

اختصاص سلول توأمان با مدیریت تداخل در شبکه‌های سلولی ناهمگون با استفاده از الگوریتم توزیع شده

مریم چینی‌پرداز و سیدمجید نورحسینی

را در روش بهینه از نظر طیف فرکانسی و توان سرویس دهند. لذا می‌توان گفت استفاده از شبکه‌های ناهمگون چندرده‌ای^۵ یک راه‌حل قطعی جهت افزایش ظرفیت شبکه‌های سلولی نسل فعلی و نسل آینده می‌باشد. از جمله ایستگاه‌های پایه در شبکه‌های ناهمگون چندرده‌ای می‌توان به ماکرو، پیکو، رله و فمتو اشاره کرد. این ایستگاه‌های پایه در توان ارسال، ناحیه تحت پوشش، تعداد کاربران و گذردهی قابل پشتیبانی، تراکم و نحوه استقرار در شبکه و ... می‌توانند با یکدیگر تفاوت داشته باشند. تفاوت‌های بین ایستگاه‌های پایه مختلف سبب ایجاد چالش‌های جدیدی در شبکه‌های ناهمگون می‌شود که از جمله این موارد بحث اختصاص سلول^۶ و مدیریت تداخل می‌باشد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۱ اختصاص سلول

اختصاص سلول با نام‌های متفاوتی در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله آن می‌توان به انتخاب سلول^۷، انتخاب محل سلول^۸، انتساب سلول^۹، انتساب ایستگاه پایه^{۱۰} و اختصاص کاربر^{۱۱} اشاره کرد. کاربرانی که در محدوده پوشش چند ایستگاه پایه هستند می‌توانند به هر یک از آنها متصل شوند. لذا باید از بین سلول‌ها انتخاب مناسبی انجام گیرد. اختصاص سلول در واقع انتخاب ایستگاه پایه مناسب برای کاربر با توجه به پارامترهای داده شده می‌باشد [۳]. در شبکه‌های مرسوم تک‌رده‌ای روش‌های انتخاب سلول با استفاده از معیارهای انتخابی مانند توان دریافتی سیگنال مرجع^{۱۲} (RSRP)، مقدار سیگنال بر تداخل^{۱۳} (SINR) و کیفیت دریافتی سیگنال مرجع^{۱۴} (RSRQ) رایج می‌باشند [۴]. نشان داده شده است که اختصاص سلول با استفاده از این گونه معیارها می‌تواند گذردهی شبکه را در شبکه‌های تک‌رده‌ای با ترافیک یکنواخت بیشینه سازد [۵].

مطالعات جدید کمی در مسأله اختصاص سلول در شبکه‌های ناهمگون وجود دارد [۶]. از طرف دیگر تحقیقات نشان می‌دهد، روش‌های رایج و کارآمد اختصاص سلول در شبکه‌های مرسوم تک‌رده‌ای برای شبکه‌های ناهمگون مناسب نمی‌باشد. از این رو نیاز جدی به تحقیق و پژوهش برای ارائه روش‌های جدید اختصاص سلول در ارتباط فرسو^{۱۵} (DL) و فراسو

چکیده: به علت رشد درخواست کاربران شبکه‌های سلولی لزوم افزایش ظرفیت این شبکه‌ها همواره مطرح بوده است. شبکه‌های سلولی ناهمگون با به‌کارگیری ایستگاه‌های پایه کوچک در کنار ایستگاه‌های پایه ماکرو راه‌حلی کم‌هزینه و موثر برای این منظور می‌باشند. تفاوت ایستگاه‌های پایه در شبکه‌های ناهمگون چالش‌های جدیدی در زمینه اختصاص سلول و مدیریت تداخل نسبت به شبکه‌های همگون ایجاد کرده است. لذا طراحی روش‌های جدید و کارآمد اختصاص سلول و منابع در این شبکه‌ها از مسائل باز و در حال توسعه می‌باشد. در این مقاله با توجه به کارهای موجود لزوم ارائه راه‌حلی کارآمد که با اختصاص همزمان سلول و زیرباند مناسب به پیشگیری از تداخل برای تمامی کاربران پیرواز، مطرح شده است. مدل تداخل پروتکل و روش‌های مدل‌سازی آن در شبکه‌های سلولی مورد بررسی قرار گرفته است. پس از مدل‌سازی سیستم، مسأله توأمان به صورت یک مسأله بهینه‌سازی عدد صحیح فرموله شده است. سپس با فرموله کردن مجدد مسأله و استفاده از تجزیه یک سطحی دوگان، الگوریتمی با پیچیدگی کارآمد با پاسخ‌های نزدیک به بهینه بدست آورده می‌شود. سپس پروتکل توزیع شده مورد نظر ارائه شده که در آن هر کاربر و هر ایستگاه پایه تنها نیازمند اطلاعات محلی خود بوده و به صورت محلی تصمیم می‌گیرند. نتایج شبیه‌سازی کارآمد بودن راه حل پیشنهادی را تأیید می‌کند.

کلیدواژه: شبکه‌های سلولی ناهمگون، اختصاص سلول، مدیریت تداخل بین سلولی، مدل تداخل، بهینه‌سازی، تجزیه دوگان لاگرانژ.

۱- مقدمه

رشد صعودی تعداد مشترکین شبکه‌های سلولی و همچنین درخواست داده موبایل در سال‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته است [۱]، لذا لزوم افزایش ظرفیت شبکه‌های سلولی را بیش از پیش می‌طلبد. جهت افزایش ظرفیت این شبکه‌ها در آینده لازم است از ترکیب راه‌حل‌های فناوری استفاده شود. این افزایش ظرفیت به جای تکیه بر بهبود کارآمدی طیف^۱ در سطح لینک رادیویی با افزایش کارآمدی کلی شبکه به دست می‌آید. شبکه‌های سلولی ناهمگون^۲ فناوری اساسی در این رابطه می‌باشند [۲]. شبکه‌های ناهمگون دارای معماری چندرده‌ای^۳ متشکل از سلول‌های ماکرو و انواع دیگری از سلول‌های کوچک مجوزدار هستند تا بتوانند با پوشش فراگیر کاربران با نیازمندی‌های کیفیت سرویس^۴ (QoS) متفاوت

این مقاله در تاریخ ۲۳ مرداد ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۶ اسفند ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

مریم چینی‌پرداز (نویسنده مسئول)، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران، (email: m.chinipardaz@jstu.ac.ir).

سیدمجید نورحسینی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، (email: majidnh@aut.ac.ir).

1. Spectral Efficiency
2. Heterogeneous Cellular Network
3. Tier
4. Quality of Service

5. Multi-Tier

6. Cell Association

7. Cell Selection

8. Cell-Site Selection

9. Cell Assignment

10. BS Assignment

11. User Association

12. Reference Signal Received Power

13. Signal-to-Interference-Plus-Noise Power Ratio

14. Reference Signal Received Quality

15. Downlink

یکی از سه بعد زمان، فرکانس و یا فضا و یا کنترل توان ارسال است. این روش پیشگیری از تداخل بین سلولی را تخصیص منبع بین سلولی^۵ می‌نامیم.

در شبکه‌های نسل ۴، طراحی جدید لایه فیزیکی امکان تقسیم‌بندی انعطاف‌پذیر منابع فرکانس و زمان را می‌دهد. این انعطاف‌پذیری به ایستگاه‌های پایه امکان اختصاص بلوک‌منبع‌های^۶ متفاوت را به کاربر مورد نظرشان می‌دهد. حال مدیریت تداخل بین سلول‌ها می‌تواند با استفاده از مدیریت تخصیص بلوک‌منبع‌ها بین سلول‌ها انجام شود. در دامنه زمان، می‌توان اسلات‌های زمانی را به عنوان بلوک‌منبع در نظر گرفت. در شبکه‌های LTE^۷ زمان به زیرفریم‌هایی با مدت زمان ۱ میلی‌ثانیه تقسیم می‌شود [۱۰] و هر زیرفریم یک بلوک‌منبع زمان می‌باشد. در مدل استقرار هم‌کانال تمامی سلول‌ها از کل پهنای باند استفاده می‌کنند که به M زیرباند با پهنای باند B تقسیم شده است. لذا در بعد فرکانس نیز هر زیرباند یک بلوک‌منبع فرکانس به حساب می‌آید. در برخی روش‌ها هر زیرباند در هر زیرفریم به عنوان یک بلوک‌منبع زمان-فرکانس در نظر گرفته می‌شود.

اختصاص سلول و مدیریت تداخل هر دو از موضوعات پراهمیت در شبکه‌های سلولی بوده و اهمیت این دو در شبکه‌های ناهمگون بیشتر بوده و با چالش‌های جدیدی روبه‌رو است. در این پژوهش نیز از روش‌های تخصیص منابع بین سلولی برای پیشگیری از تداخل‌های بین سلولی استفاده می‌شود. دو مسأله تخصیص منابع بین سلولی و اختصاص سلول می‌توانند به صورت توأمان^۸ یا جداگانه^۹ در شبکه اعمال شوند. روش‌های جداگانه خود به دو دسته تقسیم می‌شوند. در برخی کارها، روش‌های تخصیص منبع بین سلولی با فرض این که اختصاص سلول از قبل انجام شده و ایستگاه پایه هر کاربر مشخص است، مورد بررسی قرار گرفته است. در برخی مطالعات عکس این فرض وجود دارد، روش اختصاص سلول به گونه‌ای انجام می‌شود که منابع بین سلولی از قبل تخصیص داده شده‌اند و تقسیم‌بندی منابع صورت گرفته است.

انتخاب بهینه هر یک از این دو مسأله اختصاص سلول و تخصیص منابع بین سلولی به وضعیت دیگری وابسته است. اختصاص سلول هر کاربر به میزان منبع قابل دستیابی از هر سلول و لذا به نحوه تقسیم‌کردن منابع بین سلول‌ها بستگی دارد. از طرف دیگر، تخصیص منبع بین سلولی که هدف آن تقسیم‌کردن برخی منابع بی‌سیم میان سلول‌ها است به کاربران تخصیص یافته به هر سلول بستگی دارد. لذا جهت دست‌یافتن به پاسخی بهینه برای اختصاص سلول کاربران و مدیریت تداخل بین سلولی باید این دو مقوله توأمان در نظر گرفته شوند.

۳-۱ مرور ادبیات

در تحقیقات اخیر در زمینه مدیریت تداخل بین سلولی از بلوک‌منبع‌های حفاظت‌شده استفاده شده است. بدین صورت که زیرفریم‌های مشخصی تعریف شده‌اند که سلول‌های ماکرو در آن زیرفریم‌ها ارسال نمی‌کنند. این زیرفریم‌ها همان منابع حفاظت‌شده برای سلول‌های کوچک‌تر می‌باشند تا ارسال‌هایشان را در آن زمان‌بندی کرده تا از تداخل پیشگیری کنند. روش مدیریت تداخل در [۴] بر مبنای بلوک‌منبع‌های حفاظت‌شده ثابت

(UL)^۱ در این شبکه‌ها وجود دارد. در این پژوهش هدف بررسی اختصاص اختصاص کارآمد سلول در شبکه‌های سلولی ناهمگون با هدف افزایش بهره‌وری شبکه است.

در شبکه مورد نظر نحوه استقرار ایستگاه‌ها از نوع هم‌کانال بوده که در آن همه سلول‌ها از باند فرکانسی مشترکی استفاده می‌کنند. این روش استقرار به دلیل کارآمدی بیشتر استفاده از طیف، رایج‌تر می‌باشد. همچنین روش دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد^۲ (OFDMA) که فناوری فناوری برگزیده نسل چهارم و نسل‌های بعدی شبکه‌های سلولی است برای نحوه دسترسی کاربران به طیف انتخاب شده است.

شبکه‌های ناهمگون به علت تفاوت بسیار در توان ارسال میان ایستگاه‌های پایه از رده‌های مختلف با چالش عدم توازن بار روبه‌رو هستند. با استفاده از معیارهای سنتی مرسوم مانند RSRP یا SINR، کاربران اغلب به ایستگاه‌های پایه با توان ارسال بالاتر (سلول ماکرو) متصل می‌شوند که در نتیجه آن از منابع و ظرفیت سلول‌های کوچک‌تر استفاده نمی‌شود. عدم توازن بار یکی از دلایل اصلی برای کاهش کارایی در سطح سیستم است [۷]. روش‌های توازن بار که سعی در سوق‌دادن کاربران برای اتصال به سلول‌های کوچک‌تر دارند هم‌زمان با اختصاص سلول انجام می‌پذیرند و می‌توان آن را چون رویکرد یا قاعده‌ای دید که انتخاب سلول باید بر مبنای آن باشد. کاربرانی که با اعمال رویکرد توازن بار با وجود دریافت سیگنال قوی‌تر از ایستگاه پایه بزرگ‌تر به ایستگاه پایه کوچک‌تر متصل شده‌اند، اصطلاحاً کاربران انتقالی^۳ نامیده می‌شوند. در [۸] توضیحات بیشتر را در زمینه مفهوم دقیق‌تر توازن بار و روش‌های مختلف اعمال آن در شبکه‌های ناهمگون ارائه داده‌ایم.

