مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد شبکه‌های ناهمگن با محدودیت بک‌هال با به کارگیری سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا

عاطفه جعفریان، زلفا زینل‌پور یزدی و علی‌اکبر تدین تفت

چکیده: یکی از چالش‌های اساسی شبکه‌های سلولی ناهمگن که در آنها ایستگاه‌های پایه مختلف با ویژگی‌های متفاوت به سرویس‌دهی کاربران می‌پردازند، سیاست دسترسی کاربران به ایستگاه‌های پایه است. در این مقاله به منظور بهبود عملکرد ارتباط فراسو در شبکه ناهمگنی که از محدودیت بک‌هال در ایستگاه‌های پایه رنج می‌برد، سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا پیشنهاد می‌گردد. در این نوع سیاست، کاربر می‌تواند به دو ایستگاه پایه مجزا در ارتباط فراسو و فروسو متصل گردد. به منظور بهره‌برداری کارامد از منابع شبکه و افزایش گذردهی کاربران متصل به سلول‌های پربار، معیار دسترسی کاربران به ایستگاه‌های پایه در ارتباط فراسو، برقراری تعادل بار در این ارتباط در نظر گرفته شده است. به این منظور شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه و توان ارسالی آنها از حل مسأله بهینه‌سازی بیشینه‌کردن مجموع نرخ مؤثر کاربران به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با به کارگیری این معیار، در سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا، شاخص تعادل بار، کارایی انرژی و متوسط نرخ مؤثر کاربران در این ارتباط به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. از آنجا که نرم‌افزار گمز جواب دقیق مسأله بهینه‌سازی را محاسبه می‌کند و به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، مسأله فوق در شبکه بک‌هال با استفاده از نرم‌افزار گمز نیز حل شده است. نتایجی که از الگوریتم پیشنهادی به دست آمده به نتایج محاسبه‌شده از نرم‌افزار گمز نزدیک می‌باشد که نشان‌دهنده دقت مناسب الگوریتم پیشنهادی است. در ادامه نیز روشی برای بهبود تعادل بار در ارتباط فراسو در شبکه‌های ناهمگن که دارای محدودیت بک‌هال می‌باشند، پیشنهاد می‌شود و کارایی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

***کلیدواژه:* ارتباط فراسو، تعادل بار، سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا، شبکه‌های ناهمگن، محدودیت بک‌هال.**

۱- مقدمه

افزایش روزافزون گوشی‌های هوشمند، تبلت‌ها و سایر وسایل سیار متصل به اینترنت و رشد تقاضای داده به صورت نمایی، اپراتورها را وادار به افزایش ظرفیت شبکه کرده است [۱]. یکی از راه حل‌های مؤثر در راستای افزایش ظرفیت، برپایی شبکه‌ها به صورت ناهمگن[1] است [۱].

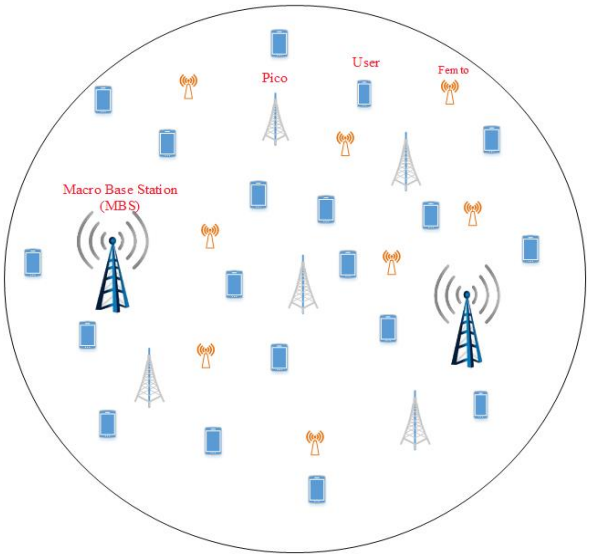
این مقاله در تاریخ ۱۱ مرداد ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۳۱ خرداد ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد.

عاطفه جعفریان، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: atefah.jafarian@gmail.com).
زلفا زینل‌پور یزدی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: zeinalpour@yazd.ac.ir).
علی‌اکبر تدین تفت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: tadaion@yazd.ac.ir).

1. Heterogeneous Network

شبکه‌های ناهمگن یک توپولوژی جدید هستند که می‌توانند پوشش و ظرفیت کل شبکه را بهبود ببخشند. این نوع شبکه‌ها ترکیبی از شبکه‌های چندلایه از قبیل ماکروسل و سلول‌های کوچک هستند که در آرایش آنها، ماکروسل یک ناحیه گسترده را تحت پوشش دارد در حالی که در نواحی مهم و پرترافیک عناصر با توان کم (سلول‌های کوچک) پوشش را بهبود می‌بخشند و کمک می‌کنند تا نرخ داده قابل حصول بالایی با پوشش‌دهی محلی در این مکان‌ها به دست آید [۱]. ناهمگنی در شبکه‌های سلولی، چالش‌هایی را نیز به همراه دارد. یکی از چالش‌های اساسی این شبکه‌ها با توجه به تعدد ایستگاه‌های پایه، سیاست دسترسی کاربران به این ایستگاه‌ها می‌باشد. برای دسترسی کاربران به ایستگاه پایه دو سیاست دسترسی ارتباط فراسو[2] و فروسو[3] به صورت با هم[4] و ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا[5] وجود دارد. در سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت با هم، کاربر به یک ایستگاه پایه در ارتباط فراسو و فروسو متصل می‌گردد. این ایستگاه پایه عموماً بر اساس بهینه‌کردن مقادیر پارامترهای ارتباط فروسو انتخاب می‌شود. بنابراین سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت با هم، ارتباط فروسوی بهینه را با فداکردن بخشی از عملکرد ارتباط فراسو تضمین می‌کند که این نوع سیاست در حال حاضر به طور وسیع در شبکه‌های سلولی استفاده می‌شود [۲]. در سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا، کاربر به دو ایستگاه پایه مجزا در ارتباط فراسو و فروسو متصل می‌شود که با برقراری یک اتصال به دو ایستگاه پایه در یک زمان گذردهی سیستم افزایش می‌یابد [۳]. معیار انتخاب ایستگاه پایه در ارتباط فروسو بر اساس بهینه‌کردن مقادیر پارامترهای این ارتباط و معیار انتخاب ایستگاه پایه در ارتباط فراسو بر اساس بهینه‌کردن مقادیر پارامترهای ارتباط فراسو است. بنابراین با به کارگیری سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا، بهینه‌سازی ارتباط فراسو تحقق می‌یابد، در حالی که ارتباط فروسوی بهینه نیز همچنان برقرار می‌باشد که این موجب بهبود عملکرد کل سیستم می‌گردد [۴]. در سیاست دسترسی به صورت جدا، قانون اختصاص سلول‌ها در ارتباط فراسو مستقل از ارتباط فروسو خواهد بود. انتخاب ایستگاه پایه در ارتباط فراسو به گونه‌ای است که الزامات متنوع خدمات ارتباط فراسو را برآورده کند. در [۵] کاربر در ارتباط فراسو به ایستگاه پایه‌ای متصل می‌شود که در این ارتباط، اتلاف مسیر حداقل باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که متوسط نرخ کاربر و همچنین کارایی طیف و کارایی انرژی در سیاست دسترسی به صورت جدا به طور قابل توجهی

2. Uplink
3. Downlink
4. Couple
5. Decouple



شکل ۱: شماتیک مدل سیستم.

افزایش یافته است. مرجع [۶] سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا در شبکه‌های ناهمگن چندورودی- چندخروجی را از لحاظ احتمال اختصاص کاربران و کارایی طیفی ارتباط فراسو بررسی می‌کند. این مرجع دو سیاست دسترسی به ایستگاه پایه در ارتباط فراسو برای کاربران در نظر می‌گیرد: ۱) سیاست دسترسی حداکثر SNR و ۲) سیاست دسترسی حداقل اتلاف مسیر. سپس کارایی طیفی ارتباط فراسوی این دو سیاست با هم مقایسه شده و در نهایت با سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت با هم نیز مقایسه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیاست دسترسی حداکثر SNR، منجر به کارایی طیفی بالاتری می‌شود.

