



دانشگاه صنعتی سهند

نشریه سازه‌های غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۶ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۳۹۸

صفحات ۲۴ الی ۵۳

ISSN: 2322-3146

http://jnsee.sut.ac.ir

ارزیابی عملکرد NOMA در حالت SIC ناقص و افزایش ظرفیت ارگودیک با روش جفت کردن کاربران در گروه‌های ۳ کاربری

بهزاد مظفری تازه‌کند^۱ و فرید تابع میان‌دوآب^۲

^۱نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی برق-مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران mozaffary@tabrizu.ac.ir

^۲کارشناس ارشد مهندسی برق-مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران fariid95@ms.tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۷)

چکیده

واژه‌های کلیدی

دسترسی چندگانه غیرمتعامد،

جفت کردن کاربران،

حذف کامل تداخل متوالی،

حذف ناقص تداخل متوالی،

ظرفیت کلی ارگودیک.

این مقاله، مشکل مربوط به روش جفت شدن کاربران با شرایط کانال مشابه، در NOMA با سه کاربر در هر جفت را ارزیابی می‌کند. اختلاف کوچک در بهره کانال کاربران جفت شده، باعث ایجاد تداخل در فرآیند حذف تداخل متوالی (SIC) می‌شود. بروز SIC ناقص باعث کاهش ظرفیت سیستم می‌شود. همچنین کاربران میانی در این روش با تشکیل جفت ندادن، از مزیت‌های فراهم شده توسط NOMA بی‌بهره می‌مانند، از طرفی با تشکیل جفت، به دلیل نزدیکی شرایط کانال کاربران به هم، منجر به بروز SIC ناقص می‌شوند. در این مقاله، برای حل این مشکل، روشی برای جفت کردن کاربران پیشنهاد می‌شود که در آن، همه کاربران از جمله کاربران میانی، قادر خواهند بود از مزیت‌های NOMA استفاده نمایند و مشکل بروز SIC ناقص، حداقل شود. برای ارزیابی عملکرد NOMA، ظرفیت کلی ارگودیک را در دو حالت SIC کامل و ناقص، بررسی می‌کنیم. در این مقاله، مفهوم SIC ناقص برای اولین بار به‌ازای جفت‌هایی که شامل سه کاربر هستند به‌صورت تحلیلی ارزیابی می‌شود. محاسبات انجام شده به همراه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، نشان می‌دهند که در این حالت، ظرفیت سیستم دچار افت شدید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی، علاوه بر حداقل کردن پدیده SIC ناقص، ظرفیت کلی ارگودیک بالاتری، نسبت به سایر روش‌ها فراهم می‌کند.



Sahand University
of Technology

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.6, No.1

Spring and Summer 2019

ISSN: 2322 – 3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

Performance Evaluation of the NOMA in Imperfect SIC Mode and Ergodic Capacity Maximization with User Pairing Scenario in Three Users Groups

Behzad Mozaffari Tazehkand¹ and Farid Tabee Miandoab²

¹**Corresponding Author**, Associate Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, mozaffary@tabrizu.ac.ir

²MSc, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, fariiid95@ms.tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

This paper evaluates the problem of user pairing scenario with similar channel conditions in NOMA with three users per pair. The small difference in the channel gain of the paired users leads to interference in the process of successive interference cancelation (SIC). The incidence of imperfect SIC reduces system capacity. Also, mid users in this scenario will be deprived of the advantages provided by the NOMA without pairing, on the other hand, by pairing, due to the closeness of the users' channel conditions to each other, leads to the incidence of imperfect SIC. In this paper, in order to solve this problem, we propose a scenario for users to pair, in which all users, including mid users, will be able to use the benefits of NOMA and the problem of incidence of imperfect SIC is minimized. To evaluate the performance of the NOMA, we examine the sum ergodic capacity in both perfect and imperfect SIC modes. In this paper, the concept of an imperfect SIC has calculated analytically for the first time for pairs containing three users. The calculations performed along with the simulations show that in this case, the system's capacity falls sharply. The simulation results also show that the proposed scenario, in addition to minimizing the imperfect SIC event, provides a higher sum ergodic capacity than other scenarios.

NOMA (non-orthogonal
multiple access),

User pairing,

Perfect SIC (successive
interference cancelation),

Imperfect SIC,

Sum ergodic capacity.

۱- مقدمه

دسترسی چندگانه غیرمتعامد^۱ (NOMA)، به عنوان یکی از فناوری‌های دسترسی رادیویی، به دلیل بهبود بهره طیفی، در شبکه‌های موبایل نسل پنجم مورد توجه قرار گرفته است. NOMA در حالت فروسو (downlink) با استفاده از حذف تداخل متوالی^۲ (SIC)، ظرفیت کاربر حاشیه سلول (کاربر دور) را بهبود می‌بخشد. NOMA در مقایسه با OFDMA^۳ نرخ داده بزرگ‌تری فراهم می‌کند [۴-۱].

در مراجع [۲، ۳]، مفهوم و عملکرد NOMA ارزیابی شده است. همچنین مزیت‌های NOMA نسبت به OFDMA و مراحل استانداردسازی NOMA، در شبکه‌های نسل پنجم بیان شده است. در مرجع [۵]، طرح‌های دسترسی چندگانه غیرمتعامد و فن‌های مدولاسیون با شکل موج غیرمتعامد، برای ارتباطات موبایل نسل پنجم مقایسه شده‌اند. در مرجع [۶]، عملکرد NOMA با SIC، در آشکارسازی سیگنال کاربران در حالت فروسو و نیز عملکرد NOMA با SIC، به همراه همسان‌ساز صفر واداری^۴ (ZF) و تخمین گر کمترین میانگین مربع خطا^۵ (MMSE)، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین نشان داده شده است که NOMA با استفاده از فن پیش‌کدگذاری، نرخ خطای بیت کمتری، نسبت به حالت بدون پیش‌کدگذاری دارد. در مرجع [۷]، عملکرد NOMA در سطح سیستمی و در حالت فروسو، در دو محیط سلولی بزرگ و کوچک بررسی شده است. همچنین نشان داده شده است که NOMA، در مقایسه با OMA^۶ بهره عملکرد بهتری دارد. در مرجع [۸]، اثر جفت کردن کاربران^۷ روی عملکرد دو سیستم NOMA: (۱) NOMA با ضرایب اختصاصی توان ثابت (۲) رادیو شناختی الهام گرفته از NOMA^۸، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که NOMA با ضرایب اختصاصی توان ثابت، در مقایسه با OMA، ظرفیت کلی بهتری فراهم می‌کند. در NOMA با ضرایب اختصاصی توان ثابت، ضرایب اختصاصی توان به کاربران ثابت بوده و مطابق با عکس شرایط بهره کانال متناظر هست، اما در رادیو شناختی الهام گرفته از NOMA، به کیفیت سرویس کاربر حاشیه سلول بستگی دارد.