۲-۱ مدیریت تداخل بین سلولی

در شبکه چندسلولی با فناوری OFDMA زیرباند‌های فرکانسی اختصاص داده شده به کاربران یک سلول متعامد می‌باشند، لذا تداخل درون سلولی وجود ندارد. اما به دلیل استفاده از روش استقرار هم‌کانال، زیرباند‌های مشابه ممکن است توسط سلول‌های متفاوت به صورت هم‌زمان استفاده شده و لذا تداخل بین سلولی^۴ (ICI) ایجاد شود که مسأله مسأله پراهمیتی در این گونه شبکه‌ها می‌باشد.

عوامل گوناگونی سبب تشدید تداخل بین سلولی در شبکه‌های ناهمگون نسبت به شبکه‌های تک‌رده‌ای می‌شود که از جمله آنها می‌توان به سیاست‌های محدودکننده دسترسی برخی ایستگاه‌های پایه، اعمال روش‌های توازن بار و درگیر تداخل‌بودن همه کاربران (نه تنها کاربران مرزی) اشاره کرد [۸]. تداخل ایجادشده برای سلول‌ها مهم‌ترین منبع کاهش ظرفیت و ایجاد محدودیت در نرخ داده قابل دستیابی است [۷] و [۹]. لذا مدیریت تداخل بین سلولی یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین چالش‌های موجود در شبکه‌های سلولی چندرده‌ای با فناوری OFDMA است. در ادامه روش‌های مدیریت تداخل در این نوع شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شبکه‌های بی‌سیم تداخل در صورتی ایجاد می‌شود که گیرنده‌ای بیش از یک سیگنال در دامنه فرکانسی مشابه به طور هم‌زمان دریافت کند. با توجه به این حقیقت، یکی از استراتژی‌های مدیریت تداخل پیشگیری از ایجاد تداخل میان سیگنال‌ها با استفاده از تقسیم‌کردن

5. Inter-Cell Resource Allocation
6. Resource Blocks
7. Long Term Evolution
8. Jointly
9. Separately

1. Uplink
2. Orthogonal Frequency Division Multiple Access
3. Off-Loaded
4. Inter-Cell Interference

مدل سیستم و راه حل پیشنهادی آنها دارای فرضیاتی محدودکننده است. در [۱۴] اختصاص سلول برای تمامی کاربران صورت نمی‌گیرد زیرا که کاربران ایستگاه پایه ماکرو از قبل مشخص بوده و تنها کاربران ایستگاه‌های پایه کوچک‌تر تخصیص داده می‌شوند. همچنین راه حل پیشنهادی آن تنها از کاربران ایستگاه پایه ماکرو در برابر تداخل محافظت کرده است.

برخی مقالات معماری‌های خاصی از شبکه‌های ناهمگون در نظر گرفته که سبب محدودشدن راه‌حل آنها به شبکه‌های ناهمگون مشخصی می‌شود، مانند [۱۵] و [۱۶] که شبکه‌ای دوره‌ای با تنها یک ایستگاه پایه ماکرو را در نظر می‌گیرند. همچنین در [۱۵] روش استقرار هم‌کانال جزئی برای تخصیص زیرباندها بین ایستگاه پایه ماکرو و ایستگاه‌های پایه کوچک در نظر گرفته شده که نیازمند روش مدیریت تداخل متفاوتی با روش استقرار هم‌کانال است.

در [۸] در مورد سناریوهای متفاوت که منجر به تشدید انواع تداخل‌های بین سلولی در شبکه‌های ناهمگون می‌شود بحث شده است. با توجه به کارهای موجود می‌توان نتیجه گرفت که جهت دستیابی به گذردهی بیشینه در شبکه لزوم ارائه راه‌حلی جامع جهت اختصاص سلول توأمان با مدیریت تداخل که تمامی کاربران مستعد تداخل از تمامی رده‌ها را مدیریت تداخل کند وجود دارد.

در این تحقیق برای کنترل تداخل از روشن- خاموش کردن بلوک‌منبع‌های زمان- فرکانس استفاده می‌شود. بلوک‌منبع فرکانس همان زیرباند بوده و بلوک‌منبع زمان نیز مدت تکرار اجرای الگوریتم تخصیص منابع است. لذا این پژوهش به بررسی راه‌حلی جهت تخصیص سلول به هر کاربر و همچنین در هر سلول تخصیص منبع زیرباند به کاربران آن سلول به صورت توأمان می‌پردازد.

۱-۴ ساختار مطالب و دستاوردها

ساختار مطالب در ادامه مقاله بدین شرح است که در بخش دوم مقاله مدلی انعطاف‌پذیر از شبکه ناهمگون چندرده‌ای به همراه توابع مورد نیاز ارائه شده است. مدل تداخل سیستم مورد نظر شرح داده شده و لیستی از انواع روش‌های مدل‌کردن محدودیت تداخل جهت اعمال مدیریت تداخل در شبکه سلولی ارائه شده است. گراف تداخل و گروهک‌های بیشین شرح داده شده و همچنین الگوریتمی جهت یافتن گروهک‌های بیشین در گراف تداخل شبکه سلولی ارائه شده است.

در بخش سوم مسأله اختصاص سلول و زیرباند در شبکه ناهمگون با استفاده از تئوری بهینه‌سازی فرموله‌سازی می‌شود و در مورد انتخاب تابع هدف مناسب آن نیز بحث می‌شود. مسأله فرموله‌شده ترکیبیاتی و لذا مسأله‌ای سخت می‌باشد. با استفاده از روش آزادسازی، مسأله محذب شده که با حل آن می‌توان کران بالایی برای مجموع نرخ قابل دستیابی شبکه به دست آورد. با این حال در سیستم واقعی یافتن گروهک‌های بیشین و تقسیم زمانی متغیر اختصاص کار مشکلی بوده و نیازمند استفاده از گره مرکزی و سیستم‌های سنکرون‌سازی است. لذا جهت یافتن الگوریتم توزیع‌شده کارآمد در بخش چهار ابتدا از محدودیت تداخل مناسب‌تری استفاده شده و سپس مسأله معادل به دست آمده با استفاده از تجزیه دوگان لاگرانژ تجزیه شده است.

الگوریتم پیشنهادی توأمان به اختصاص سلول و زیرباند در شبکه ناهمگون می‌پردازد. پروتکل توزیعی و تحلیل آن در ادامه همان بخش ارائه می‌شود. این الگوریتم پیچیدگی و میزان سیگنالینگ پایینی داشته و همچنین به دلیل معماری توزیع‌شده مناسب برای پیاده‌سازی در شبکه‌های

است. در این مقاله تخصیص منابع بین سلولی برای پیشگیری از تداخل سلول ماکرو بر سلول‌های کوچک‌تر از قبل یعنی پیش از اختصاص سلول انجام شده است. در [۴] جهت اختصاص سلول و سوق‌دادن کاربران برای اتصال به سلول‌های کوچک‌تر از ایده توسعه محدوده سلول (CRE) استفاده شده است. بدین صورت که کاربر قبل از مقایسه معیار مورد نظر از ایستگاه‌های پایه متفاوت مقدار بایاسی را در معیار انتخابی سلول‌های کوچک‌تر متناسب با رده آنها ضرب می‌کند.

در [۷] و [۱۱] از تکنیک روش استفاده مجدد فرکانس جزئی (FFR) برای مدیریت تداخل استفاده شده است، بدین صورت که تقسیم‌بندی زیرباندها ثابت بوده و قبل از اختصاص سلول انجام گردیده است. این دو مقاله همچنین توازن بار را به صورت انصاف نسبی در توزیع نرخ میان کاربران در مسأله فرموله‌شده اعمال کرده و الگوریتم‌هایی ابتکاری برای اختصاص سلول ارائه کرده‌اند.

در برخی مطالعات انتخاب بلوک‌منبع‌های حفاظت‌شده به روش پویاتری صورت می‌گیرد. مؤسسه ۳GPP در استانداردسازی LTE-A از ایده CRE برای مشکل عدم توازن بار در ارتباط فرسو استفاده کرده است. همچنین برای مدیریت تداخل از زیرفریم‌های حفاظت‌شده استفاده کرده است و این روش را زیرفریم‌های تقریباً خالی (ABS) می‌نامد به طوری که زیرفریم‌های خاصی توسط ایستگاه‌های پایه بدون بایاس خالی^۴ باقی مانده و کاربران انتقالی در این زیرفریم‌ها زمان‌بندی می‌شوند تا از تداخل پیشگیری شود [۵]. از طرفی ایستگاه پایه ماکرو ایستگاه‌های پایه کم‌توان را از زیرفریم‌های خالی آگاه می‌سازد و همچنین در بازه‌های زمانی مشخصی تعداد این زیرفریم‌ها را با توجه به شرایط شبکه و ترافیک تنظیم می‌کند [۱۲].

در [۶] شبکه چندرده‌ای با فناوری CDMA در نظر گرفته شده و با استفاده از بهینه‌سازی به راه‌حلی کارآمد در زمینه اختصاص سلول با رویکرد توازن بار میان رده‌ها دست یافته است. مرجع [۱۳] مطالعات [۶] را بسط داده تا بتواند هم‌زمان به مدیریت تداخل بین سلولی نیز دست یابد. این مقاله از پیکربندی سنکرون استفاده کرده که در آن همه ایستگاه‌های پایه ماکرو بلوک‌منبع‌های خاموش یکسانی دارند. به دست آوردن مدت زمان خاموشی سلول‌های ماکرو از اهداف این مرجع است، لذا به طور توأمان به بهینه‌سازی دوره خاموشی بلوک‌منبع و اختصاص سلول می‌پردازد. تابع هدف مسأله بهینه‌سازی تعریف‌شده به توازن بار در شبکه منجر می‌شود. مسأله بهینه‌سازی توأمان به دست آمده ترکیبیاتی بوده اما با آزادسازی شرط اختصاص هر کاربر حداکثر به یک ایستگاه پایه در آن واحد، یک کران بالا برای بهره‌وری شبکه به دست می‌آورد.

در اکثر تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه از بلوک‌منبع‌های حفاظت‌شده سلول ماکرو استفاده شده است. استفاده از بلوک‌منبع‌های حفاظت‌شده سلول ماکرو تنها از تداخل بین سلول‌های ماکرو و سلول‌های کوچک‌تر پیشگیری می‌کند. در حالی که تداخل بین سلول‌های کوچک‌تر از دو رده متفاوت و حتی سلول‌های رده مشابه را پیشگیری نمی‌کند و همچنین از تداخل سلول کوچک‌تر بر سلول ماکرو نیز در برخی موارد پیشگیری نمی‌کند.

برخی مقالات جدیدتر نیز سعی در اختصاص سلول و منابع دارند اما

1. Cell Range Expansion
2. Fractional Frequency Reuse
3. Almost Blank Subframe
4. Blank

جدول ۱: لیست علائم.

علائم	توضیحات
$B = \{j_1, j_2, \dots\}$	مجموعه ایستگاه‌های پایه
$U = \{i_1, i_2, \dots\}$	مجموعه کاربران
$M = \{m_1, m_2, \dots\}$	مجموعه زیرباند‌های موجود
P_{jm}	توان ایستگاه پایه j روی زیرباند m
h_{ji}	بهره کانال بین ایستگاه پایه j و کاربر i
σ^2	توان نویز
R_{ji}^m	نرخ قابل دستیابی کاربر i از ایستگاه پایه j روی زیرباند m
R_i	نرخ کلی کاربر i

روی زیرباند m متصل است و در غیر این صورت $x_{ji}^m = 0$. در این مدل با استفاده از مدیریت تخصیص زیرباند‌ها در سلول‌های مجاور از تداخل‌های مؤثر پیشگیری می‌شود. به صورت کلی مقدار سیگنال بر تداخل هر کاربر به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\gamma_{ji}^m = \frac{P_{jm} h_{ji}}{\sum_{k \neq j} P_{km} h_{ki} + \sigma^2} \quad (1)$$

با توجه به این که در سیستم مورد نظر از ارتباط‌های متداخل پیشگیری می‌شود، لذا مخرج کسر (۱) به عبارت σ^2 کاهش می‌یابد. در صورت اتصال کاربر i به ایستگاه پایه j روی زیرباند m نرخ قابل دستیابی آن طبق فرمول شانون به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$R_{ji}^m = W \log_2(1 + \gamma_{ji}^m) \quad (2)$$

که W پهنای باند هر زیرباند است. با توجه به مدل سیستم مورد نظر در هر بازه زمانی با مقادیر ثابت بهره کانال، R_{ji}^m دارای مقدار ثابتی می‌باشد. نرخ کلی کاربر i با R_i نشان داده شده که $R_i = \sum_j \sum_m x_{ji}^m R_{ji}^m$.

۲-۲ مدل و محدودیت تداخل

در این مقاله از مدل تداخل پروتکل استفاده شده [۱۸] که مناسب شبکه‌های بی‌سیم با فناوری OFDMA می‌باشد. در مدل تداخل پروتکل در شبکه‌های سلولی و ارتباط فرسوسو، برای هر کاربر و هر ایستگاه پایه یک مجموعه تداخل تعریف می‌کنیم.