محدودیت بک‌هال یکی از تنگناهای کلیدی در سیستم ارتباطات مدرن می‌باشد. مرجع [۷] سیاست دسترسی ارتباط فراسو در شبکه‌های ناهمگن با محدودیت بک‌هال را بررسی می‌کند که ایستگاه‌های پایه سلول کوچک از طریق خطوط بک‌هال غیر ایده‌آل به ایستگاه‌های پایه ماکروسل متصل می‌شوند. سیاست دسترسی در این مرجع بر اساس ظرفیت ارتباط فراسو بوده است، به این گونه که کاربر به ایستگاه پایه‌ای متصل می‌شود که بالاترین ظرفیت را برای او داشته باشد. احتمال اختصاص کاربران و احتمال پوشش SINR ارتباط فراسو محاسبه شده و نتایج نشان می‌دهد که سیاست دسترسی به صورت جدا کارایی طیف و کارایی انرژی و احتمال پوشش SINR را افزایش می‌دهد. برقراری تعادل بار در شبکه‌های ناهمگن به منظور بهره‌برداری از منابع سیستم به صورت کارامد و افزایش گذردهی کاربران متصل به سلول‌های پربار اهمیت ویژه‌ای دارد. روش‌های مختلفی از قبیل توسعه حوزه سلول‌ها [۸] و استفاده از کاربران رله برای انتقال بار اضافی بین سلول‌های همسایه [۹] برای ایجاد تعادل بار در شبکه‌های ناهمگن استفاده می‌شود. در [۱۰] به منظور برقراری تعادل بار در ارتباط فروسو در شبکه ناهمگن، اختصاص کاربران به ایستگاه‌های پایه به گونه‌ای به دست می‌آید تا مجموع وزن نرخ مؤثر کاربران در شبکه ناهمگن ماکسیمم شود. به خاطر اهمیت برقراری تعادل بار در شبکه‌های ناهمگن و از آنجا که در تحقیقات ذکر شده برای برقراری تعادل بار در شبکه‌ها، کارایی الگوریتم‌ها با وجود محدودیت بک‌هال ارزیابی نشده است، در این مقاله، معیار دسترسی کاربران به ایستگاه‌های پایه در ارتباط فراسو در سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا، برقراری تعادل بار در این ارتباط در نظر گرفته می‌شود. برای برقراری تعادل بار در ارتباط فراسو از روش بیشینه‌سازی مجموع نرخ مؤثر کاربران استفاده می‌شود. به این منظور شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه و توان ارسالی آنها از حل مسأله بهینه‌سازی بیشینه‌کردن مجموع نرخ مؤثر کاربران به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با به کارگیری این معیار در ارتباط فراسو در سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا، شاخص تعادل بار، کارایی انرژی و متوسط نرخ مؤثر کاربران به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. در ادامه نیز در راستای بهبود الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه، ضریب بایاسی برای بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش هر لایه در نظر گرفته می‌شود. مقدار این ضریب به چگالی ایستگاه‌های پایه هر لایه و بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش هر لایه وابسته خواهد بود. خواهیم دید که با این تغییر تعادل بار به صورت مؤثرتری در ایستگاه‌های پایه برقرار خواهد شد. عمده نوآوری‌های مقاله به صورت خلاصه به صورت زیر می‌باشد:

- در نظر گرفتن محدودیت بک‌هال برای ایستگاه‌های پایه و محاسبه شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه و توان ارسالی آنها و محاسبه سطح تعادل بار با در نظر گرفتن این محدودیت
- بهبود تعادل بار با واردکردن ضریب بایاسی برای بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش هر لایه
- پیداکردن جواب دقیق مسأله با استفاده از نرم‌افزار گمز[1] (جهت مقایسه)

ساختار مقاله حاضر در ادامه بدین صورت است: در بخش دوم به فرمول‌بندی مسأله پرداخته می‌شود و تحلیل اختصاص کاربران به ایستگاه‌های پایه و توان ارسالی کاربران در بخش‌های سوم و چهارم بیان می‌گردد. در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی آورده می‌شود و در بخش ششم نتیجه‌گیری مقاله بیان می‌گردد.

۲- فرمول‌بندی مسأله

در این مقاله شبکه ناهمگن سه‌لایه که شامل لایه‌های ماکروسل، پیکوسل و فمتوسل هست، در نظر گرفته شده است. هر لایه از لحاظ چگالی ایستگاه‌های پایه متفاوت است. تعداد ایستگاه‌های پایه لایه ماکروسل، فمتوسل و پیکوسل و همچنین تعداد کاربران آنها متغیر تصادفی پوآسون در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۱، ایستگاه‌های پایه لایه‌های ماکروسل، فمتوسل و پیکوسل و همچنین کاربران به صورت یکنواخت در محیط دایره‌ای با شعاع معلوم R پخش شده‌اند. در روابط، مجموعه ایستگاه‌های پایه با N و مجموعه کاربران با K مشخص شده‌اند. فرض شده که ایستگاه‌های پایه دارای محدودیت بک‌هال هستند و لذا به دلیل این محدودیت، به طور هم‌زمان به تعداد محدودی کاربر می‌توانند سرویس دهند که این بیشینه تعداد برای لایه‌های مختلف، متفاوت است.

در مدل‌کردن کانال تلفات مسیر به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$PL_{n,k} = L_n r^{-\alpha} \qquad (۱)$$

که در آن $PL_{n,k}$ بیانگر تلفات مسیر بین سیگنال ارسالی کاربر k و ایستگاه پایه n بوده و L_n نماد تلفات مسیر تا فاصله مرجع و $\alpha > ۲$ ضریب تضعیف توان است. در این سناریو کانال ارسالی بین فرستنده و گیرنده با فیدینگ shadow-lognormal مدل شده است [۱۰].

1. Gams

نسبت سیگنال به تداخل به اضافه نویز در ایستگاه پایه nام که کاربر kام به آن متصل می‌شود طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$SINR_{n,k} = \frac{p_k g_{n,k}}{\sum_{j\in K, \neq k} p_j g_{n,j} + \sigma_n^2} \ , \ n \in N \qquad (۲)$$

که در این رابطه p_k توان ارسالی کاربر kام، $g_{n,k}$ بهره کانال بین کاربر k و ایستگاه پایه n و σ_n^2 نیز چگالی طیفی توان نویز در ایستگاه پایه nام است. نرخ قابل دستیابی کاربر kام که به ایستگاه پایه nام متصل است برابر است با $r_{n,k} = \log(1+SINR_{n,k})$. در این مقاله بار ایستگاه پایه به صورت تعداد کاربرانی که به آن ایستگاه پایه متصل می‌شوند تعریف می‌شود. اتصال چندین کاربر به یک ایستگاه پایه موجب می‌شود تا نرخ کاربران از نرخ قابل دستیابی که از رابطه شانون محاسبه می‌گردد کمتر شود [۱۰]. اگر تعداد کاربرانی که به ایستگاه پایه n متصل هستند، با پارامتر y_n مشخص شود، نرخ مؤثر کاربر k که به ایستگاه پایه n متصل است از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]

$$R_{n,k} = \frac{r_{n,k}}{y_n} = \frac{1}{y_n}\log(1+SINR_{n,k}) \qquad (۳)$$

که در این رابطه $y_n = \sum_{k\in K} x_{nk}$ بار ایستگاه پایه n در ارتباط فراسو است. طبق (۳) نرخ مؤثر یک کاربر به نرخ قابل دستیابی آن و بار ایستگاه پایه‌ای که کاربر به آن متصل است، مربوط می‌شود و بنابراین نرخ مؤثر می‌تواند به عنوان عامل کلیدی برای برقراری تعادل بار در شبکه ناهمگن در نظر گرفته شود. در این مقاله متغیری با عنوان شاخص ارتباط کاربر با ایستگاه پایه تعریف می‌شود که با $x_{n,k}$ نشان داده می‌شود. هنگامی که این متغیر مقدار یک داشته باشد به این معنا است که کاربر به ایستگاه پایه متصل است و اگر مقدار آن صفر باشد این اتصال برقرار نیست. در این مقاله با هدف برقراری تعادل بار بین لایه‌های مختلف شبکه در ارتباط فراسو و بیشینه‌سازی گذردهی سیستم، شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه پایه از حل مسأله بهینه‌سازی بیشینه‌کردن مجموع نرخ مؤثر کاربران که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود، به دست می‌آید

$$\begin{aligned}
&\max_{X,P} \sum_{n\in N}\sum_{k\in K} x_{n,k} R_{nk}(X,P) \\
&\text{s.t.} \\
&۱.\ \sum_{n\in N} x_{nk} = 1 \ , \ \forall k \in K \\
&۲.\ x_{n,k} \in \{0,1\} \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \\
&۳.\ \sum_{n\in k} x_{nk} \le y_M^{\max} \ , \ \forall n \in N^M \\
&۴.\ \sum_{n\in k} x_{nk} \le y_P^{\max} \ , \ \forall n \in N^P \\
&۵.\ \sum_{n\in k} x_{nk} \le y_F^{\max} \ , \ \forall n \in N^F \\
&۶.\ 0 \le P_k \le P_k^{\max} \ , \ \forall k \in K
\end{aligned} \qquad (۴)$$