در مرجع [۹]، عملکرد مربوط به طرح جفت کردن کاربران در NOMA متداول و اثر کاربران جفت نشده روی عملکرد سیستم ارزیابی شده است. طرحی برای استفاده بهینه از طیف کاربران جفت نشده در NOMA پیشنهاد شده است، به طوری که دو کاربر با شرایط کانال مشابه، روی باند فرکانسی (پهنای باند) غیرهم‌پوشان با یک کاربر دور جفت می‌شوند. عملکرد طرح پیشنهادی در ترم ظرفیت کلی ارگودیک^۹ روی کانال محوشدگی تخت راییلی^{۱۰} بررسی شده و با طرح‌های OMA و NOMA متداول مقایسه شده است. مرجع [۹]، مفهوم جفت کردن کاربران در NOMA را نشان می‌دهد که در آن، کاربرانی که نمی‌توانند در NOMA متداول جفت شوند، برای دستیابی به داده خود برخلاف طرح پیشنهادی در [۸] که در آن کاربران از OMA استفاده می‌کردند، از طرح جدید NOMA با سه کاربر در هر جفت، استفاده خواهند کرد. این طرح دو مشکل زیر را حل می‌کند:

¹ Non-Orthogonal Multiple Access

² Successive Interference Cancellation

³ Orthogonal Frequency Division Multiple Access

⁴ Zero Forcing

⁵ Minimum Mean Squared Error

⁶ Orthogonal Multiple Access

⁷ User Pairing

⁸ Cognitive Radio Inspired NOMA

⁹ Ergodic Overall Capacity

¹⁰ Rayleigh Flat Fading

(۱) جفت شدن کاربران دور با شرایط کانال مشابه، به دلیل اینکه جفت شدن چنین کاربرانی روی پهنای باند مشترک، (که جفت بد نامیده می‌شوند) منجر به کاهش ظرفیت چنین جفت‌هایی حتی کمتر از حالت OMA خواهد شد.

(۲) استفاده از بهره ظرفیت بالای فراهم شده به وسیله NOMA، از طرفی پهنای باند کاربران جفت نشده به وسیله دیگر کاربران قابل استفاده است.

در مرجع [۱۰]، اثر جفت کردن کاربران دور، نزدیک و میانی در NOMA متداول، با دو کاربر در هر جفت، روی عملکرد سیستم ارزیابی شده است. برای حل مشکل جفت کردن کاربران با شرایط کانال مشابه، دو طرح جفت کردن کاربران ارائه شده است که این طرح‌ها می‌توانند ظرفیت سلول را افزایش دهند. طرح‌های پیشنهادی ارائه شده در مرجع [۱۰] در دو حالت SIC کامل و ناقص ارزیابی شده‌اند. اختصاص توان نامناسب به کاربران جفت شده، منجر به افزایش تداخل شده و باعث می‌شود بازایی داده در کاربر نهایی به صورت کامل انجام نگیرد. برای دستیابی به ظرفیت بالا و دوری از تداخل، باید تفاوت بهره کانال کاربران جفت شده به حد کافی بزرگ باشد [۱۱، ۱۲]. در مرجع [۱۳]، مسئله حداکثر کردن نرخ کلی برای سیستم NOMA، روی کانال محوشدگی فرکانس‌گزین، با جفت کردن کاربران در نظر گرفته شده است. طرح جدید اختصاص توان با پیچیدگی کمتر و با در نظر گرفتن تعداد کاربران بیشتر، در مقاله مذکور انجام گرفته است. در مرجع [۱۴]، روشی با هدف کاهش توان کلی و افزایش نرخ کلی، از طریق کنترل توان برای شبکه‌های چندسلولی، با استفاده از NOMA، پیشنهاد شده است. همچنین نشان داده شده است که روش پیشنهادی کنترل توان، می‌تواند در سیستم‌های MIMO به کار گرفته شود. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی نسبت به OFDMA و کانال فروسو، عملکرد بهتری در کاهش توان کلی و افزایش نرخ کلی فراهم می‌کند. در مرجع [۱۵]، یک روش ارسال ترکیبی^۱ (HSS-NM)، با استفاده از NOMA و MUD^۲، برای بهبود عملکرد سیستم تک‌سلولی، پیشنهاد شده است. این روش می‌تواند از مزیت‌های NOMA و MUD به طور مؤثر بهره‌بردار. در حالت چند کاربری، می‌توان به کمک روش «انتخاب کاربر مناسب»، به گذردهی بالا دست یافت. روش پیشنهادی می‌تواند با OFDMA برای ایستگاه‌های پایه چند آنتنی، به منظور دستیابی به ظرفیت بالا ترکیب شود.

NOMA نسبت به OMA، از منابع پهنای باند به صورت بهینه استفاده می‌کند. پشتیبانی از ارتباطات گسترده، بالا بردن قابلیت اطمینان، افزایش گذردهی و کاهش تأخیر از جمله نیازهای شبکه‌های بی‌سیم نسل پنجم هست که با استفاده از فناوری NOMA، می‌توان به آن‌ها پاسخ داد [۱۶، ۱۷]. مرجع [۱۷]، یک دید اصولی از ارسال‌های مبتنی بر NOMA، بر اساس چهارچوب طراحی فرستنده-گیرنده، فراهم می‌کند. ویژگی‌های ارسال MIMO حجیم^۳، پیاده‌سازی NOMA در سیستم MIMO حجیم را آسان می‌کند و از این طریق می‌توان بهره طیفی را در مقایسه با OMA، بهبود بخشید.

در مرجع [۱۸]، یک فن جدید دسترسی چندگانه با عنوان PSMA^۴، پیشنهاد شده است. در PSMA، از هر دو حوزه توان و کد برای ارسال سیگنال کاربران، به طور هم‌زمان روی یک زیر حامل، استفاده می‌شود. با استفاده از PSMA، یک کدبندی در ناحیه پوششی ایستگاه پایه، می‌تواند بیش از یک بار مورد استفاده قرار گیرد که این می‌تواند بهره طیفی را بهبود بخشد. نتایج نشان

^۱ Hybrid Switching Strategy of NOMA and MUD

^۲ Multiuser Diversity

^۳ Massive Multiple Input Multiple Output

^۴ Power domain Sparse code Multiple Access

می‌دهند که PSMA در مقایسه با SCMA^۱ و PD-NOMA^۲، بهره طیفی را حدود ۵۰ درصد بهبود می‌بخشد. در این مقاله، روش جفت کردن کاربران در NOMA با سه کاربر در هر جفت، به دلایل بیان شده در [۹]، یعنی ۱- بهره‌مندی کاربران جفت نشده از مزیت‌های فراهم شده توسط NOMA، ۲- دسترسی سایر کاربران به باند فرکانسی کاربران جفت نشده، برای دستیابی به ظرفیت بالا در سیستم در نظر گرفته شده است.

برای بهبود عملکرد NOMA، کاربرانی که شرایط کانال متمایزی دارند، برای تشکیل جفت یا گروه انتخاب می‌شوند [۸، ۱۱، ۱۲]. از این‌رو هدف این مقاله، بیان مشکلات به وجود آمده در جفت‌هایی است که با استفاده از روش بیان شده در [۹]، تشکیل می‌شوند. در این جفت‌ها که شامل کاربران با شرایط کانال مشابه، روی پهنای باند مشترک هستند، سیگنال کاربران دچار تداخل شده و فرآیند SIC، به صورت ناقص انجام می‌شود. از طرفی کاربران میانی برای دستیابی به داده خود، مطابق روش بیان شده در [۹]، دو راه پیش رو دارند؛ یا باید تشکیل جفت ندهند که در این صورت نمی‌توانند از مزیت‌های NOMA بهره‌مند شوند و یا باید باهم جفت شوند که در این صورت هم به دلیل نزدیکی شرایط کانال کاربران جفت شده، SIC ناقص رخ خواهد داد.