تعریف ۱) مجموعه ایستگاه‌های پایه‌ای که سیگنال ارسالیان برای کاربر i قابل دریافت بوده و در واقع برای این کاربر می‌توانند تداخل داشته باشند و یا به این کاربر ارسال داده داشته باشند را با BI_i نشان داده و مجموعه ایستگاه‌های پایه ناحیه تداخل کاربر i می‌نامیم. ایستگاه‌های پایه عضو ناحیه تداخل یک کاربر با توجه به توان دریافتی کاربر از هر ایستگاه پایه تعیین می‌شود که خود تابعی است از توان ارسالی ایستگاه پایه و بهره کانال بین آن دو.

تعریف ۲) از طرف دیگر برای هر ایستگاه پایه j نیز ناحیه تداخل UI_j تعریف می‌شود که شامل تمامی کاربرانی بوده که ایستگاه پایه j می‌تواند با سیگنال‌های ارسالی خود برای آنها ایجاد تداخل کرده و یا ارسال داده داشته باشد.

در مدل تداخل سیستم مورد نظر، لینک (j, i) و (k, z) با یکدیگر تداخل دارند در صورتی که ارسال‌کننده هر یک عضو ناحیه تداخل دریافت‌کننده دیگری باشد و به عبارت دقیق‌تر $j \in BI_z$ یا $k \in BI_i$. مدیریت تداخل در هر بازه زمانی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که برای ارسال ایستگاه پایه j به کاربر i بر روی زیرباند m ، سایر لینک‌های تداخلگر آن خاموش بوده که این کار با استفاده از خاموش کردن ارسال ایستگاه‌های پایه تداخلگر (یعنی $k \in BI_i$) بر روی زیرباند m انجام می‌گیرد. برای مدل‌سازی این روش از محدودیتی به نام محدودیت تداخل بهره می‌بریم. این محدودیت در برخی مراجع محدودیت ظرفیت نیز نامیده می‌شود [۱۹].

متغیر x که آرایه‌ای از متغیرهای باینری است، در واقع مجموعه اتصال‌های شبکه را نشان می‌دهد به طوری که مقدار یک و صفر متغیر x_{ji}^m به ترتیب برقراری و عدم برقراری اتصال بر روی لینک (j, i) در زیرباند m را نشان می‌دهد.

تعریف ۳) یک مجموعه اتصال در سیستم گسسته شدنی است هرگاه لینک‌های فعال آن بتوانند به طور هم‌زمان ارسال داشته باشند. به عبارت

ناهمگون می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های جهت مقایسه نتایج الگوریتم با پاسخ بهینه و بررسی رفتار الگوریتم در بخش پنجم آورده شده است. در بخش ششم، جمع‌بندی کلی و نتیجه‌گیری از بحث‌های مطرح شده ارائه می‌شود.

۲-۲ مدل سازی سیستم

در این بخش سیستم مورد نظر و شبکه ناهمگون مدل‌سازی شده و فرضیات سیستم ارائه می‌شود. سپس مدل تداخل سیستم ارائه گردیده و مفهوم گروهک بیشین که در فرموله‌سازی مسأله مورد نیاز است، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. لیست علائم مورد استفاده در این مقاله در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۱ مدل و فرضیات سیستم

شبکه ناهمگونی از K رده را در نظر می‌گیریم که هر رده یک نوع خاصی از ایستگاه پایه را مدل می‌کند. ناهمگونی شبکه که در واقع تفاوت در ایستگاه‌های پایه و تفاوت بین رده‌ها است با استفاده از مقادیر متفاوت پارامترهایی مانند توان بیشینه و همچنین تفاوت در تراکم فضایی ایستگاه‌های پایه در رده‌های مختلف مدل می‌شود. هر ایستگاه پایه در حالت ارسال بر روی هر زیرباند دارای توان ثابت بوده و در غیر این صورت دارای توان صفر است.

به دلیل تفاوت مرز گذر ارتباط فراسو و فرسوسو در شبکه‌های ناهمگون، استفاده از راه‌حل‌های اختصاص سلول که در آن کاربر بتواند در ارتباطات فراسو و فرسوسوی خود به دو ایستگاه پایه متفاوت متصل شود، به کارایی بیشتری منجر می‌شود. این شیوه هر چند چالش‌های جدیدی را به همراه دارد اما انتظار می‌رود در نسل پنجم شبکه‌های سلولی چندرده‌ای به کار گرفته شود [۵] و [۱۷]. در این مقاله ارتباط فرسوسو در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌کنیم در ارتباط فرسوسو هر ایستگاه پایه دارای بافرهای پر برای ارسال به کاربران می‌باشد.

هر کاربر در آن واحد تنها می‌تواند به یک ایستگاه پایه متصل باشد. فناوری رادیویی مورد استفاده OFDMA است، لذا در هر سلول هر زیرباند تنها به یک کاربر اختصاص می‌یابد. ایستگاه‌های پایه محدودیتی برای دسترسی کاربران ندارند و در واقع در مد دسترسی باز می‌باشند. با توجه به تعداد زیرباند‌هایی که می‌تواند به کاربر متصل اختصاص یابد، دو حالت یک زیرباند و یا بیش از یک زیرباند را می‌توان در نظر گرفت. در این مقاله فرض می‌شود حداکثر یک زیرباند به هر کاربر می‌تواند اختصاص یابد.

شناسه‌های اختصاص $\{x_{ji}^m\}$ نمایانگر اختصاص سلول بر روی هر زیرباند بوده بدین صورت که $x_{ji}^m = 1$ هرگاه کاربر i به ایستگاه پایه j

جدول ۲: انواع روش‌های بیان محدودیت تداخل در شبکه سلولی.

سیستم پیوسته		سیستم گسسته		محدودیت تداخل	
شرط لازم	شرط کافی	شرط لازم	شرط کافی		
بله	خیر	بله	خیر	$\sum_{k \in BI_i} x_{ki}^m \leq 1, \forall i, m$	(۳) محدودیت هر گیرنده
خیر	خیر	بله	بله	$\sum_{k \in BI_i} x_{ki}^m \leq (1 - \sum_j x_{ji}^m)M + 1, \forall i, m$	(۴) محدودیت شرطی هر گیرنده
خیر	بله	بله	بله	$x_{ji}^m + \sum_{k \in BI_i - \{j\}} x_{ki}^m \leq 1, \forall i, m, j, k \in BI_i - \{j\}$	(۵) محدودیت هر اتصال
خیر	بله	بله	بله	$\sum_{i \in UI_j} x_{ji}^m + \sum_{i \in UI_{j,k}} x_{ki}^m \leq 1, \forall m, j, k \in B - \{j\}$	(۶) محدودیت دو ایستگاه پایه
با تنظیم β		$\beta = 1$		$\sum_{(j,i) \in Q_n} x_{ji}^m \leq \beta, \forall Q_n \in \Phi, \forall m$	(۷) محدودیت گروهک بیشین مقیاس‌پذیر
بله	محدوده ثابت	بله	بله		

دیگر هیچ دو لینکی از آن با یکدیگر تداخل نداشته باشند. سلولی با یکدیگر تداخل داشته باشند.

در صورتی که $\Phi = \{Q_1, Q_2, \dots\}$ مجموعه همه گروهک‌های بیشین در گراف تداخل شبکه سلولی مورد نظر را نشان دهد، محدودیت (۷) بیان می‌دارد که برای هر زیرباند m مجموع متغیرهای اختصاص مربوط به لینک‌های درون هر گروهک بیشین Q_n در درخت تداخل از مقدار β تجاوز نکند. محدودیت (۷) در واقع محدودیت "گروهک بیشین مقیاس‌پذیر"^۲ نامیده می‌شود.

دو مسأله در رابطه با استفاده از محدودیت (۷) وجود دارد. مسئله اول یافتن مقدار مناسب β برای مقیاس هست. این محدودیت بدون مقیاس‌پذیری (در صورتی که $\beta = 1$ باشد) در سیستم گسسته شرط لازم و کافی است اما در سیستم پیوسته شرط لازم بوده و تنها در گراف‌های آرمانی^۳ شرط کافی نیز می‌باشد. گراف تداخل سیستم مورد مطالعه ما لزوماً یک گراف آرمانی نمی‌باشد. همان طور که در [۲۰] نشان داده شده است برای این که این محدودیت برای گراف مورد مطالعه شرط کافی شود لازم است که با β مقیاس شود که مقدار آن به نسبت بین عدد رنگی گراف تداخل $\chi(IG)$ و بزرگ‌ترین اندازه گروهک گراف تداخل $\kappa(IG)$ که در بین تمام بردارهای اتصال ممکن بیشینه شده باشد، بستگی دارد. با انتخاب β مناسب محدودیت گروهک بیشین مقیاس‌پذیر شرط کافی شده اما لزوماً شرط لازم نمی‌باشد و در یک محدوده ثابت از شرط‌های لازم محدودیت گروهک بیشین قرار می‌گیرد.

مسأله بعدی نحوه یافتن گروهک‌های بیشین در گراف تداخل شبکه مورد نظرمان است. در این مقاله الگوریتم MCF را به منظور یافتن گروهک‌های بیشین در گراف تداخل شبکه‌های سلولی ارائه داده‌ایم که شبه‌کد آن در الگوریتم ۱ نمایش داده شده است. در این الگوریتم برای هر زیرمجموعه $CliqueBSs$ از مجموعه ایستگاه‌های پایه گروهک‌های بیشین مربوط را تشکیل می‌دهد. در این شبه‌کد n شماره گروهک بیشین را نشان می‌دهد. در خط ۳ مجموعه تمام کاربران در ناحیه تداخل تمامی ایستگاه‌های $CliqueBSs$ را می‌یابیم. سپس در خط ۵ این مجموعه کاربران را هر بار با تمام کاربران ناحیه تداخل یکی از ایستگاه‌های $CliqueBSs$ در نظر گرفته و آن را $CliqueUsers$ می‌نامیم. در خط ۶ تمامی اتصال‌های بین ایستگاه‌های $CliqueBSs$ و کاربران $CliqueUsers$ یک گروهک بیشین را تشکیل می‌دهد.

در سیستم پیوسته که با آزادسازی متغیر x به دست می‌آید، مقادیر این آرایه مقدار پیوسته‌ای در بازه $[0, 1]$ می‌گیرند. در این صورت متغیر x_{ji}^m در سیستم مورد نظر درصد زمان اتصال ایستگاه پایه j به کاربر i روی باند m را نشان می‌دهد.

تعریف ۴ یک بردار اتصال در سیستم پیوسته شدنی است هرگاه یک برنامه زمان‌بندی مرکزی با دسترسی به تمام اطلاعات شبکه بتواند یک سیاست زمان‌بندی برای تمامی لینک‌های شبکه برای دستیابی به درصد زمان اتصال بدون ایجاد تداخل ارائه دهد [۲۰].

محدودیت تداخل در سیستم مورد نظر این تحقیق یعنی شبکه بی‌سیم سلولی با فناوری OFDMA در ارتباط فرسوسو به روش‌های مختلفی قابل بیان می‌باشد که انوعی از آن را در جدول ۲ به همراه مشخص کردن شرط لازم و کافی بودن آنها در سیستم گسسته و پیوسته آورده‌ایم.

در این تحقیق محدودیت تداخل (۳) محدودیت "هر گیرنده" نامیده می‌شود زیرا که برای هر گیرنده بر روی هر زیرباند باید برقرار باشد. این محدودیت لینک‌های تداخلگر برای هر گیرنده را محدود می‌کند و بدین صورت شرط‌های کافی برای شدنی بودن یک مجموعه اتصال را ارائه می‌دهد اما در برخی موارد سخت‌گیرانه عمل کرده و شرط لازم نمی‌باشد. محدودیت (۴) همانند محدودیت هر گیرنده بوده با این تفاوت که با افزودن پارامتر M ، به صورت شرطی درآمده که سبب می‌شود تنها در مواردی که اتصالی برای کاربر i برقرار هست بر روی لینک‌های تداخلگر آن محدودیت برقرار باشد. همچنین لازم است که $M \geq |U| - 1$ باشد. این محدودیت شرطی به علت استفاده از پارامتر M تنها در سیستم‌های گسسته قابل استفاده است.

محدودیت (۵) برای هر اتصال باید برقرار باشد لذا محدودیت "هر اتصال" نامیده می‌شود که در سیستم گسسته شرط لازم و کافی برای شدنی بودن یک مجموعه اتصال می‌باشد اما در حالت پیوسته شرط کافی نیست. محدودیت (۶) به علت در برگرفتن اتصال‌های دو ایستگاه پایه، محدودیت "دو ایستگاه پایه" نامیده می‌شود. این محدودیت در سیستم گسسته شرط لازم و کافی جهت شدنی بودن یک مجموعه اتصال است. در محدودیت (۷) از مفهوم گروهک بیشین^۱ استفاده شده و برای توضیح آن ابتدا لازم است مفهوم گراف تداخل شرح داده شود.