در این رابطه $x_{n,k}$ شاخص ارتباط کاربر k و ایستگاه پایه n می‌باشد. محدودیت اول در این رابطه نشان می‌دهد که هر کاربر مجاز است تا تنها به یک ایستگاه پایه متصل شود. مجموعه ایستگاه‌های پایه لایه‌های ماکروسل، پیکوسل و فمتوسل به ترتیب با N^M، N^P و N^F مشخص می‌شوند. بیشینه تعداد کاربران سرویس داده شده توسط هر ماکروسل، پیکوسل و فمتوسل به ترتیب با $y_M^{\max}$، $y_P^{\max}$ و $y_F^{\max}$ نشان داده می‌شوند. محدودیت‌های سوم، چهارم و پنجم نشان می‌دهند که تعداد کاربران متصل به ایستگاه‌های پایه لایه‌های ماکروسل و پیکوسل و فمتوسل باید از مقدار بیشینه که برای هر لایه تعیین شده کمتر باشد و طبق محدودیت ششم برای توان ارسالی کاربران بیشینه در نظر گرفته شده که در (۴) $P = \{p_k, \forall k \in K\}, X = \{x_{nk}, \forall n \in N, \forall k \in K\}$.

۳- تحلیل اختصاص کاربران به ایستگاه‌های پایه

مسأله (۴) یک مسأله بهینه‌سازی غیر خطی و گسسته باینری است که حل آن پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد [۱۰] و پیداکردن جواب بهینه سراسری این مسأله غیر عملی است. برای پیداکردن جواب زیربهینه آن، الگوریتم تکراری دولایه با استفاده از روش بهینه‌سازی لاگرانژ پیشنهاد می‌شود که این حل منجر به توان ارسالی بهینه و همچنین شاخص ارتباط بهینه برای کاربران خواهد شد [۱۰]. لایه بیرونی این الگوریتم تکراری، شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه را با ثابت در نظر گرفتن توان ارسالی کاربران به دست می‌آورد و لایه داخلی توان ارسالی کاربران را با ثابت در نظر گرفتن شاخص ارتباط کاربران، به روز رسانی می‌کند که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم. برای به دست آوردن الگوریتم تکراری لایه بیرونی، مشابه [۱۰] بردار توان ارسالی کاربران معلوم فرض می‌شود و مسأله بهینه‌سازی به صورت رابطه زیر بازنویسی می‌شود

$$\begin{aligned}
&\max_{X,\omega} \sum_{n\in N}\sum_{k\in K} \omega_{n,k} x_{n,k} \\
&\text{s.t.} \\
&\sum_{n\in N} x_{nk} = 1 \ , \ \forall k \in K \\
&R_{n,k} \ge \omega_{n,k} \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \\
&x_{n,k} \in \{0,1\} \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \\
&\sum_{n\in k} x_{nk} \le y_M^{\max} \ , \ \forall n \in N^M \\
&\sum_{n\in k} x_{nk} \le y_P^{\max} \ , \ \forall n \in N^P \\
&\sum_{n\in k} x_{nk} \le y_F^{\max} \ , \ \forall n \in N^F
\end{aligned} \qquad (۵)$$

از روابط بالا دیده می‌شود هنگامی که $R_{n,k} = \omega_{n,k}$ باشد، (۵) کران پایین برای (۴) است. مشابه [۱۰] محدودیت دوم رابطه فوق به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$r_{n,k} \ge \omega_{n,k}\left(\sum_{i\in k} x_{ni}\right) \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \qquad (۶)$$

برای این که مخرج در عبارات بعدی که محاسبه خواهد شد صفر نشود، (۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$r_{n,k} \ge \omega_{n,k}\left(1+\sum_{i\in k} x_{ni}\right) \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \qquad (۷)$$

ضریب لاگرانژ $\mu = \{\mu_{n,k}, \forall n \in N, \forall k \in K\}$ برای حل مسأله بهینه‌سازی فوق برای این محدودیت تعریف می‌گردد و تابع لاگرانژ آن طبق زیر نوشته می‌شود

$$\begin{aligned}
\ell(X,\omega,\mu) = &\sum_{n\in N}\sum_{k\in K} \mu_{nk}\left(r_{nk} - \omega_{nk} - \omega_{nk}\sum_{i\in K} x_{ni}\right) \\
&+ \sum_{n\in N}\sum_{k\in K} x_{nk}\omega_{nk}
\end{aligned} \qquad (۸)$$

با اعمال شرایط KKT[1]، $\mu_{n,k}$ و $\omega_{n,k}$ طبق روابط زیر به دست می‌آید

1. Karush-Kuhn-Tucker

$$\mu_{n,k} = \frac{x_{n,k}}{1+\sum_{i\in K} x_{n,i}} \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K$$
$$\omega_{n,k} = \frac{r_{n,k}}{1+\sum_{i\in K} x_{n,i}} \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \quad (۹)$$

مشابه [۱۰] معادله حداکثرسازی به صورت رابطه زیر بازنویسی می‌شود

$$\max_{X} \sum_{n\in N}\sum_{k\in K} x_{n,k}\{\omega_{n,k} - \sum_{i\in K}\mu_{n,i}\omega_{n,i}\}$$
s.t.
$$\sum_{n\in N} x_{nk} = 1 \ , \ \forall k \in K$$
$$x_{n,k} \in \{0,1\} \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \quad (۱۰)$$
$$\sum_{n\in k} x_{nk} \le y_M^{\max} \ , \ \forall n \in N^M$$
$$\sum_{n\in k} x_{nk} \le y_P^{\max} \ , \ \forall n \in N^P$$
$$\sum_{n\in k} x_{nk} \le y_F^{\max} \ , \ \forall n \in N^F$$

از رابطه فوق مشخص است که هر کاربر ایستگاه پایه خود را طبق رابطه زیر انتخاب می‌کند

$$n* = \arg\max\{\omega_{n,k} - \sum_{i\in K}\mu_{n,i}\omega_{n,i}\} \ , \ \forall k \in K, n \in N \quad (۱۱)$$

با طراحی یک الگوریتم تکراری می‌توان مقدار بهینه شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه پایه را محاسبه نمود. در ادامه این الگوریتم بیان می‌گردد و پیش از آن تعدادی توابع که در این الگوریتم استفاده شده است به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰]

$$\phi_{nk}(\mu_{nk}) \triangleq \mu_{nk}(1+\sum_{i\in K} x_{ni}) - x_{nk} \quad (۱۲)$$

$$\Psi_{nk}(\omega_{nk}) \triangleq \omega_{nk}(1+\sum_{i\in K} x_{ni}) - r_{nk} \quad (۱۳)$$

$$\chi_n \triangleq \frac{1}{1+\sum_{i\in K} x_{ni}} \quad (۱۴)$$

الگوریتم محاسبه شاخص ارتباط کاربر به ایستگاه پایه به صورت زیر است:

گام اول: ابتدا پارامترهای ε، ξ و t_1 مقداردهی اولیه می‌شوند. t_1 اندیس تکرار حلقه و T_1 بیشینه تعداد تکرار حلقه تعریف می‌شود. برای شروع الگوریتم، ماتریس X به طور دلخواه و با در نظر گرفتن محدودیت اول (۴) انتخاب می‌شود. مقدار μ و ω از ماتریس X که به طور دلخواه در نظر گرفته شده است، طبق (۹) به دست می‌آیند.

گام دوم: هر کاربر ایستگاه پایه خود را طبق (۱۱) انتخاب می‌کند.

