:

$$\theta(\lambda) = \max_{p,x} \min_{\lambda} L(p,x,\lambda) = \max_{p,x} R(p,x) \quad (17)$$

s.t.  $p \in D, x \in R_1, R_2, \forall \lambda > \lambda^*$

حالت ۲: اگر  $\sum_j \sum_i \sum_n (x_{ij}^n - (x_{ij}^n)^2) > 0$  فرض شود، تابع  $\theta$  در نقطه بهینه  $\lambda^*$  به سمت  $-\infty$  میل می‌کند که این یک تناقض با مسئله بیشینه-کمینه است که  $\theta(\lambda^*)$  از پایین نامحدود است (و مقادیر نرخ از صفر بزرگ‌تر است). بنابراین در نقطه بهینه شرط نامساوی با تساوی  $\sum_j \sum_i \sum_n (x_{ij}^n - (x_{ij}^n)^2) = 0$  برقرار است و نتایج حالت اول برقرار است.

برای سادگی مسئله، شرط پنجم به صورت اشتراک نقاط دو شکل محذب که با دو شرط زیر تعریف می‌شوند، بازنویسی می‌شود:

$$R_1: 0 \leq x_{i,j}^n \leq 1, \forall i, j, n$$

$$R_2: \sum_j \sum_i \sum_n (x_{i,j}^n - (x_{i,j}^n)^2) \leq 0 \quad (8)$$

سپس با در نظر گرفتن  $D$  به عنوان فضای ممکن از مجموعه شرایط اول تا چهارم، مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\max_{p,x} R(p,x)$$

s.t.  $p \in D,$

$$x \in R_1, R_2 \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $R(p,x) = \sum_j \sum_i \sum_n (x_{i,j}^n R_{i,j}^n)$  است. مسئله (۹)، یک مسئله بهینه‌سازی پیوسته نسبت به تمام متغیرها است. هدف اصلی مسئله پیدا کردن یک مقدار گسسته برای  $x_{i,j}^n$  است به گونه‌ای که نرخ گذردهی شبکه بیشینه شود. به این منظور یک تابع جریمه<sup>۱</sup> به مسئله بهینه‌سازی (۹) اضافه می‌شود و مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\max_{p,x} L(p,x,\lambda)$$

s.t.  $p \in D,$

$$x \in R_1 \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $L(p,x,\lambda)$  تابع لاگرانژ است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$L(p,x,\lambda) = R(x,p) - \lambda \sum_j \sum_i \sum_n (x_{ij}^n - (x_{ij}^n)^2) \quad (11)$$

متغیر  $\lambda$  در رابطه فوق ضریب هزینه‌ای است که بسیار بزرگ‌تر از یک است ( $\lambda \gg 1$ ) و طبق روابط زیر اثبات می‌شود که برای مقادیر بسیار بزرگ  $\lambda$ ، معادله‌های (۹ و ۱۰) معادل یکدیگر هستند.

## ۲-۲-۱- بررسی مسئله دوگانی قوی و ضعیف

پاسخ اولیه<sup>۲</sup> مسئله بهینه‌سازی (۱۰) بر طبق مراجع [۱۳ و ۱۴] به صورت  $\max_{p,x} \min_{\lambda} L(p,x,\lambda) = P^*$  است و مسئله دوگان<sup>۳</sup> آن به صورت  $d^* = \min_{\lambda} \max_{p,x} L(p,x,\lambda)$  نوشته می‌شود. بر اساس دوگانی ضعیف [۱۵] رابطه زیر برقرار است:

$$\max_{p,x} \min_{\lambda} L(p,x,\lambda) \leq \min_{\lambda} \max_{p,x} L(p,x,\lambda) \quad (12)$$

<sup>1</sup> Penalty Function

<sup>2</sup> Primal Solution

<sup>3</sup> Dual



به‌طور مشابه،  $Q_{ij}(p)$  نیز به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\tilde{q}_{ij}(p) = q_{ij}(p^{t-1}) + \nabla_p q_{ij}^T(p^{t-1})(p - p^{t-1}) \quad (24)$$

در روابط فوق  $t$  نماد تکرار است و عملگرهای  $\nabla_p$  و  $\nabla_x$  معرف بردار گرادیان برحسب متغیرهای  $p$  و  $x$  هستند. بنابراین با راهکارهای فوق، مسئله غیر محدب به یک مسئله محدب به‌صورت زیر ساده‌سازی می‌شود:

$$\begin{aligned} & \max f(p, x) - \tilde{g}(p, x) \\ \text{s.t.} & \quad \text{C1-C3, C5} \\ & \quad \text{C4: } r_{ij}(p) - \tilde{q}_{ij}(p) \geq R_{\min} \\ & \quad \text{C6: } 0 \leq x_{ij}^n \leq 1 \end{aligned} \quad (25)$$

رابطه (۲۵) یک مسئله بهینه‌سازی محدب را نشان می‌دهد که برای حل آن از الگوریتم نقطه درونی زیر استفاده می‌شود:

- ۱- در نظرگیری یک مقدار اولیه قابل دست‌یافتنی برای بردارهای  $p^t$  و  $x^t$  و برقراری  $t=0$  به‌عنوان نقطه شروع.
- ۲- قرار دادن تکرار  $t = t + 1$ .