تعریف ۵ در هر شبکه سلولی با مجموعه ایستگاه‌های پایه B و کاربران U ، گراف تداخل IG گرافی است که مجموعه گره‌های آن برابر تمامی ارسال‌های ممکن در شبکه است. همچنین دو گره (j, i) و

محدودیت (۱۱) سبب می‌شود که هر کاربر i تنها به ایستگاه‌های پایه عضو BI_i متصل شود. مدیریت تداخل با ممانعت از ارسال‌های تداخلگر هم‌زمان در هر گروهک بیشین توسط محدودیت (۱۲) اعمال می‌شود. مسأله بهینه‌سازی P_1 شدنی است بدین معنی که حتماً پاسخی برای آن وجود دارد. برای اثبات این موضوع کافی است نشان دهیم مقداری برای متغیرهای مسأله وجود دارد که تمامی محدودیت‌ها برای آن برقرار است. در صورتی که مقدار x برابر صفر شود تمامی محدودیت‌ها برقرار می‌باشند. شناسه باینری x_{ji}^m اختصاص‌های تکی را اعمال می‌کند که سبب می‌شود مسأله بهینه‌سازی حاصل گسسته و از نوع ترکیبیاتی شود. می‌توان نشان داد که این مسئله یک مسئله اختصاص تعمیم‌یافته بوده که به دلیل وجود محدودیت (۹)، NP-hard می‌باشد [۱].

۲-۳ تابع هدف لگاریتمی

تابع بهره‌وری U_i ، تابعی پیوسته، مشتق‌پذیر و اکیداً مقعر در نظر گرفته می‌شود [۷] و [۱۳]، در این صورت تابع هدف مسأله که مجموع U_i کاربران است نیز مشتق‌پذیر و اکیداً مقعر است. ما به دنبال یک تابع بهره‌وری هستیم که به صورت طبیعی توازن بار و انصاف میان کاربران را به همراه داشته باشد. برای این منظور از تابع بهره‌وری لگاریتمی استفاده می‌کنیم. تابع لگاریتم مقعر بوده و لذا دارای خروجی‌های کم‌شونده است. این ویژگی سبب رخ‌دادن توازن بار می‌شود که با فلسفه تخصیص منبع در سیستم‌های واقعی هماهنگ است. بدین صورت که تخصیص دادن منبع بیشتر به کاربرانی که در حال حاضر به خوبی سرویس‌دهی شده‌اند، دارای اولویت پایین‌تری است. در حالی که فراهم کردن منبع برای کاربران با نرخ پایین‌تر (یعنی در بخش‌های پایین‌تر تابع لگاریتم) مطلوب می‌باشد [۶]. در صورتی که R_i نرخ کلی قابل دستیابی کاربر i را نشان دهد، تابع بهره‌وری مورد نظر در این تحقیق به صورت $U_i(R_i) = \log(1 + R_i)$ تعریف می‌شود. این تابع تمام ویژگی‌های مورد نظر در تابع لگاریتم را داشته و اضافه شدن مقدار یک به نرخ کاربر قبل از اعمال لگاریتم سبب می‌شود که در صورت صفر بودن نرخ یک کاربر مقدار تابع بهره‌وری آن به جای یک مقدار تعریف‌نشده مقدار صفر را بگیرد. همچنین این تغییر سبب سهولت در حل مسأله نیز می‌شود. با اعمال این تابع بهره‌وری تابع هدف مسأله به شکل زیر می‌باشد

$$\sum_i U_i(R_i) = \sum_i \log(1 + R_i) = \sum_i \log(1 + \sum_j \sum_m x_{ji}^m R_{ji}^m) \quad (14)$$

با توجه به این که در سیستم گسسته مورد نظر هر کاربر تنها به یک ایستگاه پایه متصل شده و از یک زیرباند می‌تواند استفاده کند، تابع هدف مورد نظر در سیستم گسسته معادل (۱۵) می‌شود

$$\sum_i U_i(R_i) = \sum_i \sum_j \sum_m x_{ji}^m \log(1 + R_{ji}^m) \quad (15)$$

۳-۳ آزادسازی مسأله

متغیر x که حاوی مقادیر باینری بوده و اختصاص ایستگاه پایه و زیرباند را نشان می‌دهد، سبب سخت شدن مسأله P_1 شده است. می‌توان برای رفع این سختی با فرض امکان سوئیچ کردن سریع ایستگاه‌های پایه

الگوریتم ۱. MaximalCliqueFind (MCF)

1. $n = 1$
2. for each $CliqueBSs \subseteq B$ do
3. $U' = \{i \in U \mid CliqueBSs \subseteq BI_i\}$
4. for each $j \in CliqueBSs$ do
5. $CliqueUsers = U' \cup \{i \in U \mid j \in BI_i\}$
6. $Q_n = CliqueBSs \times CliqueUsers$
7. $n = n + 1$

الگوریتم ۱ را می‌توان جهت یافتن گروهک‌های بیشین در تحقیقات تداخل شبکه سلولی استفاده کرد. در شبیه‌سازی مسئله بخش ۳-۳ از الگوریتم ۱ جهت یافتن گروهک‌های بیشین شبکه سلولی استفاده شده است. در کل تعداد گروهک‌های بیشین در یک گراف دلخواه در تئوری می‌تواند نمایی باشد. این الگوریتم نیز دارای پیچیدگی نمایی با $O(3^{|B|})$ است که برای تعداد پایین ایستگاه‌های پایه دارای زمان اجرای معقولی می‌باشد و همچنین می‌توان از الگوریتم‌های ابتکاری جامع برای یافتن گروهک‌های بیشین در گراف استفاده کرد [۱۹].

۳- فرموله‌سازی مسأله

در این بخش از تئوری بهینه‌سازی برای فرموله کردن مسأله مورد نظر استفاده می‌شود و یک مسأله بهینه‌سازی جامع تعریف می‌گردد که در آن تخصیص سلول و منابع به طور هم‌زمان انجام می‌شود. سپس تابع هدف مناسب آن تعیین می‌گردد. هر کدام از محدودیت‌های جدول ۲ را با توجه به فرم آن و نوع الگوریتم مورد نظر می‌توان در فرموله کردن مسأله استفاده کرد زیرا که فرم محدودیت تداخل بر روی ساده‌سازی مسأله و نحوه تجزیه مسأله و الگوریتم نهایی از نظر میزان پیچیدگی محاسباتی و سیگنالینگ تأثیر زیادی دارد. در این بخش به دلیل این که قصد داریم مسأله بهینه‌سازی را آزادسازی کرده و در صورت امکان کران بالایی برای مجموع بهره‌وری کاربران بیابیم، از محدودیت تداخل (۷) که شرط کافی برای شدنی بودن مجموعه اتصال پیوسته فراهم می‌کند استفاده می‌کنیم.

۳-۱ اختصاص سلول و زیرباند با هدف بیشینه‌سازی بهره‌وری شبکه

در این مرحله می‌توان مسأله بهینه‌سازی مورد نظر را به صورت زیر تعریف کرد

$$P_1: \max_x \sum_i U_i \left(\sum_j \sum_m x_{ji}^m R_{ji}^m \right) \quad (8)$$

$$\text{subject to: } \sum_i x_{ji}^m \leq 1, \forall j \in B, m \in M \quad (9)$$

$$\sum_j \sum_m x_{ji}^m \leq 1, \forall i \in U \quad (10)$$

$$x_{ji}^m = 0, \forall i \in U, m \in M, j \in B - BI_i \quad (11)$$

$$\sum_{(j,i) \in Q_n} x_{ji}^m \leq 1, \forall Q_n \in \Phi, \forall m \in M \quad (12)$$

$$x_{ji}^m \in \{0, 1\}, \forall j \in B, i \in U, m \in M \quad (13)$$

در این مسأله هدف بیشینه‌سازی مجموع بهره‌وری کاربران است. محدودیت (۹) مربوط به فناوری رادیویی OFDMA بوده که بیان می‌دارد در یک سلول هر زیرباند حداکثر می‌تواند به یک کاربر اختصاص یابد. محدودیت (۱۰) جهت اجبار اتصال هر کاربر حداکثر به یک ایستگاه پایه و همچنین حداکثر یک زیرباند اضافه شده است. با توجه به مدل تداخل

جدول ۳: نتایج عددی حل مسأله P1 و مسأله P2 با مقادیر متفاوت β.

تعداد ایستگاه پایه	[1, 1, 1]	[1, 1, 2]	[1, 2, 2]	[1, 3, 3]	[1, 3, 4]	[1, 3, 4]	[1, 3, 6]	[1, 3, 6]
تعداد کاربر	۱۰	۱۲	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۸	۳۰
تعداد زیرباند	۴	۴	۶	۸	۸	۸	۸	۸
	۸۸,۵۷	۱۰۲	۱۳۲,۳۴	۱۷۶,۰۶	۲۰۶,۴۴	۲۳۵,۰۷	۲۶۲,۲۴	۳۶۳
تابع هدف	β = ۰,۴۶ با P2	۱۳۳,۸۸	۱۵۶,۹۲	۱۸۷,۱۰	۱۹۳,۶۷	۱۹۹,۱۷	۲۴۹,۹۳	۲۵۳,۳
	β = ۰,۸۲ با P2	۱۳۸,۹۶	۱۶۳,۸۵	۱۹۵,۲۰	۲۰۰,۶۲	۲۰۵,۵۳	۲۵۸,۸۷	۲۶۰,۵۳
	β = ۱ با P2	۱۴۰,۹۴	۱۶۶,۲۳	۱۹۷,۹۷	۲۰۲,۸۳	۲۰۶,۶۰	۲۶۱,۶۶۳	۲۶۲,۵۷

بخش پنجم است که به علت عدم تکرار مطالب در اینجا نیامده است. همان طور که از جدول ۳ مشخص است در این شبیه‌سازی برای هیچ یک از مقادیر β مقدار تابع هدف مسأله P2 با فاصله نسبتاً کوچکی بزرگ‌تر از مقدار تابع هدف مسأله P1 قرار نگرفته است بلکه این فاصله در اکثر موارد زیاد بوده و در برخی حالات شبکه نیز اختلافی وجود ندارد.

۴- الگوریتم توزیعی اختصاص سلول و زیرباند

سوئیچ کردن سریع ایستگاه‌های پایه در اتصال به کاربران نیازمند امکانات سخت‌افزاری خاص در ایستگاه‌های پایه و تجهیزات دریافت‌کننده کاربران بوده و لذا عملی کردن آن در شبکه‌های فعلی ممکن نمی‌باشد. همچنین در شبکه در حال تغییر، یافتن گروهک‌های بیشین باید در هر بازه زمانی اجرای الگوریتم صورت گرفته که خود سبب افزودن پیچیدگی‌های زمانی و محاسباتی به شبکه می‌شود. از طرف دیگر مدیریت تداخل مبتنی بر گروهک‌های بیشین در عمل منجر به ارائه الگوریتم‌های متمرکز با کنترل‌کننده مرکزی می‌شود. در شبکه‌های ناهمگون به علت استقرار بدون طرح ایستگاه‌های پایه و تفاوت در شبکه‌های پشتی آنها لزوم ارائه راه‌حلی تا حد امکان توزیع‌شده برای تخصیص منابع افزایش می‌یابد. در این بخش ابتدا محدودیت تداخل (۶) شرح داده شده و در فرموله‌سازی مسأله استفاده می‌شود. برای اعمال این محدودیت نیازی به یافتن گروهک‌های بیشین نبوده و فرم آن به گونه‌ای است که می‌تواند به یک الگوریتم توزیع‌شده مناسب منتج شود. پس از فرموله‌سازی مجدد مسأله مورد نظر با اعمال تجزیه دوگان لاگرانژ یک الگوریتم توزیع‌شده کارآمد ارائه می‌شود.

۴-۱ فرمولاسیون مجدد

در این بخش محدودیت تداخل (۶) استفاده می‌شود به این صورت که برای هر دو ایستگاه پایه j و k روی زیرباند m محدودیت (۱۶) باید برقرار باشد

$$\sum_{i \in UI_j} x_{ji}^m + \sum_{i \in UI_{j,k}} x_{ki}^m \leq 1, \quad \forall j \in B, \forall k \in (B - \{j\}), \forall m \in M \quad (16)$$

که $UI_{j,k} = UI_j \cap UI_k$ مجموعه کاربرانی را دربرمی‌گیرد که در ناحیه تداخل هر دو ایستگاه پایه j و k هستند. در واقع در این محدودیت بیان می‌شود در صورتی که ایستگاه پایه k در حال ارسال روی زیرباند m به کاربری باشد و این کاربر در ناحیه تداخل ایستگاه پایه دیگری مانند j نیز باشد، جهت پیشگیری از تداخل ایستگاه پایه j نباید ارسالی روی این زیرباند به کاربران خود داشته باشد. این محدودیت در سیستم گسسته شرط کافی و لازم برای پیشگیری از تداخل در مدل تداخل مورد نظر است.