بروز SIC ناقص، منجر به کاهش ظرفیت سیستم خواهد شد، بنابراین برای دستیابی به ظرفیت بالا و دوری از بروز SIC ناقص در جفت‌ها، کاربران با شرایط کانال متمایز برای تشکیل جفت باید انتخاب شوند. همچنین در این مقاله، شیوه‌ای برای جفت کردن کاربران، از جمله کاربران میانی، ارائه می‌شود که می‌تواند ظرفیت کلی سیستم را، علاوه بر حذف یا حداقل کردن بروز SIC ناقص، بهبود بخشد. ساختار این مقاله به صورت زیر است:

(۱) ابتدا به بیان مفهوم NOMA و شیوه جفت کردن کاربران در آن می‌پردازیم.

(۲) سپس روش جفت کردن کاربران، بیان شده در [۹] که فقط در حالت SIC کامل بررسی شده است را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

(۳) در بخش ۴، مفهوم SIC ناقص برای روش جفت شدن سه کاربر به طور تحلیلی محاسبه می‌شود. همچنین تأثیر جفت شدن کاربران با شرایط کانال مشابه، در کاهش ظرفیت سیستم نشان داده می‌شود.

(۴) در بخش ۵، برای حذف یا حداقل کردن بروز تداخل در جفت‌ها، دوری از SIC ناقص، حل مشکل جفت شدن کاربران میانی و نیز افزایش ظرفیت کلی ارگودیک، روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI را برای اولین بار پیشنهاد می‌دهیم.

(۵) سرانجام عملکرد این روش‌ها برای اولین بار، در ترم ظرفیت کلی ارگودیک و در دو حالت SIC کامل و ناقص برای گیرنده‌ها، تحت شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- دسترسی چندگانه غیرمتعامد و جفت کردن کاربران

دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA)، سیگنال کاربران را در طرف فرستنده با ضرایب اختصاصی توان متناسب با شرایط کانال آن‌ها، مالتی‌پلکس^۳ می‌کند و از SIC در طرف گیرنده استفاده می‌کند. برای بهبود بهره عملکرد در NOMA، از جفت کردن

^۱ Sparse Code Multiple Access

^۲ Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access

^۳ Multiplex

کاربران در آن استفاده می‌شود. با مالتی‌پلکس کردن سیگنال کاربران، NOMA اجازه استفاده هم‌زمان کاربران از باند فرکانسی مشترک را می‌دهد [۴-۱].

برای آشکارسازی سیگنال کاربران، تفاوت تلفات مسیر^۱ بین کاربران به‌عنوان یک پارامتر مهم و اثرگذار در نظر گرفته می‌شود، با این شرایط و برای دوری از تداخل در فرآیند آشکارسازی سیگنال کاربران، کاربران دور و نزدیک برای تشکیل جفت انتخاب می‌شوند. در این جفت‌ها، توان اختصاصی به کاربران مطابق با عکس شرایط کانال آن‌ها خواهد بود، یعنی توان بیشتر به کاربر دور اختصاص داده می‌شود [۳-۱، ۱۱، ۱۲].

با اختصاص توان ارسالی بیشتر به کاربر دور، این کاربر قادر خواهد بود اطلاعات مربوط به خود را با خطای کمتری آشکار کند چراکه به دلیل افت کانال و تخصیص توان کمتر به کاربران نزدیک، داده‌های این کاربران در ورودی گیرنده کاربر دور به‌عنوان نویز تلقی خواهند شد. کاربر نزدیک به ایستگاه پایه هم از SIC، برای آشکارسازی پیام خود استفاده می‌کند، بدین شکل که اول پیام کاربر دور را آشکارسازی می‌کند، سپس پیام خود را از آنچه دریافت کرده است، کسر می‌کند [۲، ۳، ۱۱، ۱۲].

فرض کنید در یک سلول و در حالت فروسو، M کاربر با شرایط کانال $|h_1|^2 < |h_2|^2 < \dots < |h_M|^2$ برای تشکیل گروه انتخاب شده باشند که در آن $|h_m|^2$ بهره کانال mامین کاربر است. ضرایب اختصاصی توان به کاربران به‌صورت $\phi_1 > \phi_2 > \dots > \phi_M$ مرتب شده‌اند که در آن ϕ_m ضریب اختصاصی توان mامین کاربر است. کاربر Mام، به‌عنوان نزدیک‌ترین کاربر به ایستگاه پایه تعریف می‌شود. سیگنال مالتی‌پلکس شده ارسالی با معادله $x = \sum_{m=1}^M \sqrt{P\phi_m} s_m$ بیان می‌شود که در آن P، توان کل ارسالی است. سیگنال دریافتی mامین کاربر $y_m = h_m x + n_m$ است که در آن n_m ، نویز سفید گوسی جمع‌شونده^۲ (AWGN) با میانگین صفر است. نرخ داده کلی M کاربر جفت شده می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود [۹، ۱۰]:

$$R_{total} = \sum_{m=1}^{M-1} \log_2 \left(1 + \frac{\rho \phi_m |h_m|^2}{\rho |h_m|^2 \sum_{i=m+1}^M \phi_i + 1} \right) + \log_2 (\rho \phi_M |h_M|^2 + 1) \quad (۱)$$

که در آن ρ ، بیانگر سیگنال به نویز است.

برای حالت خاصی که در آن فقط دو کاربر دور و نزدیک باهم جفت شده‌اند روابط نرخ ارسال داده برای این دو کاربر به‌صورت معادلات زیر خواهد بود [۴، ۱]:

$$R_1 = \log_2 (1 + \rho \phi_1 |h_1|^2) \quad (۲)$$

$$R_2 = \log_2 \left(\frac{\rho \phi_2 |h_2|^2}{\rho \phi_1 |h_2|^2 + 1} \right) \quad (۳)$$

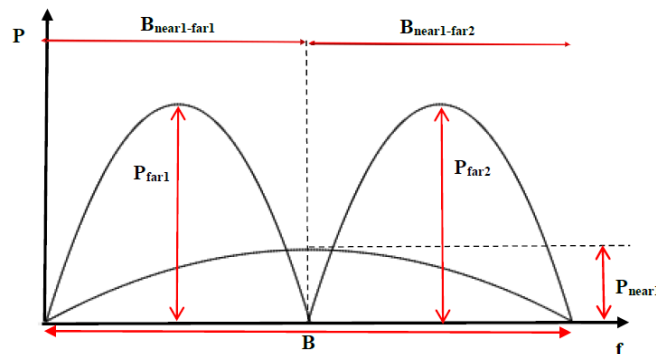
کاربر ۱ و ۲ به ترتیب کاربران نزدیک به ایستگاه پایه و دور هستند. البته لازم به ذکر است که معادلات (۲) و (۳) در حالت SIC کامل محاسبه شده‌اند.