۳- به‌روزرسانی مقادیر  $\tilde{q}_{ij}(p)$  و  $\tilde{g}(p, x)$  با استفاده از روابط (۲۳) و (۲۴).

۴- حل مسئله بهینه‌سازی (۲۵-۳) با استفاده از روش نقطه درونی به‌منظور به‌دست آوردن جواب بهینه  $p^t$  و  $x^t$  مرتبط با مسئله (۲۵) در تکرار  $t$ .

۵- تکرار بند ۲ تا همگرایی الگوریتم به گونه‌ای که تغییرات نسبی تابع هدف مسئله (۲۵) از یک حد آستانه

$$\left( \frac{|R^{t+1}(x, p) - R^t(x, p)|}{R^t(x, p)} < 0.01 \right) \text{ کمتر شود.}$$

رابطه (۲۳) یک کران پایین برای مسئله بهینه‌سازی (۲۵) است. زیرا تابع  $g(p, x)$  یک تابع مقعر است و بر اساس شرایط تابع مقعر، رابطه زیر برقرار است:

$$\begin{aligned} g(p, x) & \leq g(p^{t-1}, x^{t-1}) + \nabla_p g^T(p^{t-1}, x^{t-1})(p - p^{t-1}) \\ & \quad + \nabla_x g^T(p^{t-1}, x^{t-1})(x - x^{t-1}) = \tilde{g}(p, x) \end{aligned} \quad (26)$$

تابع هدف در رابطه (۲۶) به‌صورت تفاضل دو تابع مقعر است که از روابط (۲۳ و ۲۵) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\max_{p, x} f(p, x) - g(p, x) \geq \max_{p, x} f(p, x) - \tilde{g}(p, x) \quad (27)$$

در رابطه (۲۷) تساوی هنگامی برقرار است که  $p = p^{t-1}$  و  $x = x^{t-1}$  باشد. بنابراین رابطه (۲۷) یک کران نزدیک پایین برای مسئله است و استفاده از تقریب D.C یک راه حل مناسب برای حل مسئله بهینه‌سازی (۲۵) است.

## ۳-۲- حل مسئله بهینه‌سازی پیوند کاربر، تخصیص

### زیرکانال و تخصیص توان به‌صورت مشترک

در این مقاله، هدف یافتن بهترین پاسخ برای مسئله پیوند کاربر، تخصیص زیرکانال و توان به‌صورت مشترک است به گونه‌ای که مجموع نرخ گذردهی شبکه بیشینه شود، مشروط بر این که توان هر کاربر در تمام زیرکانال‌ها محدود باشد. به بیان ریاضی می‌توان مسئله را به‌صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} & \max_{p, x} \sum_j \sum_i \sum_n R_{ij}^n - \lambda \sum_j \sum_i \sum_n (x_{ij}^n - (x_{ij}^n)^2) \\ \text{s.t.} & \quad \text{C1, C2, C3, C5,} \\ & \quad \text{C6: } 0 \leq x_{ij}^n \leq 1 \end{aligned} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸) نرخ قابل حصول در شبکه را می‌توان به‌صورت تفاضل دو تابع لگاریتمی به‌صورت زیر نوشت:

$$f(p, x) - g(p, x) \quad (19)$$

در این راستا توابع  $f_j$  و  $g_j$  به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$f_j = \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \log_2 \left( p_{ij}^n |h_{i,j}^n|^2 + \sum_{\substack{k \in I \\ j \neq j}} p_{kj}^n |h_{k,j}^n|^2 + \sigma^2 \right) - \lambda \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} x_{ij}^n \quad (20)$$

$$g_j = \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \log_2 \left( \sum_{\substack{k \in I \\ j \neq j}} p_{kj}^n |h_{k,j}^n|^2 + \sigma^2 \right) - \lambda \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} (x_{ij}^n)^2 \quad (21)$$

از آنجا که تابع لگاریتم به‌صورت یک تابع مقعر است، بنابراین تفاضل دو تابع مقعر لزوماً به‌صورت یک تابع محدب نیست. در ادامه با استفاده از تقریب‌های محدب سلسله مراتبی، مسئله بهینه‌سازی با تقریب مناسب به یک رابطه محدب قابل حل تبدیل می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تابع هدف در رابطه (۱۹) به‌صورت تفاضل دو تابع مقعر است. به شیوه‌ای مشابه، شرط ۴ به‌صورت  $I_{ij}(p) - q_{ij}(p)$  بازنویسی می‌شود. برای حل مسئله بهینه‌سازی ابتدا یک نقطه اولیه قابل قبول که در شرایط صدق کند در نظر گرفته می‌شود و سپس مسئله به‌صورت تکراری و مشابه روش مرجع [۱۶] حل می‌شود. در این بخش از بسط تیلور مرتبه اول که یک تقریب خطی برای مسئله است استفاده می‌شود و تابع  $g(p, x)$  به‌صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$\begin{aligned} \tilde{g}(p, x) & = g(p^{t-1}, x^{t-1}) + \nabla_p g^T(p^{t-1}, x^{t-1})(p - p^{t-1}) \\ & \quad + \nabla_x g^T(p^{t-1}, x^{t-1})(x - x^{t-1}) \end{aligned} \quad (23)$$