گام سوم: مجموع تعداد کاربران متصل به هر ایستگاه پایه محاسبه می‌شود و با مقدار بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش آن مقایسه می‌گردد. اگر مقدار مجموع تعداد کاربران، کوچک‌تر یا مساوی مقدار حداکثر بود، اتصال کاربران به آن ایستگاه پایه برقرار می‌ماند. ایستگاه پایه‌ای که تعداد کاربران متصل به آن از تعداد کاربران قابل پذیرش آن کمتر باشد، قابلیت اتصال کاربر بیشتر به خود را دارد. در غیر این صورت اگر مجموع کاربران متصل به ایستگاه پایه، از حداکثر تعداد کاربران قابل پذیرش آن بیشتر بود، آن ایستگاه پایه دوباره کاربران خود را انتخاب می‌کند. انتخاب کاربران توسط ایستگاه پایه به گونه‌ای است که آن ایستگاه پایه از میان کاربرانی که آن را به عنوان ایستگاه پایه خود انتخاب کردند، به اندازه ظرفیت خود بهترین آنها را انتخاب می‌کند. ملاک بهترین کاربر برای ایستگاه پایه، حداکثربودن مقدار عبارت $\omega_{n,k} - \sum_{i\in K}\mu_{n,i}\omega_{n,i}$ برای آن ایستگاه پایه و کاربر است. بعد از انتخاب مجدد کاربران توسط ایستگاه پایه، اگر کاربری به ایستگاه پایه‌ای متصل نشده بود، از میان ایستگاه‌های پایه‌ای که ظرفیت دارند بهترین آنها را طبق (۱۱) انتخاب می‌کند. یک بار دیگر مجموع تعداد کاربران متصل به هر ایستگاه پایه محاسبه می‌شود و با مقدار حداکثر تعداد کاربران قابل پذیرش آن ایستگاه پایه مقایسه می‌گردد و مراحلی که در بالا ذکر شد تکرار می‌شود. این روند تا جایی ادامه دارد که همه کاربران به ایستگاه پایه متصل شوند در حالی که تعداد کاربران متصل به هر ایستگاه پایه از ظرفیت آن ایستگاه پایه بیشتر نباشد.

گام چهارم: اگر شرایط زیر برقرار بود الگوریتم متوقف می‌شود و در غیر این صورت به گام بعدی می‌رود

$$\mu_{n,k}(1+\sum_{i\in K} x_{n,i}) - x_{n,k} = 0 \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K$$
$$\omega_{n,k}(1+\sum_{i\in K} x_{n,i}) - r_{n,k} = 0 \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \quad (۱۵)$$

گام پنجم: یافتن کوچک‌ترین مقدار m که در رابطه زیر صدق کند

$$\sum_{n\in N}\sum_{k\in K}\left|\phi_{nk}(\mu_{nk}^{t_1} - \xi^m \chi_n \phi_{nk}(\mu_{nk}^{t_1}))\right|^2 + \sum_{n\in N}\sum_{k\in K}\left|\psi_{nk}(\omega_{nk}^{t_1} - \xi^m \chi_n \psi_{nk}(\omega_{nk}^{t_1}))\right|^2 \le (1-\varepsilon\xi^m)\sum_{n\in N}\sum_{k\in K}\{\left|\psi_{nk}(\omega_{nk})\right|^2 + \left|\phi_{nk}(\mu_{nk})\right|^2\} \quad (۱۶)$$

گام ششم: مقدار μ_{nk} و ω_{nk} برای تکرار بعدی الگوریتم با روش نیوتون طبق رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود

$$\mu_{nk}^{t_1+1} = \mu_{nk}^{t_1} - \xi^m \chi_n \phi_{nk}(\mu_{nk}^{t_1}) \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K$$
$$\omega_{nk}^{t_1+1} = \omega_{nk}^{t_1} - \xi^m \chi_n \psi_{nk}(\omega_{nk}^{t_1}) \ , \ \forall n \in N, \forall k \in K \quad (۱۷)$$

گام هفتم: مقدار $\mu_{nk}^{t_1+1}$ طبق رابطه زیر نرمالیزه می‌شود

$$\mu_{nk}^{t_1+1} = \frac{\mu_{nk}^{t_1+1}}{\sum_{n\in N}\sum_{k\in K}\mu_{nk}^{t_1+1}} \quad (۱۸)$$

گام هشتم: $t_1 = t_1 + 1$.

گام نهم: بررسی شرط توقف حلقه تکرار بیرونی که اگر الگوریتم لایه بیرونی همگرا شد یا $t_1 = T_1$ بود، تکرار حلقه خارجی متوقف می‌شود و در غیر این صورت به گام دوم برمی‌گردد.

بدین ترتیب شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه با ثابت در نظر گرفتن توان ارسالی کاربران به دست می‌آید و سپس به محاسبه توان ارسالی کاربران تحت شاخص ارتباط مشخص پرداخته می‌شود.

٤- تحلیل توان ارسالی کاربران

برای طراحی لایه داخلی الگوریتم تکراری دولایه شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه ثابت در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه بین نرخ مؤثر و نرخ قابل دستیابی مسأله بهینه‌سازی به صورت زیر بازنویسی می‌گردد [۱۰]

$$\max_{P} \sum_{n\in N}\sum_{k\in K}\eta_{nk}\log(1+SINR_{nk}(p))$$
s.t. (۱۹)
$$0 \le p_k \le p_k^{\max}$$

جدول ۱: مقادیر عددی به کار رفته در شبیه‌سازی.

پارامتر	مقدار
p_m	۴۳ dBm
$p_{femtocell}$	۱۷ dBm
$p_{picocell}$	۲۱ dBm
$p_{T\max}$	۲۳ dBm
P_C	۱۳ dBm
p_u	۱۰ dBm
σ_n^2	−۱۷۴ dBm/Hz
$L_.$	−۱۲۸٫۱ dB برای ایستگاه‌های پایه لایه ماکروسل −۱۴۰٫۷ dB برای ایستگاه‌های پایه لایه‌های پیکوسل و فمتوسل
α	۳٫۶۷
λ_m	$۲۵\times۱۰^{-۷}\ \mathrm{m}^{-۲}$
λ_p	$۶۳\times۱۰^{-۷}\ \mathrm{m}^{-۲}$
λ_f	$۱۰^{-۵}\ \mathrm{m}^{-۲}$
λ_u	$۱۹\times۱۰^{-۵}\ \mathrm{m}^{-۲}$
R	۵۰۰ m
$y_M^{\max}$	۴۰
$y_P^{\max}$	۲۵
$y_F^{\max}$	۱۰

که $\eta_{nk} = x_{nk} \big/ \sum_{i\in K} x_{ni}$ است. مشابه [۱۰] برای پیاده‌سازی الگوریتم و جلوگیری از صفرشدن مخرج در عبارت بالا، فرض می‌شود هنگامی که $\sum_{i\in K} x_{ni} = ۰$ است، $\eta_{nk} = ۰$ باشد. تابع هدف مسأله بهینه‌سازی بالا غیر محدب می‌باشد و نیاز است تا تغییراتی در مسأله اعمال شود تا به یک مسأله بهینه‌سازی محدب تبدیل شود. مشابه [۱۱] تا [۱۳] فرض می‌شود که $\log(۱+SINR_{nk}(p)) \approx \log(SINR_{nk}(p))$ و $\bar{p}_k = \log_e^{p_k}$. به آسانی قابل فهم است که با در نظر گرفتن فرض اول، کران پایین برای مسأله اصلی به دست می‌آید. با اعمال این تغییرات، مسأله بهینه‌سازی به شکل محدب تبدیل شده و به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود

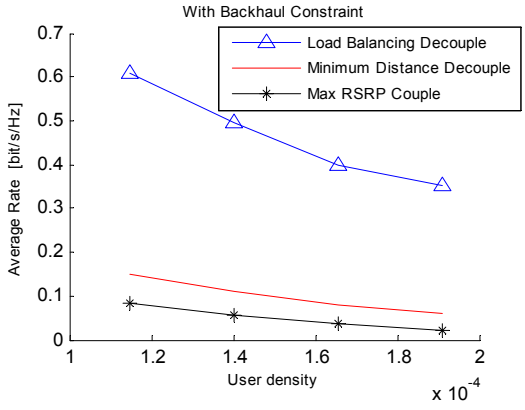
$$\max_{\bar{P}} I(\bar{P}) = \max \sum_{n\in N}\sum_{k\in K} \eta_{nk} \log \overline{SINR}_{nk}(\bar{P})$$
$$\text{s.t.} \qquad (۲۰)$$
$$\bar{p}_k \le \log^{p_k^{\max}} \quad , \ \forall k \in K$$
$$\bar{P} = \{\bar{p}_k, \forall k \in K\}$$