این محدودیت برای هر ایستگاه پایه j و هر زیرباند m دربرگیرنده

در اتصال به کاربران، متغیر x را آرایه‌ای از مقادیر پیوسته در بازه [0, 1] در نظر گرفت. در این صورت متغیر x_{ji}^m درصد زمان اتصال ایستگاه پایه j به کاربر i روی باند m را نشان می‌دهد. مسأله بهینه‌سازی P2 مسأله آزادسازی‌شده را نشان می‌دهد

$$P2: \max_x \sum_i \log(1 + \sum_j \sum_m x_{ji}^m R_{ji}^m)$$

subject to: (۹) - (۱۲)

$$x_{ji}^m \in [0, 1], \quad \forall j \in B, i \in U, m \in M$$

به علت پیوسته‌بودن متغیر اختصاص عبارت (۱۴) برای تابع هدف مسأله در نظر گرفته شده است. با تفسیر پیوسته از متغیر اختصاص، همچنان محدودیت‌های (۹) تا (۱۲) در هر لحظه از زمان برقرار بوده بدین صورت که هر کاربر تنها به یک ایستگاه پایه و یک زیرباند متصل بوده و هر زیرباند نیز حداکثر به یک کاربر اختصاص می‌یابد. محدودیت تداخل (۱۲) نیز به جای تخصیص حداکثر یک اتصال در هر گروهک بیشین با تقسیم درصد زمان اتصال بین لینک‌های موجود در هر گروهک بیشین از تداخل پیشگیری می‌کند.

مسأله P2 پیوسته بوده و تابع هدف آن محدب می‌باشد و تمامی محدودیت‌های آن تابع‌های خطی هستند، لذا این مسأله محدب می‌باشد. بنابراین می‌توان به سادگی از راه‌حل‌های موجود برای حل مسأله‌های محدب استفاده کرد و پاسخ بهینه آن را به دست آورد.

همچنین با توجه به این که تمامی محدودیت‌های مسأله در مدل مسأله P2 در هر لحظه برقرار است و فضای جواب مسأله قابل زمان‌بندی می‌باشد می‌توان گفت که پاسخ‌های به دست آمده از آن قابل زمان‌بندی هستند. لذا با فرض امکان سوئیچ کردن سریع ایستگاه‌های پایه در اتصال به کاربران از الگوریتم حل آن به عنوان راه‌حلی متمرکز برای مسأله اختصاص سلول و زیرباند استفاده شود.

با توجه به آزادسازی انجام‌شده پاسخ مسأله P2 یک کران بالا برای مسأله P1 با اختصاص‌های باینری می‌باشد. با حل مسأله P1 و مسأله P2 با استفاده از حل‌کننده‌های بهینه‌سازی محیط MATLAB و مقایسه پاسخ بهینه آن دو برای شرایط متفاوت شبکه، این نتیجه حاصل شده است که مدل P2 یک کران بالایی سست برای مسأله P1 فراهم می‌کند که این به علت نوع لگاریتمی تابع هدف اتفاق می‌افتد. با جایگزینی مقادیر متفاوت برای مقیاس β همچنان کران به دست آمده سست می‌باشد. در جدول ۳ نتیجه حل این دو مسئله برای شبکه ناهمگون با اندازه‌های متفاوت آورده شده است. تعداد ایستگاه‌های پایه از هر رده، تعداد کاربران و تعداد ایستگاه‌های پایه در سطر اول جدول آورده شده است. سایر شرایط شبیه‌سازی شبکه مشابه شرایط شرح داده شده در

1. Schedulable
2. Loose Upper Bound

$$P_i : g_i(\mu) = \max_x \sum_{j \in BI_i} \sum_m x_{ji}^m$$

$$[\log(1 + R_{ji}^m) - \sum_{k \in B - \{j\}} \mu_{jkm} - \sum_{k \in BI_i - \{j\}} \mu_{kjm}]$$

subject to : $\sum_j \sum_m x_{ji}^m \leq 1$

$$x_{ji}^m = 0, \forall m, j \notin BI_i$$

$$x_{ji}^m \in [0, 1], \forall j, m$$

تابع هدف زیرمسئله P_i برای هر کاربر i به دلیل وجود ضرب متغیر x_{ji}^m کافی است برای ایستگاه‌های پایه عضو محدوده ارسال کاربر i در نظر گرفته شود. عبارت ضرب شده در متغیر x_{ji}^m در تابع هدف P_i را اندیس کیفیت^۳ ایستگاه پایه j و زیرباند m از دیدگاه کاربر i می‌نامیم و آن را

با QI_{jim} به صورت زیر نشان می‌دهیم

$$QI_{jim} = \log(1 + R_{ji}^m) - \sum_{k \in B - \{j\}} \mu_{jkm} - \sum_{k \in BI_i - \{j\}} \mu_{kjm} \quad (۱۹)$$

اندیس کیفیت ایستگاه پایه j در زیرباند m برای کاربر i مقدار بالاتری خواهد داشت، در صورتی که این اتصال میزان SINR بالاتری داشته باشد (R_{ji}^m بالاتر) و یا زیرباند m توسط ایستگاه پایه j و سایر ایستگاه‌های پایه ناحیه تداخل به کاربران دیگری تخصیص نیافته باشد (ضرایب μ کمتر). برای هر کاربر i ، تابع هدف در P_i یک میانگین وزنی از QI_{jim} ‌های مربوط به خود i است که ضرایب آنها بین ۰ و ۱ و جمع آنها یک واحد می‌شود. اگر برای هر کاربر i مقدار بیشینه عبارت QI_{jim} فقط برای یک زوج ایستگاه پایه و زیرباند رخ دهد، پاسخ یکتای P_i با نگه‌داشتن آرگومان بیشین QI_{jim} بین زوج‌های (j, m) و کاهش تأثیر سایر عناصر به دست می‌آید. هر کاربر با دریافت اطلاعات از محیط اطراف و حل مسئله بهینه‌سازی P_i زوج (j, m) بهینه که در واقع ایستگاه پایه و زیرباند بهینه برای اتصال خود است، انتخاب می‌کند. بنابراین برای حل این مسئله کافی است هر کاربر زوج (j, m) را انتخاب کند که دارای دو شرط می‌باشد: ایستگاه پایه j در ناحیه تداخل کاربر باشد و عبارت QI_{jim} را بیشینه سازد

$$(j^*, m^*) = \arg \max_{\substack{(j, m) \\ j \in BI_i}} [\log(1 + R_{ji}^m) - \sum_{k \in B - \{j\}} \mu_{jkm} - \sum_{k \in BI_i - \{j\}} \mu_{kjm}] \quad (۲۰)$$

در صورتی که (۲۰) بیش از یک پاسخ بیشینه‌کننده داشته باشد، کاربر یکی از آنها را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند. بر همین اساس، پاسخ P_i به صورت زیر به دست می‌آید

$$x_{ji}^m = \begin{cases} 1 & (j, m) = (j^*, m^*) \\ 0 & (j, m) \neq (j^*, m^*) \end{cases} \quad \forall i \in U \quad (۲۱)$$

با آزادسازی محدودیت تداخل در P^3 این مسئله به دو سطح از مسئله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود. در سطح پایین‌تر، زیرمسئله‌ها وجود دارند که برای هر کاربر i یک زیرمسئله P_i وجود دارد. در سطح بالاتر، مسئله اصلی دوگان وجود دارد که مسئول به‌روزرسانی متغیر دوگان μ با استفاده از حل مسئله دوگان (۲۲) است

$$P_D : \min_{\mu \geq 0} g(\mu) = \sum_i g_i(\mu) + \sum_{j \in B} \sum_{k \in B - \{j\}} \sum_m \mu_{jkm} \quad (۲۲)$$

محدودیت OFDMA آن ایستگاه پایه روی آن زیرباند یعنی $\sum_{i \in UI_j} x_{ji}^m \leq 1$ نیز می‌باشد زیرا که محدودیت دو ایستگاه پایه باید برای هر ایستگاه پایه j با سایر ایستگاه‌های پایه (به جز خودش) نوشته شود. با توجه به این که شبکه چندسولولی بوده، محدودیت تداخل برای هر ایستگاه پایه j حداقل یک بار در نظر گرفته می‌شود. لذا با به‌کارگیری این محدودیت تداخل می‌توان محدودیت OFDMA را از مسئله حذف کرد که سبب ساده‌تر شدن حل مسئله می‌شود.

مسئله P^2 پس از حذف محدودیت OFDMA و استفاده از محدودیت تداخل دو ایستگاه پایه به جای محدودیت تداخل گروهک بیشین به فرم معادل زیر تبدیل می‌شود

$$P^2 : \max_x \sum_i \sum_j \sum_m x_{ji}^m \log(1 + R_{ji}^m)$$

subject to : $\sum_j \sum_m x_{ji}^m \leq 1, \forall i \in U$

$$x_{ji}^m = 0, \forall i \in U, m \in M, j \in B - BI_i$$

$$\sum_{i \in UI_j} x_{ji}^m + \sum_{i \in UI_{j,k}} x_{ki}^m \leq 1, \forall j \in B, k \in (B - \{j\}), m \in M$$

$$x_{ji}^m \in [0, 1], \forall j \in B, i \in U, m \in M$$

۴-۲ تجزیه دوگان

به منظور طراحی یک الگوریتم توزیعی برای مسئله P^3 مشابه روش مورد استفاده در [۶] و [۱] از تجزیه دوگان لاگرانژ [۲۱] استفاده می‌کنیم. این روش تجزیه زمانی پاسخ مناسب می‌دهد که شرط دوگانی قوی^۱ برای مسئله برقرار باشد. با توجه به برقراری شرط دوگانی قوی مقدار بهینه P^3 معادل جواب بهینه تابع دوگان لاگرانژ آن است. برای مسئله P^3 شرط دوگانی قوی با توجه به شرط اسلاتر^۲ برقرار می‌باشد زیرا که تابع هدف و تمام محدودیت‌ها تابعی خطی از x بوده و همچنین این مسئله همیشه شدنی است (برای نمونه، $x = 0$ همیشه یک نقطه شدنی است) [۲۲].

در مسئله P^3 تنها یک محدودیت توزیعی وجود دارد که همان محدودیت تداخل است. با افزودن ضریب لاگرانژ μ این محدودیت توزیعی آزادسازی شده و به تابع هدف افزوده می‌شود و تابع لاگرانژ $\mathcal{L}(x, \mu)$ به دست می‌آید

$$\mathcal{L}(x, \mu) = \sum_i \sum_j \sum_m x_{ji}^m \log(1 + R_{ji}^m) - \sum_{j \in B} \sum_{k \in B - \{j\}} \sum_m \mu_{jkm} (\sum_{i \in UI_j} x_{ji}^m + \sum_{i \in UI_{j,k}} x_{ki}^m - 1) \quad (۱۷)$$

عبارت (۱۷) بر اساس اندیس i قابل تجزیه است. لذا با تجزیه بر اساس i تابع لاگرانژ برای هر کاربر i به صورت زیر به دست می‌آید

$$\mathcal{L}_i(x_i, \mu) = \sum_j \sum_m x_{ji}^m \log(1 + R_{ji}^m) - \sum_{j \in BI_i} \sum_{k \in BI_i - \{j\}} \sum_m x_{ji}^m \mu_{jkm} - \sum_{j \in BI_i} \sum_{k \in BI_i - \{j\}} \sum_m x_{ki}^m \mu_{jkm} \quad (۱۸)$$

پس از تغییر نام اندیس‌ها در عبارت سوم (۱۸) هر زیرمسئله برای هر کاربر i در نهایت به فرم زیر تبدیل می‌شود

1. Strong Duality
2. Slater

۳-۴ طراحی پروتکل توزیع‌شده اختصاص سلول

وزیرباند

الگوریتم توزیع‌شده پیشنهادی برای اختصاص سلول و وزیرباند که در بخش‌های قبل مورد بررسی قرار گرفت به اختصار در ادامه آمده است.

گام اول (مقداردهی اولیه): هر ایستگاه پایه تمامی ضرایب لاگرانژ مربوط به خود را مقداردهی اولیه کرده و در شبکه همه‌پخش می‌کند.

گام دوم (درخواست کاربر): هر کاربر با دریافت سیگنال‌های نشانه^۲ از ایستگاه‌های پایه اطراف خود، SINRهای لازم را محاسبه می‌کند. همچنین مقادیر μ را که توسط ایستگاه‌های پایه همه‌پخش شده‌اند دریافت می‌کند. سپس هر کاربر i مقدار Q_{ijm} در (۱۹) را برای تمامی ایستگاه‌های پایه اطراف خود و تمام زیرباندها محاسبه می‌کند. پس از آن ایستگاه پایه و وزیرباند (j^*, m^*) با بیشترین مقدار Q_{ijm} را برای اتصال انتخاب کرده و به ایستگاه پایه j^* درخواست خود را ارسال می‌کند.

گام سوم (پذیرش کاربر): هر ایستگاه پایه درخواست‌های اتصال را دریافت می‌کند. در صورت دریافت بیش از یک درخواست برای یکی از زیرباندها، اتصال با مطلوبیت^۳ بالاتر را انتخاب می‌کند. سپس هر ایستگاه پایه با تک‌تک ایستگاه‌های پایه اطراف خود اتصال روی هر وزیرباند را بررسی کرده و در صورت وجود تداخل بین اتصال دو ایستگاه پایه روی یک زیرباند اتصال با مطلوبیت بالاتر برقرار بوده و دیگری حذف می‌شود.