به دست می‌آید. در شبیه‌سازی، کانال میان کاربر و ایستگاه پایه یعنی  $h_{i,j}^n$  شامل مؤلفه‌های مختلط گوسی با توزیع یکسان و مستقل از هم  $(I.I.D)^2$  با میانگین صفر و واریانس یک در نظر گرفته شده است. بهره کانال کاربران دارای محوشدگی رایلی است و تلفات مسیر آن مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Path Loss^{dB} = PL(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (29)$$

در رابطه (۲۹)،  $d_0$  حداقل فاصله مجاز<sup>۳</sup> هر کاربر از ایستگاه-های پایه میکرو برای برقراری ارتباط است که در اینجا  $10m$  در نظر گرفته شده است و  $PL(d_0) = 50$  تلفات مسیر در فاصله مشخص شده  $d_0$  است. متغیر  $d$  فاصله کاربر تا ایستگاه پایه را نشان می‌دهد. متغیر  $\gamma$  تلفات محیط<sup>۴</sup> است و در فضای آزاد مقدار آن ۲ در نظر گرفته می‌شود.  $X_\sigma$  نیز اثر تصادفی سایه<sup>۵</sup> است که دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس واحد است و  $\sigma^2$  واریانس نویز گوسی سفید جمع شونده (AWGN) است و  $10^{-1}$  در نظر گرفته می‌شود. در ادامه مقادیر متغیرهای شبیه‌سازی در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): متغیرها و مقادیر در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی.

مقدار	متغیرهای شبیه‌سازی
۴	تعداد ایستگاه‌های پایه (J)
۸	تعداد زیرکانال در هر سلول (N)
۸	تعداد کاربران شبکه (I)
۱۸۰ kHz	پهنای باند شبکه (BW)
۲/۵ GHz	فرکانس حامل (fc)
۳۰ dBm	حداکثر توان ارسالی توسط هر کاربر (Pmax)
۰/۵ bps/Hz	حداقل نرخ مورد نیاز هر کاربر (Rmin)
$10^7$	ضریب تابع هزینه ( $\lambda$ )
-۸۰ dBm	حداکثر سطح آستانه تحمل تداخل در شبکه ماکرو (Ith)

### ۳- بررسی پیچیدگی محاسباتی

پیچیدگی محاسباتی مسئله (۲۵) بر مبنای مراجع [۱۳ و ۱۷] به دست آمده است. با توجه به رابطه (۲۵) در راهکار پیشنهادی با فرض آنکه  $I$  حداکثر تعداد کاربران سلول،  $N$  تعداد کل زیرکانال‌ها و  $J$  تعداد کل ایستگاه‌های پایه است، تعداد  $2NJI$  متغیر تصمیم‌گیری و تعداد  $JIN + 2JI + NI + NJ + N + I$  قید خطی و محدب وجود دارد. بنابراین پیچیدگی محاسباتی راهکار پیشنهادی در مسئله (۲۵) به صورت یک چند جمله‌ای<sup>۱</sup> و از مرتبه  $O((2NJI)^3(JIN + 2JI + NI + NJ + N + I))$  است.

### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی تخصیص توأم پیوند کاربر، تخصیص زیرکانال و تخصیص توان به همراه چند روش دیگر مرسوم ارائه شده است. منحنی‌های ارائه شده به طور متوسط برای ۱۰۰۰ بار اجرای برنامه به دست آمده است. در هر بار اجرای برنامه، ضرایب کانال به صورت تصادفی تغییر می‌کند. بنابراین برای اطمینان از عملکرد صحیح الگوریتم‌ها در کانال مخابراتی متغیر با زمان، برنامه به طور مستقل در دفعات زیادی اجرا و نتایج شبیه‌سازی برای متوسط نتایج رسم شده است. به علاوه برای حل مسئله از ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در این شبیه‌سازی، فرکانس حامل  $2GHz$  و پهنای باند در هر زیرکانال  $180kHz$  در نظر گرفته شده است. در این راستا فرض می‌شود شبکه مورد نظر متشکل از چهار میکروسل درون یک ماکروسل است. هر کدام از این ایستگاه‌ها به ۸ زیرکانال دسترسی دارند. شعاع سلولی در ماکروسل و میکروسل به ترتیب  $350m$  و  $50m$  در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد ۸ کاربر به صورت یکنواخت در شبکه توزیع شده است. در این شبیه‌سازی فرض شده است ایستگاه پایه ماکرو در مبدأ مختصات و ایستگاه‌های پایه میکرو با فاصله  $250m$  از مبدأ و با زاویه  $90$  درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند. فاصله هر کاربر تا ایستگاه‌های پایه میکرو به کمک رابطه زیر به دست می‌آید.

$$d = \sqrt{(x_{user} - x_{BS})^2 + (y_{user} - y_{BS})^2} \quad (28)$$

سپس بر مبنای فاصله به دست آمده، میزان افت مسیر محاسبه شده و اثر آن در ماتریس بهره کانال اعمال می‌شود. به کمک این ماتریس، بهره کانال هر کاربر با ۴ ایستگاه پایه میکرو

<sup>2</sup> Independent and Identically Distributed (I.I.D)

<sup>3</sup> Reference Distance for the Antenna Far Field

<sup>4</sup> Path-Loss Exponent

<sup>5</sup> Random Shadowing Effect

<sup>1</sup> Polynomial



زیرکانال به کاربران بدون توجه به شرایط کانال و به صورت تصادفی انجام شده است. همچنین با توجه به کانال‌های تخصیص داده شده به کاربران، تخصیص توان صورت گرفته است.