که $\overline{SINR}_{nk}(\bar{p}) = e^{\bar{p}_n} g_{nk} \big/ (\sum_{j\in K, \neq k} e^{\bar{p}_j} g_{nj} + \sigma_n^2)$. توان ارسالی بهینه از $\partial I / \partial \bar{p}_m = ۰, \forall m \in K$ با توجه به محدب‌شدن مسأله بهینه‌سازی، محاسبه می‌شود [۱۰]. طبق این رابطه توان ارسالی بهینه برابر است با

$$e^{\bar{p}_m} = \frac{\sum_{n\in N} \eta_{nm}}{\sum_{n\in N}\sum_{k\in K, k\neq m} \dfrac{\eta_{nk} g_{nm}}{\sum_{j\in K, j\neq k} p_j g_{nj} + \sigma_n^2}} \qquad (۲۱)$$

با توجه به تغییر متغیری که اعمال شده بود $p_m = e^{\bar{p}_m}$ است و بنابراین توان ارسالی کاربران از رابطه تکراری زیر محاسبه می‌گردد

$$p_m^{t+۱} = J_m(P^t) \frac{\sum_{n\in N} \eta_{nm}}{\sum_{n\in N}\sum_{k\in K, k\neq m} \dfrac{\eta_{nk} g_{nm}}{\sum_{j\in K, j\neq k} p_j g_{nj} + \sigma_n^2}} \qquad (۲۲)$$
$$, \ \forall m \in K$$



شکل ۲: میانگین مجموع نرخ مؤثر کاربران بر حسب چگالی کاربران.

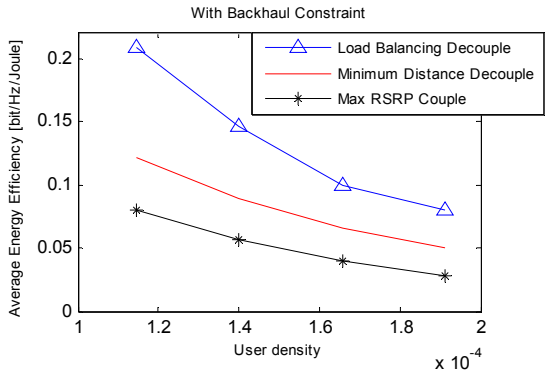
برای اعمال محدودیتی که برای توان ارسالی کاربران در این مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است، توانی که از رابطه فوق به دست می‌آید باید در بازه $[۰, p_k^{\max}]$ تصویر شود [۱۴]. بدین ترتیب توان ارسالی بهینه کاربران با ثابت در نظر گرفتن شاخص ارتباط آنها به دست می‌آید. در جدول زیر الگوریتم محاسبه توان ارسالی کاربران خلاصه شده است:

به روز رسانی توان ارسالی کاربران با استفاده از (۲۲)
$t_۲ = t_۲ + ۱$
بررسی شرط توقف حلقه تکرار داخلی که اگر الگوریتم لایه داخلی همگرا شد یا $t_۲ = T_۲$ بود، از حلقه تکرار داخلی خارج می‌شود و در غیر این صورت تکرار حلقه ادامه دارد.

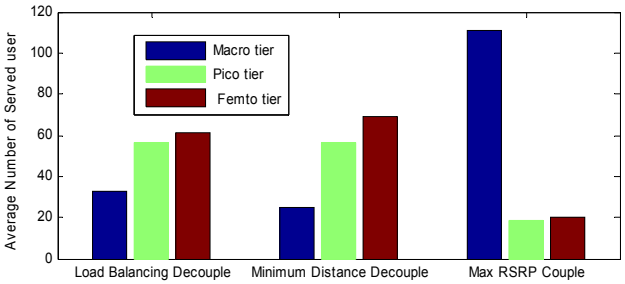
$t_۲$ تعداد تکرار حلقه داخلی و $T_۲$ بیشینه تعداد تکرار حلقه می‌باشد.

۵- نتایج عددی

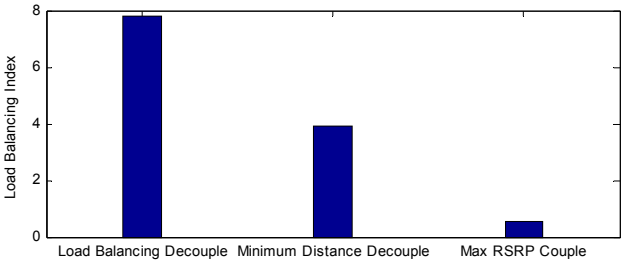
در این قسمت میانگین مجموع نرخ مؤثر کاربران، متوسط کارایی انرژی و بار لایه‌های مختلف شبکه در ارتباط فراسو، تحت سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت با هم با معیار بیشینه توان دریافتی توسط کاربر در ارتباط فروسو و سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا با دو معیار دسترسی مینیمم اتلاف مسیر و برقراری تعادل بار در ارتباط فراسو، محاسبه و نتایج با هم مقایسه می‌گردد. مقادیر عددی که در شبیه‌سازی از آنها استفاده شده در جدول ۱ آمده است. شکل ۲ میانگین مجموع نرخ مؤثر کاربران در ارتباط فراسو را بر حسب افزایش چگالی کاربران در شبکه ناهمگن با محدودیت بک‌هال، تحت معیارهای مختلف دسترسی به ایستگاه پایه نشان می‌دهد. کارایی انرژی ارتباط فراسو طبق $EE = \sum_{i=۱}^{K} R_i \big/ (\sum_{i=۱}^{K} p_i + (P_C \times K))$ محاسبه می‌گردد [۱۰]. در این رابطه R_i نرخ مؤثر کاربر i، p_i توان ارسالی کاربر i، P_C توان مصرفی مدار برای هر کاربر و K تعداد کاربران می‌باشد. شکل ۳ کارایی انرژی ارتباط فراسو را تحت ۳ معیار دسترسی بیشینه توان دریافتی ارتباط فروسو، مینیمم اتلاف مسیر و برقراری تعادل بار در ارتباط فراسو در شبکه ناهمگن با محدودیت بک‌هال با هم مقایسه می‌کند. از آنجا که استراتژی اختصاص برقراری تعادل بار در ارتباط فراسو مجموع نرخ مؤثر کاربران را در این ارتباط بیشینه می‌کند، این استراتژی بالاترین میانگین مجموع نرخ مؤثر و کارایی انرژی را نسبت به سایر استراتژی‌ها دارد. با مقایسه نمودارهای نشان داده شده می‌توان به این حقیقت رسید که سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا به طور قابل توجهی موجب بهبود نرخ مؤثر کاربران و کارایی انرژی در ارتباط فراسو می‌گردد.



شکل ۳: میانگین کارایی انرژی ارتباط فراسو بر حسب چگالی کاربران.



شکل ۴: توزیع بار بین لایه‌های مختلف شبکه در ارتباط فراسو تحت استراتژی اختصاص متفاوت.

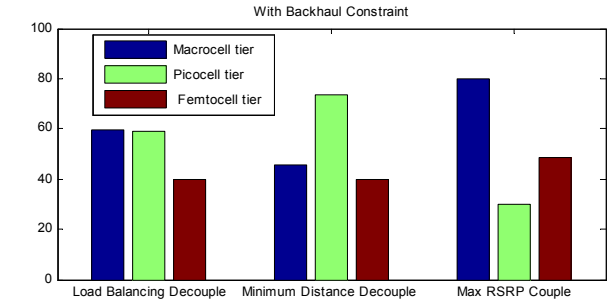


شکل ۵: شاخص تعادل بار در ارتباط فراسو تحت استراتژی اختصاص متفاوت.