^۱ Path Loss

^۲ Additive White Gaussian Noise

۳- مدل سیستم

با فرض اینکه در یک سلول، تعداد کاربران دور بیشتر از تعداد کاربران نزدیک به ایستگاه پایه باشد، فرض می‌کنیم N کاربر در سلول وجود دارد، به‌طوری‌که M کاربر به‌طور تصادفی برای تشکیل گروه انتخاب شده‌اند. شرایط کانال کاربران به‌صورت $|h_1|^2 < |h_2|^2 < \dots < |h_M|^2$ است. مطابق با [۹]، به دلیل استفاده مؤثر از باند فرکانسی کاربران جفت نشده در سیستم NOMA، جفت‌های ما شامل ۳ کاربر در هر جفت است. مطابق با شکل ۱، یک کاربر نزدیک به ایستگاه پایه با دو کاربر دور برای دستیابی به داده خود، روی پهنای باند کلی B ، تشکیل جفت می‌دهند.



شکل ۱. توزیع منابع (توان و پهنای باند) بین کاربران، در روش جفت کردن کاربران در NOMA با سه کاربر در هر جفت [۹]

همچنین فرض شده است کانال روی هر لینک، بین ایستگاه پایه و کاربران مستقل است و دارای توزیع محوشدگی تخت رایلی است، به‌طوری‌که $h_m \sim CN(0, \lambda_m = d_m^{-\alpha})$ ، بهره کانال λ_m امین کاربر با میانگین صفر و واریانس λ_m برای لینک بین ایستگاه پایه و λ_m امین کاربر است. d و α به ترتیب بیانگر فاصله از ایستگاه پایه و توان تلفی مسیر هستند.

به دلیل اینکه جفت‌های ما شامل سه کاربر در هر جفت است، بنابراین یک کاربر نزدیک به ایستگاه پایه با دو کاربر دور که شرایط کانال یکسانی دارند، تشکیل گروه یا جفت را خواهند داد، به‌طوری‌که $|h_{near_i}|^2 > |h_{far_j}|^2 \approx |h_{far_k}|^2$ و $d_{near_i} < d_{far_j} \approx d_{far_k}$ است. ضرایب اختصاصی توان به کاربران به‌صورت $\phi_{near_i} < \phi_{far_j} = \phi_{far_k}$ است، به‌طوری‌که $\phi_{near_i} + \phi_{far_j} + \phi_{far_k} \leq 1$. چون شرایط کانال دو کاربر دور شبیه هم است، گذردهی این دو کاربر تقریباً باهم برابر خواهد بود، ازاین‌رو پهنای باند مشترکی که هر یک از این دو کاربر دور، با کاربر نزدیک روی آن جفت خواهند شد، برابر انتخاب خواهد شد، به‌طوری‌که $B_{near_i-far_j} = B_{near_i-far_k} = \frac{1}{2}B$. به دلیل اینکه کاربران دور شرایط کانال مشابهی دارند، ازاین‌رو جفت کردن این کاربران باهم روی پهنای باند مشترک، منجر به بروز تداخل در فرآیند آشکارسازی سیگنال کاربر نزدیک شده و ظرفیت سیستم کاهش می‌یابد. به همین دلیل $B_{near_i-far_j} \cap B_{near_i-far_k} = \emptyset$ در نظر گرفته می‌شود. برای دستیابی به نرخ داده بالا در هر جفت و یا به عبارتی مطابق با نیاز کاربر دور به نرخ داده بالا، می‌توان پهنای باند مشترک بین کاربر نزدیک و دور را بزرگ‌تر از 0.5 انتخاب کرد.

۳-۱- ظرفیت ارگودیک در حالت SIC کامل

مطابق روش بیان شده در [۹]، نرخ داده قابل‌دستیابی λ_m امین کاربر نزدیک، در جفت « λ_m امین کاربر نزدیک - λ_m امین کاربر دور» به صورت زیر است:

$$C_i = B_{ij} \log_2(1 + \rho \phi_i |h_i|^2) \quad (۴)$$

همچنین نرخ داده قابل‌دستیابی از جفت «ایمین کاربر نزدیک – ایمین کاربر دور» به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} C_j &= B_{ij} \log_2(1 + \min(\gamma_j, \gamma_{j \rightarrow i})) \\ &= B_{ij} \log_2(1 + \min(\frac{\rho \phi_j |h_j|^2}{\rho \phi_i |h_j|^2 + 1}, \frac{\rho \phi_j |h_i|^2}{\rho \phi_i |h_i|^2 + 1})) \\ &= B_{ij} \{ \log_2(1 + \min(\frac{\rho \phi_i |h_j|^2}{2}, \frac{\rho \phi_i |h_i|^2}{2})) + \min(\frac{\rho |h_j|^2}{2}, \frac{\rho |h_i|^2}{2}) \} \quad (۵) \\ &\quad - \log_2(1 + \min(\rho \phi_i |h_j|^2, \rho \phi_i |h_i|^2)) \} \\ &= B_{ij} \{ \log_2(1 + \min(|h_i|^2, |h_j|^2)) (\frac{\rho \phi_i}{2} + \frac{\rho}{2}) \} \\ &\quad - \log_2(1 + \min(\rho \phi_i |h_i|^2, \rho \phi_i |h_j|^2)) \} \end{aligned}$$

که در آن $\phi_j = \frac{1 - \phi_i}{2}$ است. γ_j ، SNR دریافتی ایمین کاربر دور است و $\gamma_{j \rightarrow i}$ ، SNR مورد نیاز در ایمین کاربر نزدیک برای آشکارسازی سیگنال ایمین کاربر دور است.

نرخ داده کلی قابل‌دستیابی از جفت «ایمین کاربر نزدیک – ایمین کاربر دور» به صورت زیر خواهد بود:

$$C_{ij} = C_i + C_j \quad (۶)$$

به طور مشابه نرخ داده کلی قابل‌دستیابی از جفت «ایمین کاربر نزدیک – ایمین کاربر دور» به صورت (۷) است:

$$\begin{aligned} C_{ik} &= B_{ik} \{ \log_2(1 + \min(|h_i|^2, |h_k|^2)) (\frac{\rho \phi_i}{2} + \frac{\rho}{2}) \} \\ &\quad - \log_2(1 + \min(\rho \phi_i |h_i|^2, \rho \phi_i |h_k|^2)) \quad (۷) \\ &\quad + \log_2(1 + \rho \phi_i |h_i|^2) \} \end{aligned}$$