گام چهارم (به‌روزرسانی ضرایب لاگرانژ): سپس هر ایستگاه پایه طبق (۲۳) ضرایب لاگرانژ مربوط به خود را به‌روزرسانی کرده و در شبکه همه‌پخش می‌کند. این الگوریتم در صورت نرسیدن به شرط خاتمه با برگشتن به گام دوم تکرار می‌شود.

در بخش پذیرش کاربر در واقع مجموعه اتصال‌هایی را که از نظر محدودیت‌های شبکه شدنی نبوده با استفاده از روشی ابتکاری به پاسخی شدنی تبدیل می‌کند [۲۵]. مقدار مطلوبیت هر اتصال را می‌توان به شیوه‌های متفاوتی تعریف کرد که ما آن را برای اتصال کاربر i به ایستگاه پایه j روی زیرباند m برابر نرخ قابل دستیابی آن در نظر گرفتیم و به عبارت دیگر $f_{ji}^m = R_{ji}^m$.

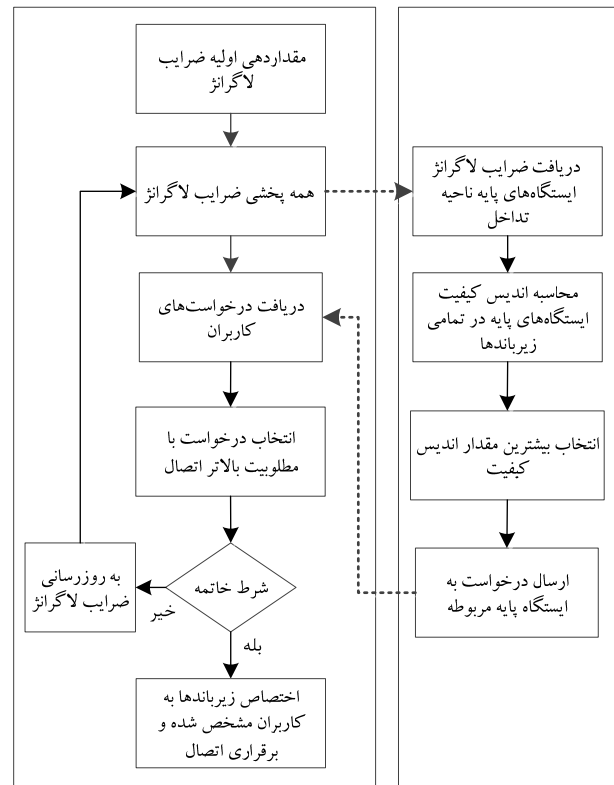
در شکل ۱ روندنمایی از الگوریتم توزیع‌شده پیشنهادی ارائه شده است. خطوط نقطه‌چین جریان اطلاعات بین کاربران و ایستگاه‌های پایه را نشان می‌دهد. در هر تکرار الگوریتم، هر کاربر لازم است اندیس کیفیت را برای ایستگاه‌های پایه ناحیه تداخل خود و تمامی زیرباندها محاسبه کند، بیشترین مقدار را انتخاب و به ایستگاه پایه مربوط درخواست ارسال کند. ایستگاه‌های پایه ناحیه تداخل در بدترین حالت شامل تمامی ایستگاه‌های پایه شبکه می‌شود، لذا پیچیدگی الگوریتم برای هر کاربر (گام دوم) در هر تکرار $O(N_B N_M)$ است. از طرف دیگر هر ایستگاه پایه در هر تکرار درخواست کاربران را دریافت کرده و پذیرش کاربران (گام سوم) را انجام می‌دهد. ایستگاه‌های پایه اطراف یک ایستگاه پایه در بدترین حالت شامل تمامی ایستگاه‌های پایه شبکه شده لذا پیچیدگی هر ایستگاه پایه در این گام برابر $O(N_B N_U N_M)$ است. سپس هر ایستگاه پایه بر اساس نتیجه گام سوم، ضرایب لاگرانژ مربوط به خود را به‌روز کرده که تعداد این ضرایب برای هر ایستگاه پایه برابر تعداد ایستگاه‌های پایه اطراف آن در تعداد زیرباندها است (گام چهارم). بنابراین پیچیدگی الگوریتم برای هر ایستگاه پایه نیز در گام چهارم هر تکرار الگوریتم $O(N_B N_M)$ است. در

2. Pilot

3. User Admission

4. Desirability

سمت ایستگاه پایه



شکل ۱: روندنمای الگوریتم تخصیص ایستگاه پایه و وزیرباند.

که $g_i(\mu)$ تابع دوگانی است که از مقدار بیشینه به دست آمده از بیشینه‌سازی P_i با مقادیر داده‌شده μ به دست می‌آید. در این روش در واقع مسأله دوگان به جای مسأله اصلی حل می‌شود. مسأله اصلی دوگان در (۲۲) را می‌توان با روش زیرگردایان حل کرد [۲۳]. بر این اساس هر ایستگاه پایه j به ازای تک‌تک ایستگاه‌های پایه همسایه‌اش k مقدار μ_{jkm} را بر اساس عبارت زیر به‌روز می‌کند

$$\mu_{jkm}(t+1) = [\mu_{jkm}(t) + \beta(t)(\sum_{i \in U_{j,k}} x_{ji}^m + \sum_{i \in U_{j,k}} x_{ki}^m - 1)]^+ \quad (23)$$

عملگر $[.]^+$ مقدار بیشینه بین مقدار داخل کروشه و صفر را می‌دهد. عملگر $[.]^+$ بر روی ضرایب μ اعمال شده زیرا که ضرایب لاگرانژ مقادیری غیر منفی دارند [۲۲]. t اندیس تکرار الگوریتم است و $\beta(t)$ اندازه گام مثبت با دو شرط زیر می‌باشد

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta(t) = 0 \quad \text{and} \quad \sum_{t=1}^{\infty} \beta(t) = \infty \quad (24)$$

با توجه به قضیه ۶.۳.۴ در [۲۴]، در صورتی که $\beta(t)$ شرایط فوق را داشته باشد، همگرایی روش زیرگردایان نزولی^۱ با فرض این که متغیرهای اختصاص متغیرهای پیوسته‌ای در بازه $[0, 1]$ باشند تضمین می‌شود. این شرایط همگرایی، متغیرهای اختصاص باینری را تضمین نمی‌کند. با این وجود، ما از $\beta(t) = 1/(2t)$ در شبیه‌سازی‌هایمان استفاده کرده‌ایم.

در این روش به صورت تکراری مقادیر متغیرهای اختصاص با توجه به (۲۰) و ضرایب لاگرانژ با توجه به (۲۳) به روز شده تا همگرایی حاصل شود. توجه شود که قانون به روز رسانی متغیرهای اختصاص به صورت خودکار متغیرهای باینری تولید کرده لذا به تقریب‌سازی دیگری نیاز نمی‌باشد.

1. Gradient Descent

مسائل بهینه‌سازی مطرح شده است.

۵-۱ روند تغییر تابع هدف و همگرایی

در این بخش به بررسی روند تغییر تابع هدف مسئله در طول تکرارهای الگوریتم می‌پردازیم. در تکرار t ام الگوریتم، مقدار تابع هدف مسئله P_3 بعد از گام پذیرش کاربر را با $f(t)$ و مقدار تابع دوگان را بعد از گام به‌روزرسانی ضرایب دوگان با $g(t)$ نشان می‌دهیم. منظور از همگرایی در این تحقیق عدم تغییر پاسخ مسئله با تکرار الگوریتم می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در اغلب نمونه‌های شبکه، الگوریتم پیشنهادی تا قبل از تکرار سی‌ام به همگرایی می‌رسد. جهت نشان دادن رفتار تغییر این توابع نمونه شبکه‌ای را در نظر می‌گیریم. در این بخش شبکه ناهمگونی با سه رده ایستگاه پایه در نظر گرفته شده که تعداد ایستگاه‌های ماکرو، پیکو و فمتو آن به ترتیب برابر ۱، ۳ و ۶ است و به‌صورت [۱۰، ۳۶] نشان داده می‌شود. هر ایستگاه پایه تعداد ۱۰ زیرباند دارد و ۸۰ کاربر نیز در این شبکه قرار دارند. الگوریتم پیشنهادی برای این شبکه اجرا شده و مقادیر دو تابع $f(t)$ و $g(t)$ در تکرارهای الگوریتم در نمودار شکل ۲ رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در طول تکرارهای الگوریتم تابع $f(t)$ به صورت کلی روند افزایشی و تابع $g(t)$ روند کاهشی داشته و در نهایت به مقدار ثابتی همگرا شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود به دلیل استفاده از زیرگرایان پاسخ مسئله لزوماً در هر گام بهبود نیافته و الگوریتم در نهایت در برخی نمونه‌های شبکه به بهینه محلی همگرا می‌شود. لذا جهت بهبود پاسخ مسئله، در طول اجرای الگوریتم هر ایستگاه پایه بیشترین مقدار تابع $f(t)$ را ذخیره‌سازی کرده و بعد از تعداد مشخص و محدودی تکرار (مثلاً ۳۰) اتصال‌های مربوط به بهترین مقدار $f(t)$ را برقرار می‌کند.

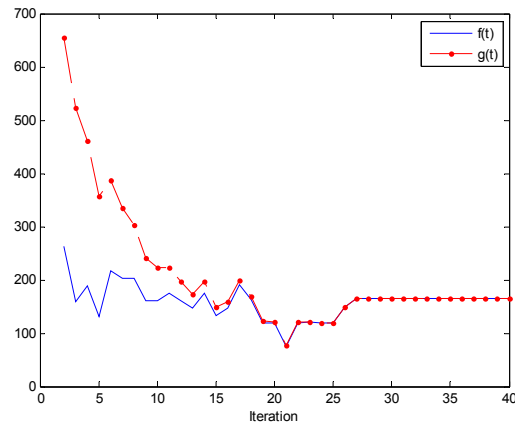
۵-۲ نزدیکی به بهینه

در این بخش نتایج شبیه‌سازی به منظور نمایش کارآمدی و میزان بهینگی الگوریتم توزیعی آورده شده است. جهت بررسی میزان نزدیکی پاسخ الگوریتم تجزیه به پاسخ بهینه، جدول ۴ ارائه شده که در آن به مقایسه الگوریتم توزیعی با روش حل بهینه مسئله P_3 پرداخته شده است. حل بهینه مسئله با استفاده از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی^۲ برنامه MATLAB انجام شده که از روش شاخه و حد^۳ مبتنی بر LP استفاده می‌کند و مسائل بهینه‌سازی با اندازه کوچک را در زمان مناسبی پاسخ می‌دهد. در این بخش در اندازه شبکه‌های کوچک به ارزیابی الگوریتم توزیعی توسط معیارهای زیر می‌پردازیم [۱۹].

تعریف ۶) فاصله متقابل^۴ الگوریتم توزیعی از تقسیم مجموع بهره‌وری کاربران در الگوریتم توزیعی بر مجموع بهره‌وری کاربران در مدل بهینه و کم کردن مقدار یک از آن به دست می‌آید.

تعریف ۷) نسبت زمانی^۵ الگوریتم توزیعی از تقسیم مدت زمان پاسخ مدل بهینه بر مدت زمان پاسخ الگوریتم توزیعی به دست می‌آید.

نتایج شبیه‌سازی در جدول ۴ آورده شده است. این شبیه‌سازی بر روی یک ماشین Intel Core i۵ ۲٫۵ GHz با ۴ گیگابایت حافظه RAM انجام شده است. در این جدول سه مدل تنظیمات شبکه آورده شده که در هر یک تمامی پارامترهای شبکه ثابت بوده و تنها یکی از پارامترهای



شکل ۲: تغییرات تابع $f(t)$ و $g(t)$ در تکرارهای الگوریتم.

کل می‌توان گفت که پیچیدگی زمانی الگوریتم در هر تکرار با فرض $N_U > N_B$ برابر $O(N_B^* N_U N_M)$ است.