در منحنی D، مشابه روش C تخصیص زیرکانال به صورت تصادفی صورت گرفته و تخصیص توان نیز به صورت یکسان به کاربران اختصاص یافته است.

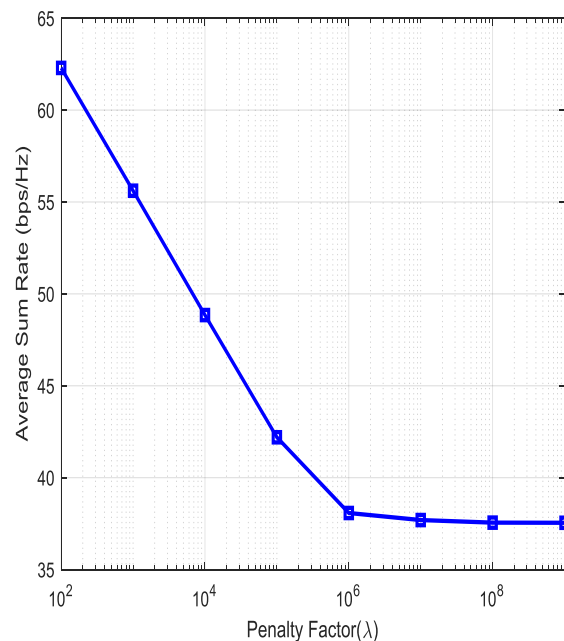
در شکل (۳)، منحنی احتمال امکان‌پذیری<sup>۱</sup> نرخ مجموع کاربران به ازای مقادیر مختلف Pmax برای ۴ روش مختلف ارائه می‌شود که نشان می‌دهد احتمال امکان‌پذیری روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر بالاتر است، زیرا در روش پیشنهادی (A)، پیوند کاربر، تخصیص زیرکانال و تخصیص توان با توجه به دو شرط محدودیت تداخل کاربران ماکرو (شرط C3) و شرط حداقل نرخ کاربران میکرو (شرط C4) انجام می‌شود.

در روش A به دلیل انتخاب مناسب زیرکانال برای کاربر جهت اتصال به ایستگاه پایه مناسب و کنترل توان مناسب، قیود C3 و C4 برآورده شده و احتمال امکان‌پذیری مسئله به یک می‌رسد که نسبت به روش‌های دیگر بالاتر است. در روش B به دلیل آن که تخصیص زیرکانال به نزدیک‌ترین ایستگاه پایه صورت می‌گیرد، توان کمتری مصرف می‌شود و میزان تداخل نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه این راهکار نیز به دلیل برآوردن قیود مسئله بهینه‌سازی، احتمال امکان‌پذیری خوبی دارد و منحنی در مقادیر بالای توان به احتمال یک می‌رسد.

در روش C، با توجه به اینکه بهینه‌سازی تنها بر روی توان صورت می‌گیرد، احتمال امکان‌پذیری آن نسبت به دو روش A و B کمتر است به طوری که این منحنی در Pmax=۳۰dBm به مقدار پیک خود می‌رسد و سپس در مقدار تقریبی ۰/۵۵ ثابت باقی می‌ماند.

در روش D، با توجه به اینکه توان تخصیص داده شده به هر کاربر بدون حل مسئله بهینه‌سازی و مستقیماً تقسیم مقدار Pmax به تعداد زیرکانال‌ها تعیین می‌شود، بنابراین به ازای مقادیر بالاتر از Pmax در نظر گرفته شده، شرط C3 برآورده نشده و در بسیاری از موارد میزان نرخ قابل قبول کاهش یافته و در نتیجه منحنی احتمال امکان‌پذیری در حداکثر مقدار خود در توان ۳۰dBm به مقدار ۰/۵ می‌رسد و سپس سیر نزولی خواهد داشت. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش C احتمال امکان‌پذیری بهتری نسبت به روش D دارد.

در شکل (۲) مجموع میانگین نرخ کاربران برای مقادیر مختلف  $\lambda$  رسم شده است. در این منحنی به ازای مقادیر کوچک  $\lambda$ ، متغیر باینری  $x_{ij}^n$  عددی بین صفر و یک است که در این صورت تابع جریمه  $\sum_j \sum_i \sum_n (x_{ij}^n - (x_{ij}^n)^2)$  بزرگ‌تر از صفر می‌شود و نرخ محاسبه شده معتبر نخواهد بود. اما به ازای مقادیر بزرگ‌تر از  $\lambda = 10^7$ ، متغیر  $x_{ij}^n$  همواره مقداری برابر با صفر یا یک خواهد بود و بنابراین تابع جریمه  $\sum_j \sum_i \sum_n (x_{ij}^n - (x_{ij}^n)^2)$  برابر صفر می‌شود که در این صورت مسائل بهینه‌سازی (۹) و (۱۰) معادل یکدیگر خواهند شد. در شکل (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب تابع جریمه، مجموع نرخ کاربران تغییری نخواهد کرد و نرخ قابل دسترس به ازای  $\lambda \geq 10^7$  برابر  $18/31$  bps/Hz است. این ناشی از آن است که برای مقادیر بزرگ  $\lambda$ ، به علت صفر شدن ضریب  $\lambda$  می‌توان از عبارت تابع جریمه صرف نظر نمود. در ادامه تمامی منحنی‌ها برای مقدار  $\lambda = 10^7$  رسم شده است.