بنابراین ظرفیت کلی جفت «ایمین کاربر نزدیک – ایمین کاربر دور – ایمین کاربر دور» به صورت زیر خواهد بود:

$$C_{ijk} = C_{ij} + C_{ik} \quad (۸)$$

فرض کنید $X \triangleq \min(\rho |h_i|^2, \rho |h_j|^2)$ ، $Y \triangleq \min(\rho \phi_i |h_i|^2, \rho \phi_i |h_j|^2)$ و $Z \triangleq \rho \phi_i |h_i|^2$ است. CDF های X ، Y و Z به ترتیب در (۹)، (۱۰) و (۱۱) بیان شده‌اند:

$$\begin{aligned} F_X(x) &= 1 - \exp(-\frac{x}{\lambda_i(\frac{\rho \phi_i}{2} + \frac{\rho}{2})}) \exp(-\frac{x}{\lambda_j(\frac{\rho \phi_i}{2} + \frac{\rho}{2})}) \quad (۹) \\ &= 1 - \exp(-px - qx) \end{aligned}$$

$$F_Y(y) = 1 - \exp\left(\frac{-y}{\lambda_i \rho \phi_i}\right) \exp\left(\frac{-y}{\lambda_j \rho \phi_i}\right) \quad (10)$$

$$= 1 - \exp(-ry - sy)$$

$$F_Z(z) = 1 - \exp\left(\frac{-z}{\lambda_i \rho \phi_i}\right) = 1 - \exp(-rz) \quad (11)$$

که در آن $s = \frac{1}{\lambda_j \rho \phi_i}$ و $p = \frac{1}{\lambda_i (\frac{\rho \phi_i}{2} + \frac{\rho}{2})}$, $q = \frac{1}{\lambda_j (\frac{\rho \phi_i}{2} + \frac{\rho}{2})}$, $r = \frac{1}{\lambda_i \rho \phi_i}$ است.

همچنین PDF های X , Y و Z به ترتیب در (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) بیان شده‌اند:

$$f_X(x) = (p + q) \exp(-px - qx) \quad (12)$$

$$f_Y(y) = (r + s) \exp(-ry - sy) \quad (13)$$

$$f_Z(z) = r \exp(-rz) \quad (14)$$

بنابراین ظرفیت کلی ارگودیک جفت «آمین کاربر نزدیک - آمین کاربر دور» به صورت (۱۵) خواهد بود:

$$C_{erg}^{ij} = E\{C_{ij}\} = E\{C_i\} + E\{C_j\}$$

$$= B_{ij} \int_0^\infty \log_2(1+x) f_X(x) dx$$

$$- B_{ij} \int_0^\infty \log_2(1+y) f_Y(y) dy \quad (15)$$

$$+ B_{ij} \int_0^\infty \log_2(1+z) f_Z(z) dz$$

که در آن E عملگر میانگین‌گیری است. با جایگذاری روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) در (۱۵)، رابطه (۱۵) را به صورت (۱۶) بازنویسی می‌کنیم:

$$C_{erg}^{ij} = B_{ij} \{ (p+q) \int_0^\infty \log_2(1+x) \exp(-px - qx) dx$$

$$- (r+s) \int_0^\infty \log_2(1+y) \exp(-ry - sy) dy$$

$$+ r \int_0^\infty \log_2(1+z) \exp(-rz) dz \} \quad (16)$$

$$= \frac{B_{ij}}{\ln 2} \{ -ei(-(p+q)) \exp(p+q)$$

$$+ ei(-(r+s)) \exp(r+s)$$

$$- ei(-r) \exp(r) \}$$

که در آن $ei(\cdot)$ تابع انتگرال‌نمایی است و به صورت (۱۷) تعریف می‌شود:

$$ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt \quad (17)$$

به طور مشابه، ظرفیت کلی ارگودیک جفت «آمین کاربر نزدیک - آمین کاربر دور» به صورت (۱۸) خواهد بود:

$$C_{erg}^{ik} = \frac{B_{ik}}{\ln 2} \{-ei(-(u+l))\exp(u+l) + ei(-(m+n))\exp(m+n) - ei(-m)\exp(m)\} \quad (18)$$

$$\text{که در آن } u = p, l = \frac{1}{\lambda_k(\frac{\rho\phi_i}{2} + \frac{\rho}{2})}, m = r, n = \frac{1}{\lambda_k\rho\phi_i} \text{ است.}$$

با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۸)، ظرفیت کلی ارگودیک جفت «لامین کاربر نزدیک - لامین کاربر دور - k لامین کاربر دور» در سیستم NOMA با سه کاربر در هر جفت و در حالت SIC کامل، به صورت زیر خواهد بود:

$$C_{sum-erg}^{ijk} = C_{erg}^{ij} + C_{erg}^{ik} \quad (19)$$

۴- ظرفیت ارگودیک در حالت SIC ناقص

در این بخش مفهوم SIC ناقص، تداخل ایجاد شده در آشکارسازی سیگنال کاربران و تأثیر این تداخل، روی عملکرد سیستم را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. مشکل روش جفت کردن کاربران بیان شده در بخش ۳-۱، زمانی آشکار خواهد شد که کاربران با شرایط کانال مشابه تشکیل جفت دهند. از طرفی کاربران میانی در این روش با تشکیل جفت، سیگنال‌های خود را به همراه تداخل آشکارسازی خواهند کرد. تداخل ناشی از جفت شدن کاربران با شرایط کانال مشابه، باعث می‌شود فرآیند SIC به صورت ناقص انجام گیرد. این مشکل عملکرد سیستم را تحت تأثیر قرار داده و منجر به افت شدید ظرفیت سیستم می‌شود.

تاکنون فرض بر این بود که کاربر نزدیک، پیام خود را به طور کامل آشکار می‌کند و پیام کاربر دور را به طور کامل حذف می‌کند. این در شرایطی است که اختلاف بهره کانال مابین کاربر نزدیک و دو کاربر دور به حد کافی بزرگ باشد، یعنی فاصله کاربران دور و نزدیک از هم زیاد باشد [۱۰]. به دلیل توزیع تصادفی کاربران در سلول، نسبت کاربران در نواحی مختلف سلول متفاوت خواهد بود. از این رو با جفت‌هایی که شرایط کانال کاربران، در آن جفت‌ها نزدیک به هم است، روبرو خواهیم شد. این نزدیکی در شرایط کانال کاربران، باعث ایجاد تداخل در فرآیند SIC خواهد شد. بروز SIC ناقص، منجر به کاهش ظرفیت سیستم می‌شود.

مطابق با روش بیان شده در بخش ۳-۱، فرض می‌کنیم سه کاربر در سلول وجود دارد. در چنین مواردی نرخ داده قابل دستیابی لامین کاربر نزدیک، در جفت «لامین کاربر نزدیک - لامین کاربر دور» و در جفت «لامین کاربر نزدیک - k لامین کاربر دور»، به ترتیب به صورت (۲۰) و (۲۱) خواهد بود:

$$\hat{C}_i = B_{ij} \log_2 \left(1 + \frac{\phi_i |h_i|^2}{\frac{1}{1+\beta} + \beta} \right) = B_{ij} \log_2 \left(1 + \frac{\rho\phi_i |h_i|^2}{1 + \rho\beta} \right) \quad (20)$$

$$\dot{C}_i = B_{ik} \log_2 \left(1 + \frac{\phi_i |h_i|^2}{\frac{1}{1+\beta} + \beta} \right) = B_{ik} \log_2 \left(1 + \frac{\rho\phi_i |h_i|^2}{1 + \rho\beta} \right) \quad (21)$$

که در آن β ، نشان‌گر تداخل، به دلیل تفاوت کوچک در بهره کانال، مابین کاربر نزدیک و دو کاربر دور است. همچنین به دلیل نزدیکی شرایط کانال دو کاربر دور، تداخل ایجاد شده از سیگنال این دو کاربر، در سیگنال کاربر نزدیک به ایستگاه پایه، یکسان خواهد بود. این تداخل، دلیل انجام فرآیند SIC ناقص است. این تداخل می‌تواند به‌عنوان تابعی از تفاوت بهره کانال مابین کاربر نزدیک و دو کاربر دور تعریف شود [۱۰].