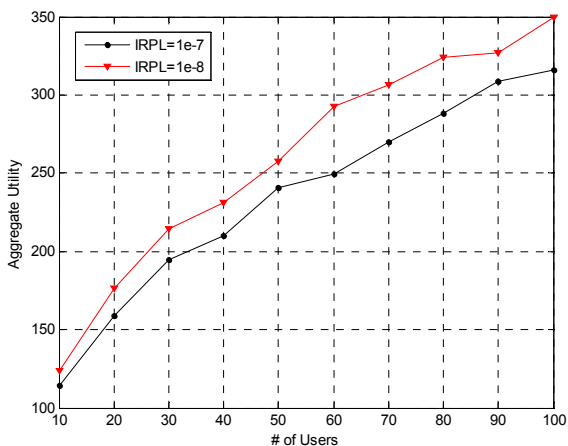
در الگوریتم توزیع شده فوق در هر تکرار لازم است هر ایستگاه پایه یک پیام حاوی مقادیر ضرایب لاگرانژ خود همه‌پخش کند و هر کاربر نیز یک پیام درخواست به ایستگاه پایه منتخب خود ارسال نماید. از مزیت‌های الگوریتم ارائه شده استفاده از اطلاعات محلی است. بدین صورت که هر کاربر فقط به اطلاعات همه‌پخش شده از ایستگاه‌های پایه ناحیه تداخل خود نیاز دارد و همچنین هر ایستگاه پایه با ایستگاه‌های پایه اطراف خود نیاز به تبادل اطلاعات دارد که این ویژگی در کنار محاسبات محلی هر عنصر شبکه، الگوریتم را از داشتن گره مرکزی بی‌نیاز کرده و پیاده‌سازی آن را در عمل در شبکه‌های نسل جدید ممکن می‌سازد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

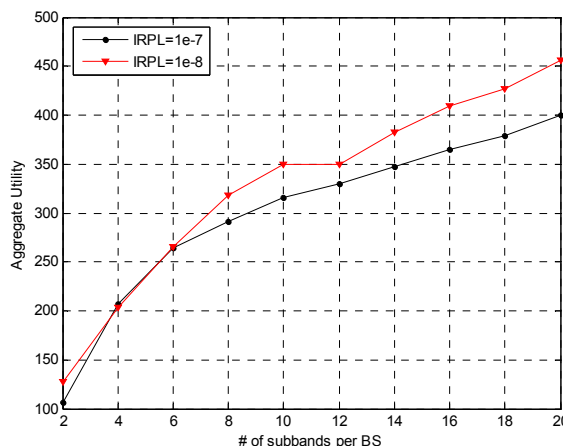
در این بخش به ارزیابی کارایی الگوریتم اختصاص سلول و زیرباند توزیع شده پیشنهادی می‌پردازیم. شبکه‌ای با سه رده در نظر گرفته شده است. توان ارسالی ایستگاه‌های پایه ماکرو، پیکو و فمتو به ترتیب ۴۰، ۱ و ۰٫۱ وات است. فضایی با ابعاد $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ در نظر گرفته شده که ایستگاه پایه ماکرو در وسط آن ثابت قرار دارد. مکان سایر ایستگاه‌های پایه و کاربران به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت مشخص می‌گردد. توان نویز -100 dBm در تمامی گیرنده‌ها در نظر گرفته شده است. برای مدل کانال نیز توان و ضریب اتلاف مسیر به ترتیب -3 و $0/8$ بوده و پهنای باند هر زیرباند 180 kHz (پهنای باند یک بلوک منبع در استاندارد LTE) است. شبیه‌سازی مورد نظر برای سناریوهای متفاوتی از تراکم ایستگاه‌های پایه و تعداد کاربران اجرا شده است. جهت مشخص شدن ناحیه تداخل هر کاربر و هر ایستگاه پایه پارامتری به نام محدوده توان ناحیه تداخل^۱ ($IRPL$) تعریف می‌کنیم که حداقل توان دریافتی یک کاربر از یک ایستگاه پایه را برای این که آن ایستگاه پایه عضو ناحیه تداخل آن کاربر محسوب شود، نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی‌های این بخش $IRPL = 10e - \lambda W$ در نظر گرفته شده است.

الگوریتم پیشنهادی در محیط MATLAB پیاده‌سازی شده است. با توجه به روش تخصیص زیرباندها در تمامی پاسخ‌های الگوریتم تداخلی وجود ندارد. به عبارت دیگر برای هر کاربری که در حال دریافت داده روی زیرباند مشخصی هست، ایستگاه‌های پایه تداخلگر ارسالی روی آن زیرباند در آن زمان انجام ندارند. لذا تمامی نتایج الگوریتم پاسخی معتبر برای

2. Optimization Toolbox
3. Branch-and-Bound
4. Bound Gap
5. Time Ratio



شکل ۴: مجموع تابع بهره‌وری کاربران با تغییر تعداد کاربران شبکه برای دو مقدار $IRPL$.



شکل ۳: مجموع تابع بهره‌وری کاربران با تغییر زیرباند‌های هر ایستگاه پایه برای دو مقدار $IRPL$.

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی.

تنظیمات ۳			تنظیمات ۲			تنظیمات ۱			
[۱,۱,۱]	[۱,۱,۱]	[۱,۱,۱]	[۱,۱,۲]	[۱,۲,۰]	[۱,۱,۰]	[۱,۱,۱]	[۱,۱,۱]	[۱,۱,۱]	تعداد ایستگاه پایه
۱۵	۱۰	۵	۱۲	۱۲	۱۲	۱۰	۱۰	۱۰	تعداد کاربر
۵	۵	۵	۴	۴	۴	۵	۴	۲	تعداد زیرباند
۷۴,۲۷	۷۴,۰۴	۷۳,۹۴	۷۴,۴۵	۵۹,۶۷	۵۹,۶۹	۷۴,۰۴	۵۹,۴۸	۲۹,۹۸	بهبینه
۷۴,۲۳	۷۳,۸۵	۵۹,۴۲	۷۴,۲۲	۵۹,۶۷	۵۹,۶۳	۷۳,۸۵	۵۹,۳۷	۲۹,۹۸	توزیعی
$-۶,۰۰e-۴$	$-۲,۵۰e-۳$	$-۱,۹۶e-۱$	$-۳,۱۰e-۳$	۰	$-۱,۰۰e-۳$	$-۲,۵۰e-۳$	$-۱,۸۰e-۳$	۰	فاصله متقابل
۷۵۲۰۱	۷۴۱۵,۸	۱,۰۵	۴۸۲,۳۹	۱۰۴۶,۶	۱,۰۵	۶۵۹۰	۲۲۹,۹۷	۳,۴۹	بهبینه
۰,۵۵	۰,۴۳	۰,۳۲	۰,۵۶	۰,۴۲	۰,۳۱	۰,۴۳	۰,۳۶	۰,۲۶	زمان
$۱,۳۹e+۵$	$۱,۷۴e+۴$	۳,۳۳	$۸,۷۴e+۲$	$۲,۵۱e+۳$	۳,۴۷	$۱,۵۵e+۴$	$۶,۴۵e+۲$	$۱,۳۵e+۱$	نسبت زمانی

سناریو در شکل ۳ ارائه شده است. همان طور که مشخص است با افزایش تعداد زیرباند هر ایستگاه پایه کاربران بیشتری در شبکه می‌توانند سرویس‌دهی شوند و لذا مجموع بهره‌وری کاربران افزایش می‌یابد. مقدار پایین‌تر $IRPL$ در شبکه سبب می‌شود که هر ایستگاه پایه بتواند به کاربران در محدوده بزرگ‌تری ارسال داشته باشد، اما از طرف دیگر سبب ایجاد تداخل برای کاربران بیشتری خواهد شد. در سناریوی شکل ۳ کاهش $IRPL$ سبب ایجاد اتصالاتی با بهره‌وری بیشتری شده و لذا مجموع بهره‌وری بالاتری حاصل می‌شود.

در سناریوی بعدی شبکه‌ای با تعداد [۱,۳,۶] ایستگاه پایه و هر کدام دارای ۱۰ زیرباند در نظر گرفته شده است. همان طور که شکل ۴ نشان می‌دهد با افزایش تعداد کاربران موجود در شبکه مجموع بهره‌وری شبکه در حال افزایش است. با افزایش تعداد کاربران تعداد اتصالاتی موجود در شبکه افزایش یافته اما به تدریج سرعت افزایش تعداد اتصالات کاهش می‌یابد (شکل ۵) اما با ادامه افزایش تعداد کاربران به علت انتخاب اتصالاتی با بهره‌وری بالاتر همچنان بهره‌وری شبکه در حال افزایش است (شکل ۴).

در سناریوی بعدی شبکه‌ای با ۸۰ کاربر در نظر گرفته شده و همچنین تعداد زیرباند‌های موجود در هر ایستگاه پایه ۱۰ عدد است. در شکل ۶ بر روی محور افقی تعداد ایستگاه‌های پایه در هر حالت به نمایش درآمده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش تعداد ایستگاه‌های پایه کوچک مجموع بهره‌وری کاربران برای هر دو مقدار $IRPL$ افزایش می‌یابد. اما افزایش بهره‌وری برای $IRPL$ بالاتر سرعت بیشتری دارد زیرا در شبکه‌ای با $IRPL = 1e-7$ نسبت به شبکه‌ای با $IRPL = 1e-8$

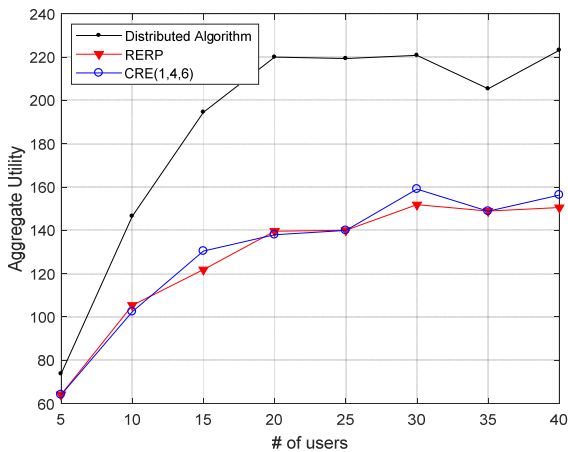
مسئله تغییر می‌کند تا تأثیر افزایش آن پارامتر نیز مشاهده گردد. در تنظیمات اول، دوم و سوم به ترتیب تعداد زیرباند‌ها، تعداد ایستگاه‌های پایه شبکه و تعداد کاربران تغییر می‌یابد. در سطر اول این جدول شرایط شبکه از نظر تعداد ایستگاه‌های پایه از سه رده ماکرو، میکرو و فمتو و سپس تعداد کاربران و تعداد زیرباند‌ها آورده شده است. در هر ستون مقدار پاسخ مسئله و زمان برای هر دو راه‌حل مسئله آورده شده و همچنین مقدار دو معیار تعریف‌شده محاسبه گردیده و در ادامه آن ارائه شده است.

با توجه به مقادیر صفر و نزدیک به صفر معیار فاصله متقابل در جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار تابع هدف در الگوریتم توزیعی به پاسخ بهینه بسیار نزدیک بوده و حتی در برخی موارد برابر می‌باشد. مقادیر معیار نسبت زمانی بزرگ‌تر از واحد بوده و با بزرگ‌تر شدن شبکه بسیار بالا می‌رود که نشان‌دهنده مدت زمان اجرای بسیار کمتر الگوریتم توزیعی نسبت به روش یافتن پاسخ بهینه می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم توزیعی پیشنهادشده الگوریتم مناسبی بوده که پاسخ‌های نزدیک به بهینه و مدت زمان اجرای پایینی دارد.

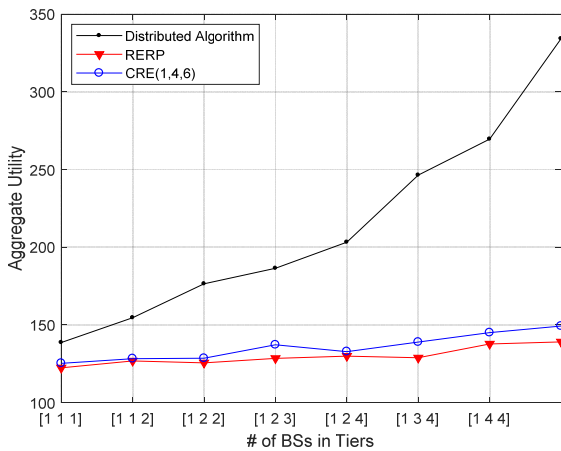
۵-۳ تأثیر پارامترهای مسئله

در این بخش تأثیر پارامترهای مسئله بر روی مقدار مجموع بهره‌وری کاربران مورد بررسی قرار گرفته شده است. در نمودارهای زیر هر نقطه میانگین ۱۰ بار اجرا است. مقدار مجموع بهره‌وری کاربران شبکه در هر شکل برای دو مقدار $IRPL$ محاسبه شده است.

در سناریوی اول تعداد ۱۰۰ کاربر را در شبکه‌ای با تعداد [۱,۳,۶] ایستگاه پایه قرار داده و با تغییر زیرباند‌های موجود در هر ایستگاه پایه الگوریتم توزیعی را اجرا کرده‌ایم. نمودار مقادیر مجموع بهره‌وری این



شکل ۷: مجموعه بهره‌وری کاربران با تغییر تعداد کاربران برای روش الگوریتم پیشنهادی، روش RSRP و روش CRE(۶,۴,۱).