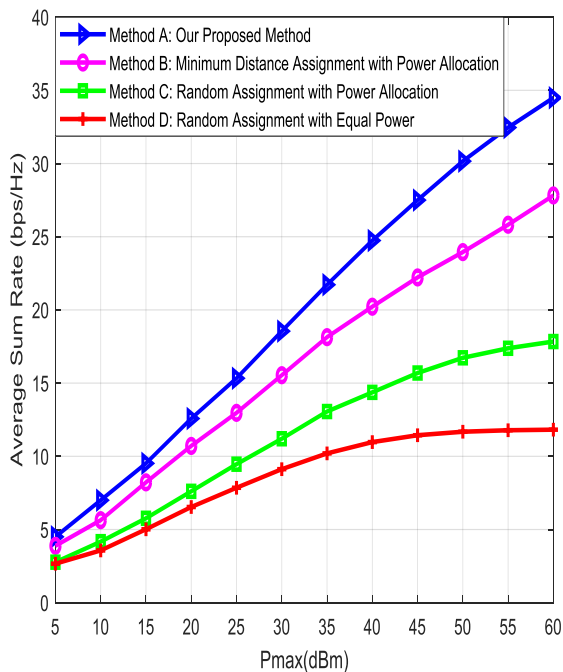


شکل (۲): نرخ مجموع کاربران برای مقادیر مختلف ضریب تابع جریمه با فرض Pmax=30dBm

در ادامه شبیه‌سازی‌ها ضمن بررسی روش پیشنهادی، روش‌های دیگری نیز جهت مقایسه ارائه شده‌اند که در ادامه به شرح هر یک پرداخته می‌شود. روش A، روش پیشنهادی مورد نظر است که در آن تخصیص توأم پیوند کاربر، تخصیص زیرکانال و تخصیص توان به طور هم‌زمان صورت گرفته است. روش B، نتایج عددی حاصل از تخصیص کاربران به نزدیک‌ترین ایستگاه پایه به همراه تخصیص توان نشان می‌دهد. در روش C، تخصیص

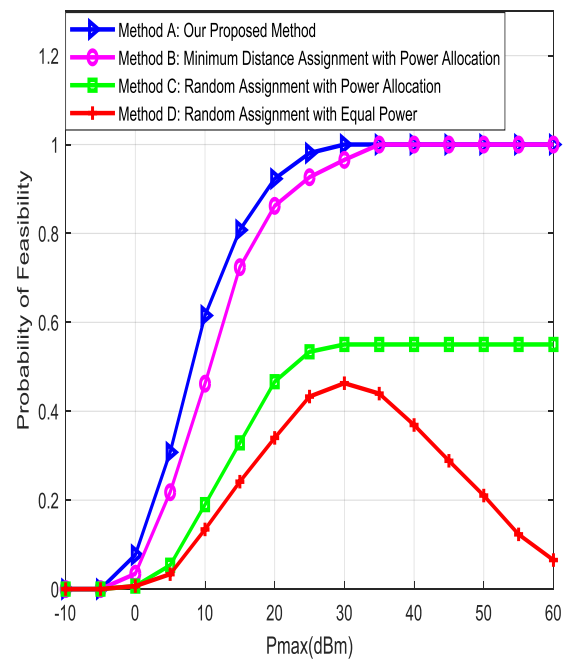
<sup>1</sup> Probability of Feasibility

روش B نسبت به روش A حدود ۲۷٪، روش C نسبت به روش B حدود ۳۰٪ و در نهایت روش D نسبت به روش C تقریباً ۳۱٪ افت داشته‌اند.



شکل (۴): نرخ مجموع کاربران بر حسب مقادیر مختلف Pmax برای روش‌های مختلف.