با فرض $\hat{Z} = \frac{\phi_i |h_i|^2}{\frac{1}{\rho} + \beta}$ PDF و CDF متغیر $\hat{Z}$ به ترتیب به صورت معادلات (۲۲) و (۲۳) خواهد بود:

$$F_{\hat{Z}}(\hat{z}) = 1 - \exp\left(\frac{-(1 + \rho\beta)\hat{z}}{\lambda_i \rho \phi_i}\right) = 1 - \exp(-\hat{r}\hat{z}) \quad (22)$$

$$f_{\hat{Z}}(\hat{z}) = \hat{r} \exp(-\hat{r}\hat{z}) \quad (23)$$

که در آن $\hat{r} = \frac{(1 + \rho\beta)}{\lambda_i \rho \phi_i}$ است.

ظرفیت ارگودیک $\dot{I}$ مین کاربر نزدیک، در جفت « $\dot{I}$ مین کاربر نزدیک - $\dot{I}$ مین کاربر دور» به صورت (۲۴) است:

$$\begin{aligned} \hat{C}_i^{erg} &= E\{\hat{C}_i\} \\ &= B_{ij} \int_0^\infty \hat{r} \log_2(1 + \hat{z}) \exp(-\hat{r}\hat{z}) d\hat{z} \quad (24) \\ &= \frac{B_{ij}}{\ln 2} (-ei(-\hat{r}) \exp(\hat{r})) \end{aligned}$$

به‌طور مشابه، ظرفیت ارگودیک $\dot{I}$ مین کاربر نزدیک، در جفت « $\dot{I}$ مین کاربر نزدیک - $\dot{I}$ مین کاربر دور» به صورت (۲۵) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{C}_i^{erg} &= E\{\dot{C}_i\} \\ &= B_{ik} \int_0^\infty \hat{r} \log_2(1 + \hat{z}) \exp(-\hat{r}\hat{z}) d\hat{z} \quad (25) \\ &= \frac{B_{ik}}{\ln 2} (-ei(-\hat{r}) \exp(\hat{r})) \end{aligned}$$

برای کاربران دور، ظرفیت ارگودیک محاسبه شده در حالت SIC کامل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، به دلیل اینکه این کاربران برای آشکارسازی سیگنال خود از SIC استفاده نمی‌کنند [۱۰-۱۲]. این کاربران سیگنال خود را از طریق رفتار با سیگنال دیگر کاربران به‌عنوان نویز آشکار می‌کنند، چون سطح توان پیام سایر کاربران پایین است. بنابراین ظرفیت کلی ارگودیک جفت « $\dot{I}$ مین کاربر نزدیک - $\dot{I}$ مین کاربر دور» و جفت « $\dot{I}$ مین کاربر نزدیک - $\dot{I}$ مین کاربر دور»، به ترتیب به صورت (۲۶) و (۲۷) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \hat{C}_{erg}^{ij} &= \frac{B_{ij}}{\ln 2} \{-ei(-(p+q)) \exp(p+q) \\ &\quad + ei(-(r+s)) \exp(r+s) \\ &\quad - ei(-\hat{r}) \exp(\hat{r})\} \quad (26) \end{aligned}$$

$$\hat{C}_{erg}^{ik} = \frac{B_{ik}}{\ln 2} \{-ei(-(u+l))\exp(u+l) + ei(-(m+n))\exp(m+n) - ei(-\hat{r})\exp(\hat{r})\} \quad (27)$$

سرانجام ظرفیت کلی ارگودیک جفت «ایمین کاربر نزدیک - زامین کاربر دور - k امین کاربر دور» در سیستم NOMA با سه کاربر در هر جفت و در حالت SIC ناقص که برای اولین بار در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است، به صورت زیر خواهد بود:

$$\hat{C}_{sum-erg}^{ijk} = \hat{C}_{erg}^{ij} + \hat{C}_{erg}^{ik} \quad (28)$$

۵- روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI

در این بخش طرحی با هدف افزایش ظرفیت سیستم و دوری از تشکیل جفت بد که در آن SIC ناقص رخ می‌دهد، ارائه می‌شود. در این طرح دیگر نیازی نیست سلول فقط شامل کاربران دور و نزدیک باشد، بلکه هر سه نوع از کاربران (نزدیک، میانی و دور) با شرایط کانال متفاوت را خواهیم داشت. طرح بیان شده در بخش ۳-۱، با فرض اینکه سلول فقط شامل کاربران دور و نزدیک است و تعداد کاربران دور از تعداد کاربران نزدیک بیشتر است و نیز تفاوت بهره کانال، بین کاربران جفت شده بزرگ است، ارائه شده است. حال اگر در یک سلول توزیع کاربران به نحوی باشد که تفاوت بهره کانال کاربران، به حد کافی بزرگ نباشد، جفت‌هایی تشکیل خواهند شد که شرایط کانال کاربران در آن جفت‌ها، نزدیک به هم خواهد بود. طبق آنچه در بخش ۴ ذکر شد، این نزدیکی در شرایط کانال کاربران جفت شده، منجر به بروز SIC ناقص و در نتیجه افت شدید ظرفیت سیستم خواهد شد.

از طرفی کاربران میانی در طرح بیان شده در بخش ۳-۱، یا باید تشکیل جفت ندهند که در این صورت، از مزیت‌های فراهم شده توسط NOMA بی‌بهره خواهند ماند و یا باید باهم جفت شوند که در این صورت به دلیل نزدیکی شرایط کانال کاربران جفت شده، SIC ناقص رخ خواهد داد. بنابراین طرح بیان شده در بخش ۳-۱، دارای دو مشکل اساسی خواهد بود: ۱) محدود بودن طرح فقط به کاربران دور و نزدیک، ۲) بروز SIC ناقص در برخی از جفت‌ها.

معمولاً کاربران بر اساس مقدار شاخص کیفیت کانال خود $(CQI)^1$ ، به سه کلاس low CQI، middle CQI و high CQI که به ترتیب بیانگر کاربران نزدیک، میانی و دور نسبت به ایستگاه پایه هستند، تقسیم می‌شوند [۱۹، ۲۰]. مطابق با [۲۰]، معیار اصلی برای تعیین مقدار CQI، سیگنال به تداخل به اضافه نویز (SINR) است. CQI به صورت (۲۹) تعریف می‌شود:

$$CQI = \frac{P_t |h|^2}{I} \quad (29)$$

که در آن P_t بیشترین توان ارسالی و I ، نویز و تداخل دریافتی به وسیله کاربر است.