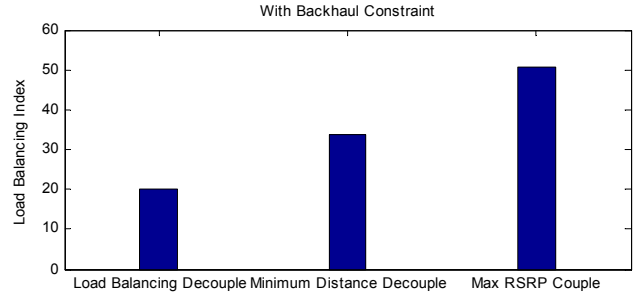
در شبکه ناهمگن بدون محدودیت بک‌هال، متوسط بار یک ایستگاه پایه، میانگین تعداد کاربرانی که به آن ایستگاه پایه متصل می‌شوند، تعریف می‌شود. از آنجا که توان ارسالی ماکروسل در ارتباط فروسو از توان ارسالی پیکوسل و فمتوسل بیشتر است، در سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت با هم که معیار دسترسی کاربران به ایستگاه پایه بیشینه توان دریافتی ارتباط فروسو است، اغلب کاربران در ارتباط فراسو به ایستگاه‌های پایه ماکروسل متصل می‌شوند. همان طور که شکل ۴ نشان می‌دهد این استراتژی موجب می‌شود تا عدم تعادل بار بین لایه‌های مختلف شبکه در ارتباط فراسو به وجود آید که این عدم تعادل بار بین لایه‌های شبکه منجر می‌شود تا از منابع ایستگاه‌های پایه سلول‌های کوچک کم‌توان به طور کامل استفاده نشود و در مقابل گذردهی کاربرانی که به ماکروسل متصل می‌شوند، کاهش یابد. برای محاسبه سطح تعادل بار در ارتباط فراسو در شبکه ناهمگن بدون محدودیت بک‌هال، طبق [۱۰] معیار زیر به عنوان شاخص تعادل بار تعریف می‌شود

$$\gamma = \frac{(\sum_{n\in N} y_n)^2}{N \times \sum_{n\in N} y_n^2} \qquad (۲۳)$$

واضح است که هرچه مقدار γ بزرگ‌تر باشد، توزیع بار در شبکه متعادل‌تر خواهد بود. شکل ۵ شاخص تعادل بار در ارتباط فراسو را تحت



شکل ۶: درصد تعداد کاربران متصل به هر لایه نسبت به ظرفیت آن لایه تحت استراتژی اختصاص متفاوت.



شکل ۷: شاخص تعادل بار ارتباط فراسو در شبکه بک‌هال تحت استراتژی‌های اختصاص متفاوت.

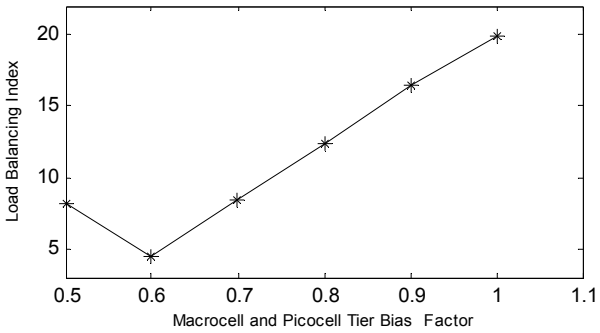
استراتژی‌های اختصاص متفاوت نشان می‌دهد و بیانگر آن است که استراتژی بیشینه توان دریافتی در ارتباط فروسو کمترین تعادل بار را در شبکه دارد. در شبکه‌ای که محدودیت بک‌هال دارد، تعادل بار بین لایه‌های مختلف شبکه به معنای متعادل‌کردن تعداد کاربران متصل به ایستگاه‌های پایه لایه‌های مختلف نسبت به ظرفیت همان لایه است. در استراتژی اختصاص بیشینه توان دریافتی ارتباط فروسو اغلب کاربران به ایستگاه پایه ماکروسل متصل می‌شوند که این موجب عدم تعادل بار در شبکه خواهد شد.

شکل ۶ درصد تعداد کاربران متصل به هر لایه نسبت به ظرفیت همان لایه، تحت استراتژی‌های اختصاص متفاوت را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که استراتژی برقراری تعادل بار در ارتباط فراسو، بیشینه تعادل بار را بین لایه‌های مختلف شبکه ایجاد می‌کند و موجب می‌شود تا تعداد کاربران متصل به لایه‌های ماکروسل، پیکوسل و فمتوسل نسبت به ظرفیتشان تقریباً یکسان شود. برای محاسبه سطح تعادل بار در ارتباط فراسو در شبکه ناهمگن که دارای محدودیت بک‌هال است، (۲۴) به عنوان شاخص تعادل بار تعریف می‌شود

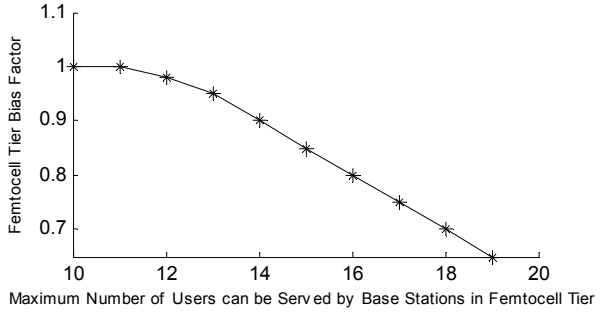
$$\gamma_b = \max(C_m, C_p, C_f) - \min(C_m, C_p, C_f) \qquad (۲۴)$$

در این رابطه C_f، C_p و C_m به ترتیب درصد تعداد کاربران متصل به ایستگاه‌های پایه لایه فمتوسل در ارتباط فراسو نسبت به ظرفیت آن لایه، درصد تعداد کاربران متصل به ایستگاه‌های پایه لایه پیکوسل در ارتباط فراسو نسبت به ظرفیت لایه پیکوسل و درصد تعداد کاربران متصل به ایستگاه‌های پایه لایه ماکروسل در ارتباط فراسو نسبت به ظرفیت آن لایه است.

شکل ۷ شاخص تعادل بار را در ارتباط فراسو در شبکه ناهمگن که دارای محدودیت بک‌هال است، تحت سه استراتژی اختصاص متفاوت نشان می‌دهد و بیانگر آن است که استراتژی بیشینه توان دریافتی در ارتباط فروسو، کمترین تعادل بار را در شبکه بک‌هال نیز دارد. برای بهبود تعادل بار در شبکه‌های ناهمگن که دارای محدودیت بک‌هال هستند،



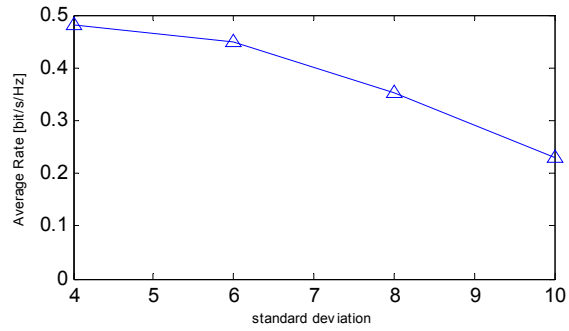
شکل ۸: شاخص تعادل بار بر حسب ضریب بایاس لایه ماکروسل و پیکوسل.



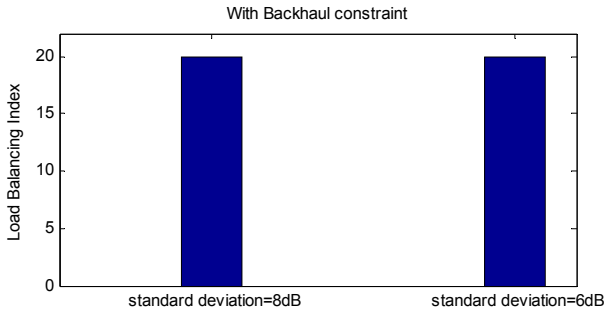
شکل ۹: ضریب بایاس لایه فمتوسل بر حسب بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش ایستگاه‌های پایه این لایه.

می‌توان در الگوریتم ذکرشده برای شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه، ضریب بایاسی برای بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش هر لایه در نظر گرفت که این ضریب موجب تخلیه بار از یک لایه به لایه دیگر و برقراری بیشتر تعادل بار بین لایه‌ها در شبکه می‌گردد. مقدار این ضریب به چگالی ایستگاه‌های پایه هر لایه و بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش هر لایه وابسته است. ضریب بایاس برای لایه‌های ماکروسل، پیکوسل و فمتوسل به ترتیب با α_f، α_p و α_m مشخص می‌شود که مقادیر آنها از شبیه‌سازی به دست می‌آید. در سناریوی مورد بحث هنگامی که چگالی کاربران $۱/۹\times۱۰^{-۴}\,m^{-۲}$ است، شاخص تعادل بار ۱۹/۹۳ می‌شود.