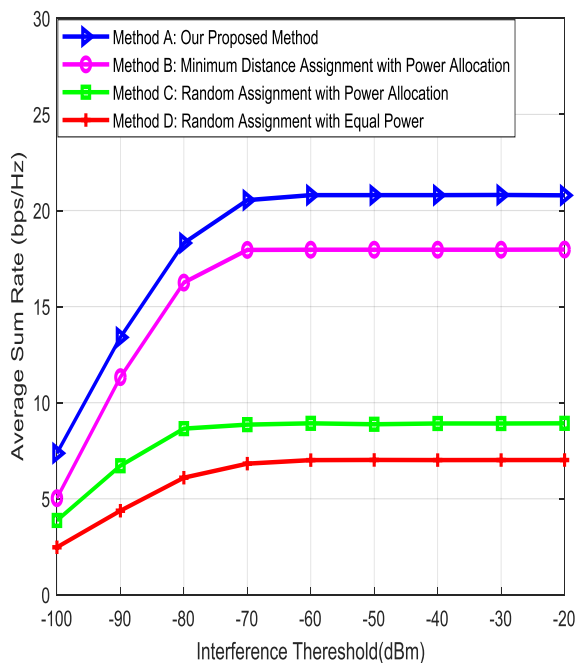
در شکل (۵)، مجموع نرخ کاربران میکرو به ازای مقادیر مختلف حداکثر توان ارسالی هر کاربر ( $P_{max}$ )، با در نظر گرفتن دو شرط حداقل نرخ ارسال  $R_{min}=0.5 \text{ bps/Hz}$  برای کاربران میکرو و محدودیت تداخل  $I_{th}=-80 \text{ dBm}$  برای کاربران ماکرو رسم شده است. در روش A، به ازای مقادیر پایین  $P_{max}$  شرط C1 توان تخصیص داده شده به هر کاربر را تعیین می‌کند، در نتیجه با افزایش  $P_{max}$  مقدار توان تخصیص داده شده به هر کاربر افزایش یافته و نمودار نرخ به صورت صعودی حرکت می‌کند. برای مقادیر  $P_{max}$  بالاتر از  $45 \text{ dBm}$  شرط C3 (شرط محدودیت تداخل روی کاربران ماکرو) تعیین کننده مقدار توان تخصیص داده شده به کاربران خواهد بود. در نتیجه در این حالت با توجه به قید C3 میزان نرخ افزایش نیافته و در توان  $60 \text{ dBm}$  به یک نرخ ثابت برابر  $24/5 \text{ bps/Hz}$  میل می‌کند. در این تفسیر برای روش B نیز صادق است و تنها تفاوت آن این است که در روش B پیوند کاربر صورت نگرفته است و در توان  $60 \text{ dBm}$  به نرخ ثابت  $22/5 \text{ bps/Hz}$  همگرا می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود این روش نسبت به روش A به میزان ۱۰٪ افت عملکرد دارد. در روش C نیز با توجه به اینکه بهینه‌سازی تنها در بخش تخصیص توان صورت گرفته است، منجی در توان  $60 \text{ dBm}$  به مقدار  $14/7 \text{ bps/Hz}$  می‌رسد و ثابت



شکل (۳): احتمال امکان پذیر بودن نرخ مجموع کاربران در روش‌های مختلف با فرض  $R_{min}=0.5$ ،  $n=8$ ،  $j=4$ ،  $i=8$ .

در شکل (۴) مجموع نرخ کاربران میکرو به ازای مقادیر مختلف توان ارسالی هر کاربر ( $P_{max}$ )، بدون در نظر گرفتن شرط‌های C3 و C4 (شرط حداقل نرخ ارسال برای کاربران میکرو و محدودیت تداخل روی کاربران ماکرو) رسم شده است. در شکل (۴) منحنی A، نتایج عددی حاصل از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد که نسبت به روش‌های دیگر مجموع نرخ بالاتری را به دست می‌دهد و نرخ حاصل شده حدود  $35 \text{ bps/Hz}$  است. دلیل این برتری تخصیص چند زیرکانال به کاربر از ایستگاه‌های پایه مختلف و تخصیص توان مناسب است. به ترتیب منحنی B، نتایج عددی حاصل از تخصیص کاربران به نزدیک‌ترین ایستگاه پایه و سپس تعیین توان کاربران در سلول مربوطه را نشان می‌دهد. در این روش به دلیل آنکه تنها یک زیرکانال به کاربر تخصیص یافته است نرخ پایین‌تری نسبت به روش A دارد که نرخ حدود  $25/5 \text{ bps/Hz}$  را نشان می‌دهد. در روش C، تخصیص زیرکانال به کاربران بدون توجه به شرایط کانال و به صورت تصادفی انجام شده است. سپس توان کاربران با توجه به کانال‌های تخصیص داده شده با هدف دستیابی به حداکثر مجموع نرخ کاربران تعیین شده است. در این روش نیز به دلیل آنکه بهینه‌سازی تنها بر روی پایین‌تری حدود  $17/5 \text{ bps/Hz}$  دست یافته است. در منحنی D، با توجه به اینکه بهینه‌سازی بر روی هیچ یک از پارامترها صورت نگرفته و بنابراین پایین‌ترین نرخ را حاصل کرده است که حدود  $12 \text{ bps/Hz}$  است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این شکل،

باقی می‌ماند. این روش نسبت به دو روش دیگر از نرخ پایین‌تری برخوردار است و نسبت به دو روش A و B به ترتیب حدود ۴۰٪ و ۳۴٪ افت عملکرد دارد. در روش D، با توجه به اینکه تخصیص زیرکانال و تخصیص توان برای کاربران بدون حل مسئله بهینه‌سازی صورت گرفته، بنابراین به ازای مقادیر بزرگ  $P_{max}$  و با توجه به برآورده نشدن شرط C3، نسبت به روش C حدود ۹۳٪ افت عملکرد دارد. در نهایت نتیجه نهایی را می‌توان بدین صورت بیان کرد که اولاً این سه عامل با یکدیگر در ارتباط هستند و یکی بدون دیگری نمی‌تواند عملکرد مطلوب را حاصل کند، ثانیاً در صورت نیاز به تعیین اولویت حل مسئله در صورت محدود بودن شرایط به لحاظ پیچیدگی، ابتدا راهکار تخصیص توان، سپس تخصیص زیرکانال و در مرحله آخر راهکار پیوند کاربر پیشنهاد می‌شود.