با بهره‌گیری از الگوریتم جفت کردن M -user UCGD^۲، بیان شده در [۱۰]، روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

¹ Channel Quality Indicator

² Uniform Channel Gain Difference

کاربران را بر اساس شاخص CQI، به سه کلاس ذکر شده تقسیم‌بندی می‌کنیم. برای سادگی فرض می‌کنیم تعداد کاربران در هر کلاس یکسان است. کاربران را در هر کلاس، بر اساس شرایط کانال آن‌ها به صورت نزولی مرتب می‌کنیم. برای بهبود ظرفیت سیستم و دوری از بروز SIC ناقص، در سیگنال کاربران جفت شده، اولین کاربر در هر کلاس را با هم جفت می‌کنیم. جفت بعدی شامل دومین کاربر در هر کلاس خواهد بود و به همین ترتیب جفت‌های بعدی تشکیل خواهند شد.

چون جفت‌های ما شامل سه کاربر در هر جفت هستند، برای سادگی فرض می‌کنیم تعداد کاربران در سلول مضربی از سه است. اگر تعداد کاربران مضربی از سه نبود، پس از جفت کردن کاربران با روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI، کاربرانی که نهایتاً باقی می‌مانند اگر شرایط کانال نزدیک به هم نداشته باشند، از روش NOMA با دو کاربر در هر جفت، برای دستیابی به داده خود استفاده خواهند کرد و اگر شرایط کانال نزدیک به هم داشته باشند از OMA استفاده خواهند کرد.

فرض کنید N کاربر در سلول مطابق با شرایط کانال $|h_1|^2 \geq |h_2|^2 \geq \dots \geq \left| h_{\frac{N}{3}} \right|^2 \geq \left| h_{\frac{N}{3}+1} \right|^2 \geq \dots \geq \left| h_{\frac{2N}{3}} \right|^2 \geq \left| h_{\frac{2N}{3}+1} \right|^2 \geq \dots \geq |h_N|^2$ مرتب شده‌اند. برای سادگی N را مضربی از سه در نظر می‌گیریم. کلاس‌بندی کاربران مطابق با (۳۰) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{Class 1: } & |h_1|^2 \geq |h_2|^2 \geq \dots \geq \left| h_{\frac{N}{3}} \right|^2 \\ \text{Class 2: } & \left| h_{\frac{N}{3}+1} \right|^2 \geq \left| h_{\frac{N}{3}+2} \right|^2 \dots \geq \left| h_{\frac{2N}{3}} \right|^2 \\ \text{Class 3: } & \left| h_{\frac{2N}{3}+1} \right|^2 \geq \left| h_{\frac{2N}{3}+2} \right|^2 \dots \geq |h_N|^2 \end{aligned} \quad (30)$$

متناسب با این کلاس‌بندی، جفت‌ها به صورت (۳۱) تشکیل خواهند شد:

$$\begin{aligned} \text{Pair 1: } & |h_1|^2, \left| h_{\frac{N}{3}+1} \right|^2, \left| h_{\frac{2N}{3}+1} \right|^2 \\ \text{Pair 2: } & |h_2|^2, \left| h_{\frac{N}{3}+2} \right|^2, \left| h_{\frac{2N}{3}+2} \right|^2 \\ & \vdots \\ \text{Pair } \frac{N}{3}: & \left| h_{\frac{N}{3}} \right|^2, \left| h_{\frac{2N}{3}} \right|^2, |h_N|^2 \end{aligned} \quad (31)$$

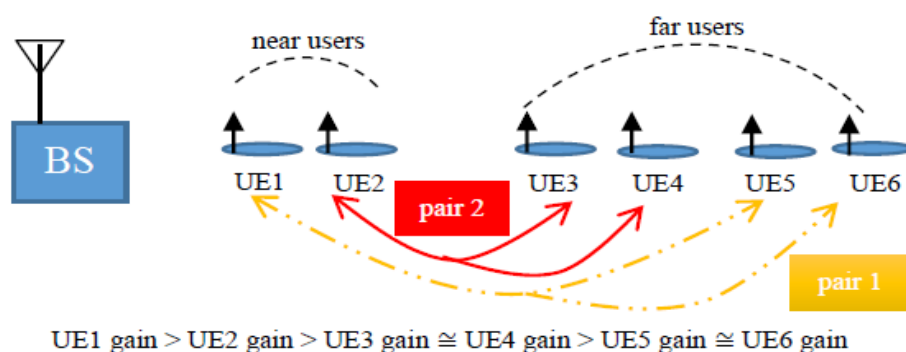
کلاس‌بندی و متناسب با آن تشکیل جفت‌ها، با روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI، موجب خواهد شد که کاربران موجود در هر کلاس، با هم تشکیل جفت ندهند و در نتیجه پهنای باند مشترکی نداشته باشند. هر جفت شامل تنها یک کاربر از هر کلاس است. از این رو می‌توان با استفاده از این روش، از جفت شدن کاربران با شرایط کانال مشابه روی پهنای باند مشترک دوری کرد و نیز مشکل جفت شدن کاربران میانی را حل کرد. در نتیجه از بروز تداخل در سیگنال کاربران جفت شده و کاهش ظرفیت سیستم، از طریق بروز SIC ناقص در آشکارسازی سیگنال کاربران، جلوگیری کرد.

مزیت دیگر روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI این است که در این روش جفت‌های ما شامل یک کاربر نزدیک، یک کاربر میانی و یک کاربر دور است. با توجه به تمایل کاربر میانی نسبت به کاربر دور به ظرفیت بالاتر، ظرفیت چنین جفت‌هایی نسبت به جفت‌های تشکیل شده، مطابق با روش بیان شده در بخش ۱-۳ که شامل یک کاربر نزدیک و دو کاربر دور هستند، بیشتر خواهد بود. در نتیجه علاوه بر اینکه می‌توان با روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI، از بروز SIC ناقص دوری کرد، بلکه می‌توان مشکل جفت شدن کاربران میانی را حل کرده و ظرفیت سیستم را نسبت به روش بیان شده در بخش ۱-۳ بهبود بخشید.

۶- نتایج عددی

بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، ظرفیت کلی ارگودیک را برای روش بیان شده در بخش ۱-۳، در دو حالت SIC کامل و ناقص برای گیرنده‌ها، یک‌بار برای حضور ۳ کاربر در سلول و بار دیگر برای حضور ۶ کاربر در سلول، مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین عملکرد روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI را، نسبت به روش بیان شده در بخش ۱-۳، در ترم ظرفیت کلی ارگودیک مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. فاصله مابین ایستگاه پایه و کاربران به عدد ۱ نرمالیزه شده است. برای سادگی فرض می‌شود که کاربران و ایستگاه پایه هم‌راستا هستند. فرض می‌کنیم $v=4$ و $B=1\text{Hz}$ است.