همان طور که از شکل ۶ مشخص است، برای بهبود تعادل بار بین لایه‌های مختلف شبکه باید بار از ایستگاه‌های پایه لایه‌های ماکروسل و پیکوسل به سمت ایستگاه‌های پایه لایه فمتوسل تخلیه شود. به همین دلیل ضریب بایاس برای بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش ایستگاه‌های پایه لایه فمتوسل یک در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که درصد تعداد کاربران متصل به لایه پیکوسل نسبت به ظرفیت لایه پیکوسل و درصد تعداد کاربران متصل به لایه ماکروسل نسبت به ظرفیت لایه ماکروسل تقریباً یکسان است، در سناریوی مورد بحث $\alpha_f = ۱$ و $\alpha_m = \alpha_p = \alpha$ در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه مقدار بهینه α شاخص تعادل بار بر حسب α رسم می‌شود. از شکل ۸ واضح است که در $\alpha = ۰/۶$ شاخص تعادل بار کمترین مقدار را دارد و بنابراین مقدار بهینه α، ۰/۶ می‌باشد. همان طور که بیان شد، ضریب بایاس بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش هر لایه به چگالی ایستگاه‌های پایه و بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش لایه‌های مختلف بستگی دارد. به طور مثال در سناریوی مورد بحث با افزایش مقدار بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش ایستگاه‌های پایه لایه فمتوسل، مقدار ضریب بایاس لایه‌های ماکروسل، پیکوسل و فمتوسل تغییر می‌کند. هنگامی که مقدار آن ۱۰ باشد $\alpha_f = ۱$ و $\alpha_m = \alpha_p = ۰/۶$ به دست می‌آید. با افزایش آن، اغلب بار شبکه به روی ایستگاه‌های پایه لایه ماکروسل می‌باشد و برای بهبود تعادل بار بین لایه‌ها، $\alpha_f = ۱$ و $\alpha_m = ۰/۹۳\alpha_p$ محاسبه می‌شود. هنگامی که مقدار



شکل ۱۰: میانگین مجموع نرخ مؤثر کاربران بر حسب انحراف معیار پدیده سایه‌افکنی.



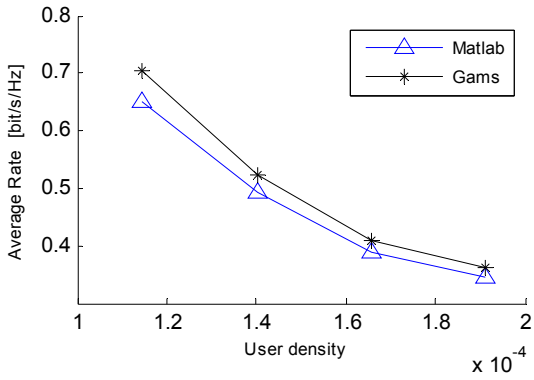
شکل ۱۱: شاخص تعادل بار به ازای مقادیر مختلف انحراف معیار پدیده سایه‌افکنی.

آن ۱۲ شود، $\alpha_f = ۰/۹۸$ و $\alpha_m, \alpha_p = ۱$ به دست می‌آید. با افزایش مقدار بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش ایستگاه‌های پایه لایه فمتوسل، بار از ایستگاه‌های پایه لایه‌های ماکروسل و پیکوسل به سمت ایستگاه‌های پایه لایه فمتوسل تخلیه می‌شود و مقدار ضریب بایاس برای لایه‌های ماکروسل و پیکوسل یک می‌باشد در حالی که مقدار ضریب بایاس لایه فمتوسل کاهش می‌یابد.

در شکل ۹ تغییرات ضریب بایاس لایه فمتوسل بر حسب بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش ایستگاه‌های پایه این لایه نشان داده شده است. چنانچه انتظار می‌رود، هنگامی که بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش ایستگاه‌های پایه لایه فمتوسل افزایش می‌یابد، مقدار ضریب بایاس این لایه کم می‌شود.

در شکل ۱۰ منحنی میانگین مجموع نرخ مؤثر کاربران بر حسب انحراف معیار سایه‌افکنی رسم گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر مقدار انحراف معیار سایه‌افکنی روند آنالیز را عوض نمی‌کند، فقط کیفیت و سطح نرخ و سطح کارایی انرژی تغییر می‌کند. در واقع با تغییر مقدار سایه‌افکنی و واریانس نویز، اختصاص کاربران به ایستگاه‌های پایه تغییر نمی‌کند و میزان بار ایستگاه‌های پایه نیز تغییر نخواهد کرد، زیرا این مقادیر برای همه یکسان هستند. شکل ۱۱، شاخص تعادل بار را در دو حالت سایه‌افکنی با انحراف معیار ۸ دسی‌بل و با انحراف معیار ۶ دسی‌بل با هم مقایسه می‌کند و چنانچه انتظار می‌رود، با تغییر مقدار انحراف معیار، مقدار شاخص تعادل بار تقریباً ثابت می‌ماند.

در ادامه مقاله به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، مسأله بهینه‌سازی بیشینه‌کردن مجموع نرخ مؤثر کاربران در شبکه بک‌هال با استفاده از نرم‌افزار گمز نیز حل شده [۱۵] و با الگوریتم تکراری که با استفاده از نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شده است، مقایسه می‌گردد. نرم‌افزار گمز جواب دقیق مسأله بهینه‌سازی را محاسبه می‌کند. همان طور که در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ مشاهده می‌شود، نتایجی که از الگوریتم تکراری دولایه به دست آمده به نتایج محاسبه‌شده از نرم‌افزار گمز نزدیک می‌باشد و این نشان‌دهنده دقت مناسب الگوریتم پیشنهادی است.



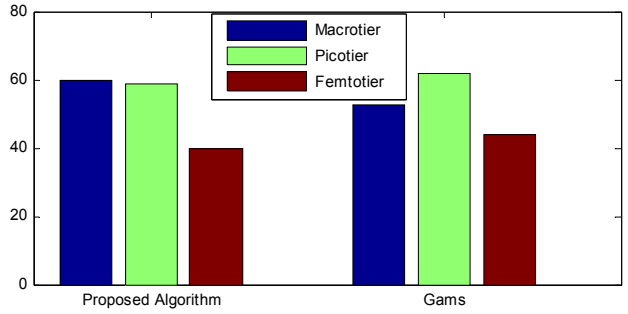
شکل ۱۲: میانگین مجموع نرخ مؤثر کاربران بر حسب افزایش چگالی کاربران.