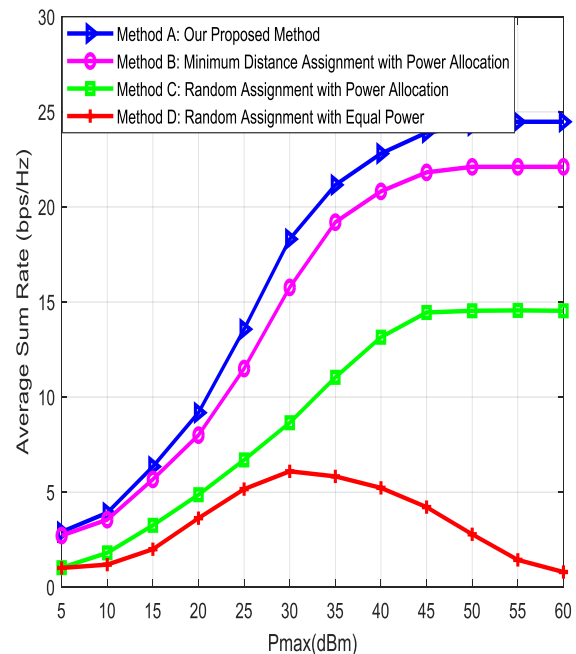
شکل (۶): مجموع نرخ بر حسب سطح آستانه تداخل شبکه،  $i=8, j=4, n=8, R_{min}=0.5$ .

در شکل (۷)، نمودار مجموع نرخ کاربران برای مقادیر مختلف حداقل نرخ برای هر کاربر میکرو ارائه شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش میزان حداقل نرخ لازم برای هر کاربر، مجموع نرخ گذردهی شبکه کاهش می‌یابد و دلیل این امر آن است که با در نظر گرفتن حداقل نرخ برای کاربران، احتمال امکان‌پذیری مسئله محدود می‌شود و این امر سبب محدود شدن پاسخ مسئله بهینه‌سازی می‌شود.

از طرفی برای کاربری که کانال ضعیف‌تری دارد، تعداد زیرکانال‌های بیشتری می‌باید تخصیص داده شود تا شرط حداقل نرخ برآورده شود بنابراین عمده منابع شبکه صرف کاربران با شرایط کانال ضعیف‌تر می‌شود.

شکل (۵): نرخ مجموع کاربران بر حسب مقادیر مختلف توان و با در نظر گرفتن  $i=8, j=4, n=8, R_{min}=0.5$ .



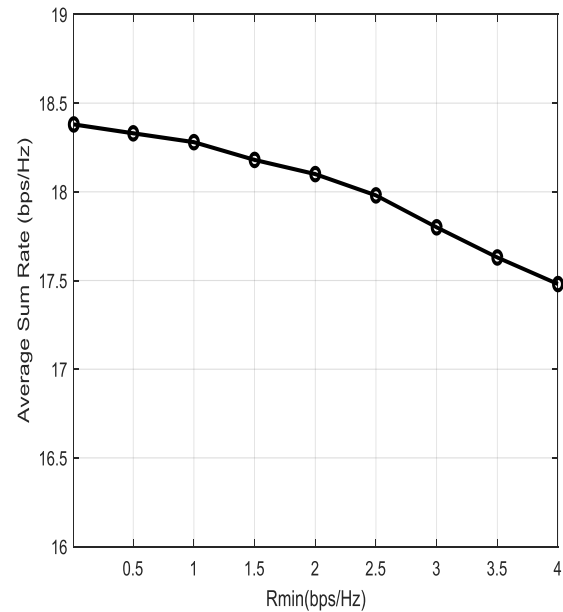
شکل (۵): نرخ مجموع کاربران بر حسب مقادیر مختلف توان و با در نظر گرفتن  $i=8, j=4, n=8, R_{min}=0.5$ .

در شکل (۶) مجموع نرخ کاربران میکرو بر حسب سطح آستانه تداخل شبکه ماکرو با در نظر گرفتن  $P_{max}=30\text{ dBm}$  و  $R_{min}=0.5\text{ bps/Hz}$  و همچنین با در نظر گرفتن قیود C3 و C4 رسم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به ازای مقادیر پایین سطح آستانه تداخل (شرط C3)، توان تخصیص یافته به کاربران محدود شده و مقادیر نرخ شبکه کوچک خواهد بود.

با افزایش سطح آستانه تداخل، میزان توان تخصیص یافته به کاربران افزایش می‌یابد و بنابراین به ازای مقادیر بالاتر از

- Systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 6, pp. 2572-2585, July 2012.
- [3] M. Karimi, S. M. S. Sadough, "Joint Spectrum Sensing and Power Allocation for Multiband Cognitive Radio Networks Using Probabilistic Spectrum Access," J. of Electronic and Cyber Defense, vol. 6, no. 3, pp. 117-130, 2018 (In Persian).
- [4] K. Shen and W. Yu, "A coordinated uplink scheduling and power control algorithm for multicell networks," 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, 2015, pp. 1305-1309.
- [5] J. Fan, D. Lee, G. Y. Li and L. Li, "Multiuser Scheduling and Pairing With Interference Mitigation for LTE Uplink Cellular Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 2, pp. 481-492, Feb. 2015.
- [6] B. Khamidehi, A. Rahmati and M. Sabbaghian, "Joint Sub-Channel Assignment and Power Allocation in Heterogeneous Networks: An Efficient Optimization Method," IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 12, pp. 2490-2493, Dec. 2016.
- [7] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, G. de la Roche, M. Kountouris, T. Q. S. Quek and J. Zhang, "Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks," IEEE Wireless Communications, vol. 18, no. 3, pp. 22-30, Jun. 2011.
- [8] I. Guvenc, "Capacity and Fairness Analysis of Heterogeneous Networks with Range Expansion and Interference Coordination," IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 10, pp. 1084-1087, October 2011.
- [9] Y. Lin, W. Bao, W. Yu and B. Liang, "Optimizing User Association and Spectrum Allocation in HetNets: A Utility Perspective," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 6, pp. 1025-1039, June 2015.
- [10] F. Wang, W. Chen, H. Tang and Q. Wu, "Joint Optimization of User Association, Subchannel Allocation, and Power Allocation in Multi-Cell Multi-Association OFDMA Heterogeneous Networks," IEEE Transactions on Communications, vol. 65, no. 6, pp. 2672-2684, June 2017.
- [11] H. Pervaiz, L. Musavian and Q. Ni, "Joint user association and energy-efficient resource allocation with minimum-rate constraints in two-tier HetNets," IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, 2013, pp. 1634-1639.
- [12] X. Ge, X. Li, H. Jin, J. Cheng and V. C. M. Leung, "Joint User Association and User Scheduling for Load Balancing in Heterogeneous Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 5, pp. 3211-3225, May 2018.



شکل (۷): نرخ مجموع کاربران برای مقادیر مختلف حداقل نرخ با فرض  $i=8, j=4, n=8, P_{max}=30\text{dBm}$

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله مسئله تخصیص توأم پیوند کاربر، زیرکانال و توان در یک شبکه مخابراتی ناهمگون مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا ابتدا به دلیل غیر محدب بودن مسئله مورد نظر، با اعمال تقریب‌های مناسب از جمله تقریب تفاضل دو تابع محدب، این مسئله به یک مسئله شبه محدب که پاسخ آن نزدیک به پاسخ زیربینه است، تبدیل شده و سپس به کمک روش آزادسازی پارامترهای صحیح گسسته و اضافه نمودن یک عبارت جریمه برای تضمین همگرا شدن جواب مسئله حل می‌شود. سپس با کمک روش‌های بازگشتی جواب زیربینه مطلوبی برای آن به دست می‌آید. نتایج حاصل از حل مسئله برای یک شبکه مخابراتی ناهمگون نشان می‌دهد که راهکار پیشنهادی از عملکرد بهتری نسبت به راهکارهای ارائه شده در پژوهش‌های گذشته برخوردار است که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است.

## ۶- مراجع

- [1] H. U. Sokun, E. Bedeer, R. H. Gohary and H. Yanikomeroğlu, "Fairness-oriented resource allocation for energy efficiency optimization in uplink OFDMA networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, 2018, pp. 1-6.
- [2] D. W. K. Ng, E. S. Lo and R. Schober, "Energy-Efficient Resource Allocation for Secure OFDMA

- [16] Y. Sun, D. W. K. Ng, Z. Ding and R. Schober, "Optimal Joint Power and Subcarrier Allocation for Full-Duplex Multicarrier Non-Orthogonal Multiple Access Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 3, pp. 1077-1091, March 2017.
- [17] H. H. Kha, H. D. Tuan and H. H. Nguyen, "Fast Global Optimal Power Allocation in Wireless Networks by Local D.C. Programming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 2, pp. 510-515, February 2012.
- [13] E. Che, H. D. Tuan and H. H. Nguyen, "Joint Optimization of Cooperative Beamforming and Relay Assignment in Multi-User Wireless Relay Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 10, pp. 5481-5495, Oct. 2014.
- [14] D. W. K. Ng, Y. Wu and R. Schober, "Power Efficient Resource Allocation for Full-Duplex Radio Distributed Antenna Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 2896-2911, April 2016.
- [15] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge University Press, 2004.

---

## Joint Optimization of User Association, Subchannel Allocation and Power Allocation in OFDMA Heterogeneous Networks

S. M. Hashemi, S. Akhlaghi Esfehani\*, M. Forouzanmehr

\*Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

(Received: 22/10/2019, Accepted: 01/02/2020)

### ABSTRACT

*This paper investigates joint user association, sub-channel assignment, and power allocation in the uplink of multi-user orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) of a heterogeneous network (HetNet) where users are subject to maximum transmission power constraints. It is shown that the underlying problem is a highly non-convex mixed integer non-linear problem. To tackle the problem, the integer variables are relaxed and a penalty function is added to the objective function to make sure that the relaxed variables take binary values. Finally, the objective function is rewritten as the difference of two convex (D.C.) functions and the resulting problem is addressed through using the successive convex approximation method. It is worth mentioning that, to the best of the author's knowledge, the problem of joint user association, sub-channel allocation, and power control in the uplink of a heterogeneous network has not been addressed in the literature till now. Simulation results demonstrate the superiority of the proposed method over existing works in terms of achieving higher throughput despite exhibiting a higher complexity.*

**Keywords:** User-Association, Subchannel and Power Allocation, Heterogeneous Networks (HetNets), Uplink Network.

---

\* Corresponding Author Email: akhlaghi@shahed.ac.ir