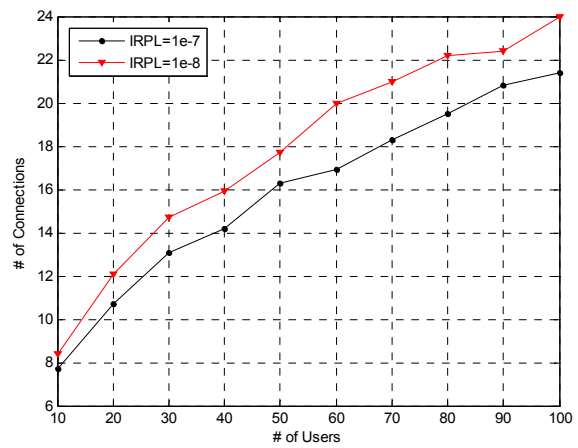


شکل ۸: مجموع بهره‌وری کاربران با تغییر تعداد ایستگاه‌های پایه برای روش الگوریتم پیشنهادی، روش RSRP و روش CRE(۶,۴,۱).

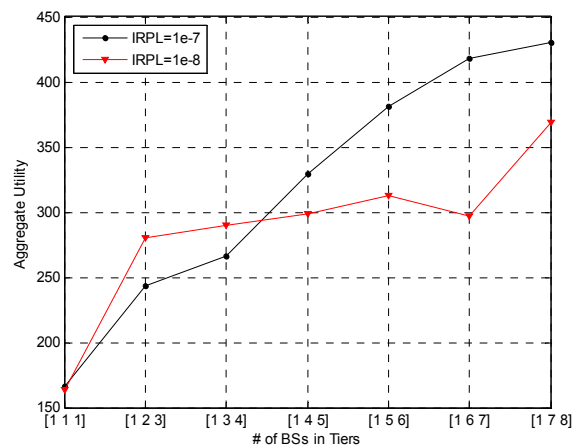
الگوریتم پیشنهادی یک الگوریتم تکرارشونده است که در هر تکرار اتصال‌ها بهبود یافته و از ظرفیت باقیمانده شبکه استفاده بهتری می‌شود. اما روش‌های RSRP و CRE تک‌مرحله‌ای بوده و با وجود زمان اجرای پایین‌تر لزوماً اتصال‌های مناسب را برقرار نکرده و همچنین با افزایش تعداد ایستگاه‌ها توانایی استفاده بهینه از ظرفیت افزوده شده به شبکه را ندارند.

۶- جمع‌بندی

در این مقاله به مطالعه مسأله اختصاص سلول و زیرباند به کاربران شبکه‌های سلولی ناهمگون با هدف بهینه‌سازی بهره‌وری شبکه پرداخته‌ایم. برای این منظور ابتدا دو مسأله چالش‌برانگیز اختصاص سلول و مدیریت تداخل که در شبکه‌های ناهمگون نیاز به تحقیق و ارائه مجدد راه‌حل دارند مطرح شده است. سپس به ارتباط دوجانبه این دو مسأله به یکدیگر پرداخته و حل توأمان این دو مسأله در شبکه سلولی ناهمگون مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی تداخل در این تحقیق از مدل تداخل پروتکل استفاده شده که مناسب شبکه‌های سلولی مبتنی بر OFDMA می‌باشد. انواع روش‌های ارائه محدودیت تداخل جهت فرموله کردن مسأله ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سپس مسأله مورد نظر به شکل مسأله بهینه‌سازی عدد صحیح فرموله شده است. به علت ساختار متفاوت ایستگاه‌های پایه در شبکه ناهمگون راه‌حل‌های توزیع‌شده در اولویت و در عمل قابل پیاده‌سازی می‌باشند. بعد از به



شکل ۵: تعداد اتصال‌های شبکه با تغییر تعداد کاربران شبکه برای دو مقدار IRPL.



شکل ۶: مجموع تابع بهره‌وری کاربران با تغییر تعداد ایستگاه‌های پایه کوچک در شبکه برای دو مقدار IRPL.

ناحیه تداخل و ارسال هر ایستگاه پایه کوچک‌تر بوده، لذا با افزایش تراکم ایستگاه پایه، تعداد کاربران بیشتری تحت پوشش ایستگاه‌های پایه قرار گرفته و از طرفی به دلیل ناحیه تداخل کوچک‌تر ایستگاه‌های پایه می‌توانند کاربران بیشتری را بدون ایجاد تداخل بین سلولی اتصال بدهند.

۵- مقایسه با روش‌های اختصاص سلول

در این بخش نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی با دو روش رایج اختصاص سلول مورد مقایسه قرار می‌گیرد: روش RSRP که از روش‌های مرسوم انتخاب سلول در شبکه‌های تک‌مرحله‌ای بوده و روش CRE که در استانداردسازی LTE-A از آن برای تخصیص سلول در ارتباط فرسوس استفاده شده است. این دو روش در بخش اول مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ضرایب بایاس روش CRE در این شبیه‌سازی به ترتیب برای ایستگاه پایه ماکرو، پیکو و فمتو برابر ۱، ۴ و ۶ در نظر گرفته شده است. این دو روش جهت مقایسه با الگوریتم پیشنهادی این مقاله در مدل سیستم این مقاله پیاده‌سازی شده‌اند، بدین معنی که همانند روش پیشنهادی با حذف برخی اتصال‌ها، در مجموعه اتصال نهایی آنها تداخلی وجود ندارد.

در نمودارهای زیر هر نقطه میانگین ۱۰ بار اجرا است. همان‌طور که در شکل ۷ و ۸ مشخص است مجموع بهره‌وری کاربران در الگوریتم به میزان قابل توجهی بالاتر از این مقدار برای روش‌های RSRP و CRE است. با افزایش تعداد ایستگاه‌های پایه اختلاف بهره‌وری الگوریتم پیشنهادی با روش‌های پیشین افزایش می‌یابد (شکل ۸)، بدین علت که

- [13] Q. Ye, M. Al-Shalash, C. Caramanis, and J. G. Andrews, "On/off macrocells and load balancing in heterogeneous cellular networks," in *Proc. IEEE Global Communications Conf., GLOBECOM'13*, pp. 3814-3819, Atlanta, GA, USA, 9-13 Dec. 2013.
- [14] S. A. Kazmi, N. H. Tran, W. Saad, L. B. Le, T. M. Ho, and C. S. Hong, "Optimized resource management in heterogeneous wireless networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 7, pp. 1397-1400, Jul. 2016.
- [15] Z. Jiang, S. Mao, and X. Wang, "Dynamic downlink resource allocation and access strategy for femtocell networks," *Trans. on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 28, no. 9, e3151, Sept. 2017.
- [16] N. Wang, E. Hossain, and V. K. Bhargava, "Joint downlink cell association and bandwidth allocation for wireless backhauling in two-tier HetNets with large-scale antenna arrays," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 15, no. 5, pp. 3251-3268, May 2016.
- [17] F. Boccardi, J. Andrews, H. Elshaer, M. Dohler, S. Parkvall, P. Popovski, et al., "Why to decouple the uplink and downlink in cellular networks and how to do it," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 3, pp. 110-117, Mar. 2016.
- [18] A. Iyer, C. Rosenberg, and A. Karnik, "What is the right model for wireless channel interference?," *IEEE Trans. On Wireless Communications*, vol. 8, no. 5, pp. 2662-2671, May 2009.
- [19] B. Bakhshi, S. Khorsandi, and A. Capone, "On-line joint QoS routing and channel assignment in multi-channel multi-radio wireless mesh networks," *Computer Communications*, vol. 34, no. 11, pp. 1342-1360, Jul. 2011.
- [20] R. Gupta, J. Musacchio, and J. Walrand, "Sufficient rate constraints for QoS flows in ad-hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 5, no. 4, pp. 429-443, May 2007.
- [21] D. P. Palomar and M. Chiang, "A tutorial on decomposition methods for network utility maximization," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 8, pp. 1439-1451, Aug. 2006.
- [22] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.
- [23] D. P. Palomar and M. Chiang, "Alternative distributed algorithms for network utility maximization: framework and applications," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 52, no. 12, pp. 2254-2269, Dec. 2007.
- [24] D. P. Bertsekas, *Convex Optimization Theory*, Athena Scientific Belmont, 2009.
- [25] L. A. N. Lorena and M. G. Narciso, "Relaxation heuristics for a generalized assignment problem," *European J. of Operational Research*, vol. 91, no. 3, pp. 600-610, Jun. 1996.

مریم چینی‌پرداز تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی کامپیوتر و کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات گرایش شبکه‌های کامپیوتری به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ در دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است. وی در سال ۱۳۹۷ موفق به اخذ مدرک دکتری در مهندسی فناوری اطلاعات از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. ایشان هم‌اکنون در دانشگاه صنعتی جندی شاپور مشغول به فعالیت می‌باشد. از زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان می‌توان به شبکه‌های سلولی و شبکه‌های موردی با تأکید بر تخصیص بهینه منابع اشاره کرد.

سید مجید نورحسینی مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در سال ۱۳۶۵ و ۱۳۶۸ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمود. ایشان در سال ۱۳۷۳ موفق به اخذ مدرک دکترا از دانشگاه مگ‌گیل در مونترال کانادا گردید. ایشان در سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۴ در سمت محقق ارشد در شرکت سازنده تجهیزات مخابراتی نورتل در کانادا و ایالات متحده در زمینه‌های مختلف شبکه و مدیریت شبکه مشغول به فعالیت بوده است. دکتر نورحسینی از سال ۱۳۸۴ در دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه صنعتی امیرکبیر در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های پژوهش فعلی او شامل بهینه‌سازی پهنای باند در شبکه‌های سلولی نسل آینده و نیز موضوعات مختلف مرتبط با کاربرد نرم‌افزار در مدیریت شبکه می‌باشد.

کارگیری محدودیت تداخل مناسب مسأله ساده‌سازی شده به گونه‌ای که تنها با یک تجزیه دوگان یک‌سطحی تجزیه شده و الگوریتمی توزیع‌شده با پیچیدگی مناسب و پاسخی نزدیک به بهینه ارائه گردیده است. در الگوریتم پیشنهادی تمامی محاسبات محلی بوده و هر کاربر تنها به اطلاعات ایستگاه‌های پایه ناحیه تداخل خود نیاز دارد و هر ایستگاه پایه نیز تنها به تبادل اطلاعات با ایستگاه‌های پایه همسایه خود نیاز دارد، لذا این الگوریتم دارای قابلیت پیاده‌سازی به صورت توزیع‌شده است. نتایج شبیه‌سازی به تأیید کارایی روش پیشنهادی پرداخته است.

در ادامه این پژوهش سعی می‌شود مسأله اختصاص سلول در شبکه‌های ناهمگون با امکان انتخاب چندین زیرباند برای هر کاربر بررسی شده و الگوریتمی توزیع‌شده برای آن ارائه شود. راه‌حل پیشنهادی برای بهبود کارکرد شبکه‌های نسل چهار مناسب بوده و همچنین با توجه به این که ایده‌های طراحی شبکه‌های مخابراتی نسل پنجم در حال بررسی است، راه‌حل ارائه‌شده می‌تواند در این زمینه نیز کارآمد باشد.

مراجع

- [1] H. Boostanimehr and V. K. Bhargava, "Unified and distributed QoS-driven cell association algorithms in heterogeneous networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 14, no. 3, pp. 1650-1662, Mar. 2015.
- [2] R. Q. Hu and Y. Qian, *Heterogeneous Cellular Networks*, John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [3] Y. Bejerano and S. J. Han, "Cell breathing techniques for load balancing in wireless LANs," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 8, no. 6, pp. 735-749, Jun. 2009.
- [4] J. Sangiamwong, Y. Saito, N. Miki, T. Abe, S. Nagata, and Y. Okumura, "Investigation on cell selection methods associated with inter-cell interference coordination in heterogeneous networks for LTE-advanced downlink," in *Proc. 11th European Wireless - Sustainable Wireless Technologies*, 6 pp, Vienna, Austria, 27-29 Apr. 2011.
- [5] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, and A. Abdelnasser, "Evolution towards 5G multi-tier cellular wireless networks: an interference management perspective," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 118-127, Jun. 2014.
- [6] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, M. Al-Shalash, C. Caramanis, and J. G. Andrews, "User association for load balancing in heterogeneous cellular networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2706-2716, Jun. 2013.
- [7] K. Son, S. Chong, and G. D. Veciana, "Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 8, no. 7, pp. 3566-3576, Jul. 2009.
- [8] M. Chinipardaz and M. Noorhosseini, "A study on cell association in heterogeneous networks with joint load balancing and interference management," *Telecommunication Systems*, vol. 66, no.1, pp. 55-74, Sept. 2017.
- [9] J. G. Andrews, "Interference cancellation for cellular systems: a contemporary overview," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 2, pp. 19-29, Apr. 2005.
- [10] R. Madan, et al., "Cell association and interference coordination in heterogeneous LTE-A cellular networks," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 9, pp. 1479-1489, Dec. 2010.
- [11] H. Wang, L. Ding, P. Wu, Z. Pan, N. Liu, and X. You, "Dynamic load balancing and throughput optimization in 3GPP LTE networks," in *Proc. of the 5th Int. ICST Conf. on Communications and Networking in China.*, pp. 939-943, Beijing, China, 25-27 Aug. 2010.
- [12] A. Damnjanovic, et al., "A survey on 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 10-21, Jun. 2011.