۶- محاسبه پیچیدگی

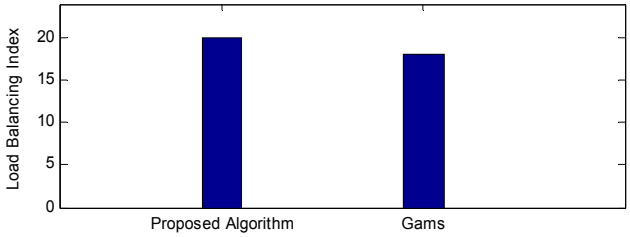
پیچیدگی محاسباتی استراتژی‌های ماکسیمم توان دریافتی ارتباط فروسو و حداقل فاصله بدون در نظر گرفتن محدودیت بک‌هال، $O(NK)$ می‌باشد، در حالی که پیچیدگی محاسباتی استراتژی برقراری تعادل بار در ارتباط فراسو، بدون در نظر گرفتن محدودیت بک‌هال، ماکسیمم $O(T_1T_2(m+1)NK)$ و $O(T_1T_2K^2N)$ است که در این رابطه N تعداد ایستگاه‌های پایه و K تعداد کاربران می‌باشد. همان طور که از روابط مشخص است پیچیدگی محاسباتی در استراتژی برقراری تعادل بار در ارتباط فراسو خیلی بیشتر از دو استراتژی دیگر می‌باشد. با در نظر گرفتن محدودیت بک‌هال برای این سه استراتژی، پیچیدگی استراتژی‌های فوق افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن محدودیت بک‌هال یک گام به الگوریتم‌ها اضافه می‌شود که پیچیدگی $O(K^2(2N+(y_M^{\max}+y_P^{\max}+y_F^{\max})))$ را دارد. این گام، همان گام سوم در الگوریتم برقراری تعادل بار است. گام‌های یک، دو و چهار در الگوریتم محاسبه اختصاص کاربران به ایستگاه‌های پایه در استراتژی برقراری تعادل بار، پیچیدگی $O(NK)$ را دارند. گام پنجم که کوچک‌ترین مقدار m را پیدا می‌کند، پیچیدگی $O((m+1)NK)$ را دارد. گام‌های دیگر الگوریتم هم پیچیدگی $O(NK)$ را دارد. بنابراین پیچیدگی محاسباتی الگوریتم محاسبه شاخص ارتباط کاربر به ایستگاه پایه $O(T_1K^2(2N+(y_M^{\max}+y_P^{\max}+y_F^{\max})))$ است. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم محاسبه توان ارسالی کاربران $O(T_2K^2N)$ هست. پیچیدگی این استراتژی با در نظر گرفتن محدودیت بک‌هال ماکسیمم $O(T_1T_2K^2(2N+(y_M^{\max}+y_P^{\max}+y_F^{\max})))$ و $O(T_1T_2K^2N)$ می‌باشد که در این رابطه T_1 بیشینه تعداد تکرار حلقه‌ای است که شاخص ارتباط کاربر به ایستگاه پایه را محاسبه می‌کند، T_2 بیشینه تعداد تکرار حلقه‌ای است که توان ارسالی کاربران را محاسبه می‌کند و T_3 بیشینه تعداد تکرار بیرونی‌ترین حلقه خارجی می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بهره‌برداری از منابع سیستم به صورت کارامد و افزایش گذردهی کاربران، معیار دسترسی کاربران به ایستگاه‌های پایه در ارتباط فراسو، در سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا، برقراری تعادل بار در این ارتباط در نظر گرفته می‌شود. به این منظور شاخص ارتباط کاربران به ایستگاه‌های پایه و توان ارسالی آنها از حل مسأله بیشینه‌سازی مجموع نرخ مؤثر کاربران به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با به کارگیری این استراتژی اختصاص در ارتباط فراسو در سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا،



شکل ۱۳: درصد تعداد کاربران متصل به هر لایه نسبت به ظرفیت آن لایه.



شکل ۱۴: شاخص تعادل بار ارتباط فراسو در شبکه بک‌هال.

تعادل بار قابل توجهی بین لایه‌های مختلف شبکه در ارتباط فراسو به وجود می‌آید و عدالت بین کاربران در این ارتباط برقرار می‌شود. برای بهبود تعادل بار بین لایه‌های مختلف شبکه در ارتباط فراسو، در الگوریتم تکراری دولایه ضریب بایاس برای بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش هر لایه در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن به چگالی ایستگاه‌های پایه و بیشینه تعداد کاربران قابل پذیرش لایه‌های مختلف وابسته است. نتایج شبیه‌سازی نیز بیانگر این می‌باشد که به کارگیری سیاست دسترسی ارتباط فراسو و فروسو به صورت جدا، میانگین کارایی انرژی ارتباط فراسو و متوسط مجموع نرخ مؤثر کاربران در این ارتباط را به طور قابل توجهی بهبود می‌دهد که میزان بهبود آن در استراتژی برقراری تعادل بار در ارتباط فراسو نسبت به سایر معیارها بیشتر است.

مراجع

[1] A. Ghosh, N. Mangalvedhe, and R. Ratasuk, "Heterogeneous cellular networks: from theory to practice," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 6, pp. 54-64, Jun. 2012.

[2] Z. Sattar, J. V. C. Evangelista, G. Kaddoum, and N. Batani, "Spectral efficiency analysis of the decoupled access for downlink and uplink in two-tier network," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 5, pp. 4871-4883, May 2019.

[3] S. Singh, X. Zhang, and J. G. Andrews, "Joint rate and SINR coverage analysis for decoupled uplink-downlink biased cell associations in HetNets," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 10, pp. 5360-5373, May 2015.

[4] F. Boccardi, J. Andrews, H. Elshaer, M. Dohler, S. Parkvall, and P. Popovski, "Why to decouple the uplink and downlink in cellular networks and how to do it?" *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 54, no. 3, pp. 110-117, Mar. 2016.

[5] L. Zhang, W. Nie, G. Feng, F. Zheng, and S. Qin, "Uplink performance improvement by decoupling uplink/downlink access in HetNets," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 8, pp. 6862-6876, Aug. 2017.

[6] R. Li, K. Luo, T. Jiang, and S. Jin, "Uplink spectral efficiency analysis of decoupled access in multiuser MIMO HetNets," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 5, pp. 4289-4302, Jan. 2018.

[7] R. Li, X. Liu, K. Luo, T. Jiang, and S. Jin, "Decoupled access in HetNets with backhaul constrained small base stations," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 27028-27038, Jun. 2018.

[8] G. Ghatak, A. De Domenico, and M. Coupechoux, "Coverage analysis and load balancing in HetNets with millimeter wave multi-RAT small cells," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 5, pp. 3154-3169, May 2018.

[9] D. Liu, Y. Chen, T. Zhang, K. Chai, J. Loo, and A. Vinel, "Stackelberg game based cooperative user relay assisted load balancing in cellular networks," *IEEE Commun. Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 424-427, Feb. 2013.

[10] T. Zhou, Z. Liu, J. Zhao, C. Li, and L. Yang, "Joint user association and power control for load balancing in downlink heterogeneous cellular networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 3, pp. 2582-2593, Mar. 2018.

[11] S. Low and D. Lapsley, "Optimization flow control-I: basic algorithm and convergence," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 7, no. 6, pp. 861-874, Dec. 1999.

[12] M. Chiang, C. W. Tan, D. P. Palomar, D. O'neill, and D. Julian, "Power control by geometric programming," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 7, pp. 2640-2651, Jul. 2007.

[13] M. Chiang, "Balancing transport and physical layers in wireless multihop networks: jointly optimal congestion control and power control," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 1, pp. 104-116, Jan. 2005.

[14] J. Nocedal and S. Wright, *Numerical Optimization*, New York, NY, USA: Springer, 1999.

[۱۵] وبسایت تخصصی نرم‌افزار گمز، http://gamsbook.ir.

عاطفه جعفریان مدارک خود در مقطع کارشناسی در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات و مقطع کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم را به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷ از دانشگاه یزد اخذ کرده است. ایشان هم‌اکنون درآموزشکده فنی خواهران میبد و دانشگاه میبد مشغول به تدریس است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده‌های نو برای بهبود عملکرد شبکه‌های ناهمگن مخابراتی می‌باشد.

زلفا زینل‌پور یزدی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات (مخابرات سیستم) از دانشگاه صنعتی شریف به‌ترتیب در سالهای ۱۳۸۱، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۹ به پایان رسانده است. نام‌برده در سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۵ به عنوان محقق در مرکز تحقیقات مخابرات ftw. شهر وین اتریش مشغول بوده است. دکتر زینل‌پور در سال ۱۳۸۹ به دانشگاه یزد پیوست و اینک دانشیار دانشکده مهندسی برق این دانشگاه می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان عمدتاً در مخابرات بی‌سیم با تمرکز بر شبکه های بی‌سیم نسل جدید و توجه ویژه بر روی آنالیز شبکه‌های ناهمگن با رویکرد هندسه تصادفی، شبکه‌های متحرک و شبکه‌های مجهز به سطوح هوشمند با قابلیت پیکربندی مجدد می‌باشد.

علی‌اکبر تدین تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در سال ۱۳۷۷ در رشته الکترونیک و کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مخابرات (گرایش سیستم) به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۵ از دانشگاه صنعتی شریف به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد است. نام‌برده در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۴ در آزمایشگاه پردازش سیگنال پیشرفته (MSPL) دانشگاه کوییز شهر کینگستون کانادا به‌عنوان محقق یک دوره فرصت مطالعاتی را گذرانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش آماری سیگنال شامل آشکارسازی و تخمین و سیستم‌های مخابراتی بیسیم نسل‌های جدید (5G و بالاتر).