برای روش بیان شده در بخش ۱-۳، داریم: در حالت حضور ۳ کاربر در سلول، فرض شده است که فاصله کاربر نزدیک و دو کاربر دور از ایستگاه پایه به‌صورت $d_{near1}=0.2$, $d_{far1}=d_{far2}=1$ است. ضرایب اختصاصی توان به کاربران به‌صورت $\phi_{near1}=0.1$, $\phi_{far1}\approx\phi_{far2}=0.45$ است. برای حضور ۶ کاربر در سلول مطابق با شکل ۲، دو جفت خواهیم داشت. در جفت ۱ فرض شده است که $d_{near1}=0.2$, $d_{far5}=d_{far6}=1$ است. فاصله کاربران از ایستگاه پایه در جفت ۲ به‌صورت $d_{near2}=0.3$, $d_{far3}=d_{far4}=0.9$ است. ضرایب اختصاصی توان به کاربران در جفت ۱ به‌صورت $\phi_{near2}=0.1$, $\phi_{far3}\approx\phi_{far4}=0.45$ و در جفت ۲ به‌صورت $\phi_{near1}=0.1$, $\phi_{far5}\approx\phi_{far6}=0.45$ است. برای حالت SIC ناقص فرض می‌کنیم که $\beta=-25\text{ dB}$ است.



شکل ۲. جفت کردن شش کاربر در NOMA با سه کاربر در هر جفت

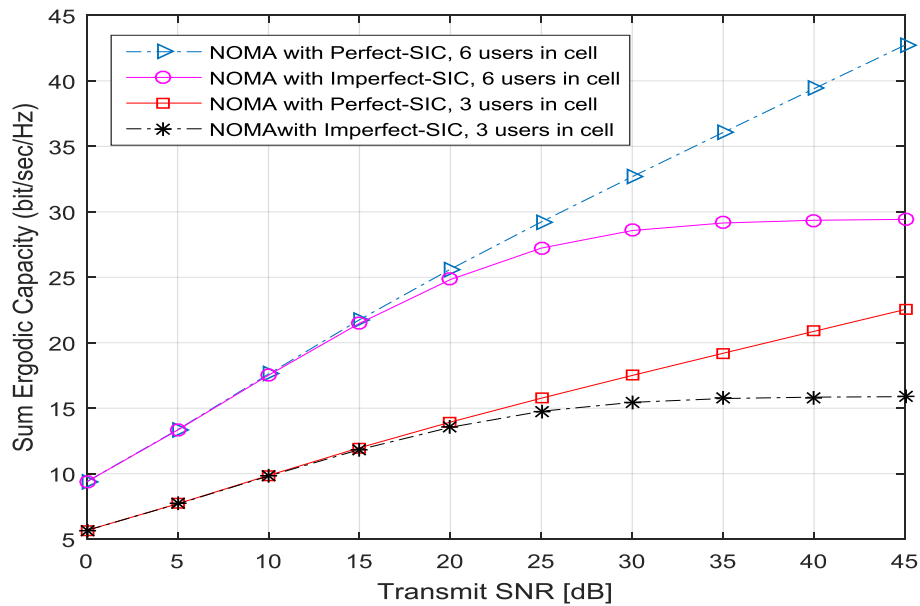
شکل ۳، ظرفیت کلی ارگودیک را برای روش بیان شده در بخش ۱-۳، در دو حالت SIC کامل و ناقص، نسبت به SNR نشان می‌دهد که در آن SNR از ۰ تا ۴۵ دسی‌بل متغیر است. همان‌طور که از شکل ۳-الف معلوم است، ظرفیت کلی ارگودیک در

حالت SIC کامل، به دلیل عدم وجود تداخل، با افزایش SNR بیشتر می‌شود. در حالی که در حالت ناقص، ظرفیت تا SNR معینی افزایش می‌یابد سپس در SNR های بالا، تداخل اثر خود را بیشتر نمایان کرده و ظرفیت به تدریج کاهش می‌یابد. کاهش ظرفیت کاربر نزدیک به ایستگاه پایه به دلیل بروز SIC ناقص، دلیل کاهش ظرفیت کل سیستم است. همچنین از شکل ۳-الف) معلوم است که افت ظرفیت در حضور ۶ کاربر در سلول نسبت به ۳ کاربر در سلول، بیشتر است و این یعنی در حالت ناقص، با افزایش تعداد کاربران در سلول، عملکرد سیستم دچار افت شدید خواهد شد. در شکل ۳-ب)، ظرفیت کلی ارگودیک برای حضور ۳ کاربر در سلول و برای روش‌های OMA، NOMA-OMA و NOMA بیان شده در بخش ۳-۱، مقایسه شده‌اند. از شکل ۳-ب) معلوم است که در حالت ناقص و حضور سه کاربر در سلول، ظرفیت کلی ارگودیک برای روش بیان شده در بخش ۳-۱، حتی کمتر از حالت OMA و NOMA-OMA در SNR های بالا می‌شود.

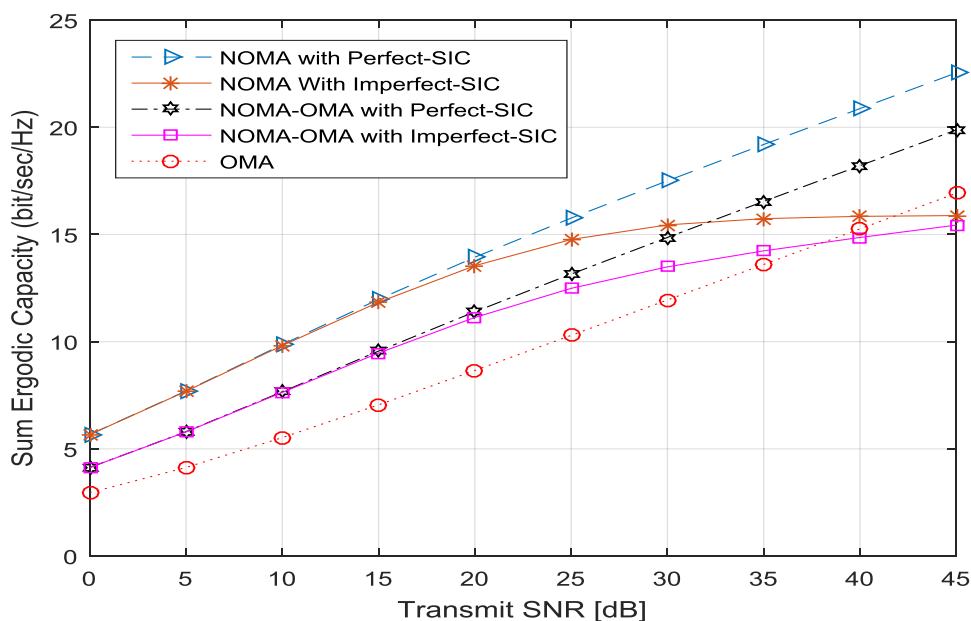
شکل ۴، ظرفیت کلی ارگودیک را برای حضور ۳ کاربر در سلول و در دو حالت SIC کامل و ناقص، برای روش بیان شده در بخش ۳-۱، نسبت به فاصله کاربر نزدیک از ایستگاه پایه، نشان می‌دهد. از شکل ۴ معلوم است که با دور شدن کاربر نزدیک از ایستگاه پایه، ظرفیت ارگودیک سیستم در دو حالت SIC کامل و ناقص، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش SNR و دور شدن کاربر نزدیک از ایستگاه پایه، ظرفیت ارگودیک سیستم در حالت ناقص نسبت به SIC کامل، کاهش بیشتری می‌یابد. دلیل این کاهش زیاد، افزایش تداخل به دلیل افزایش SNR و نزدیک شدن کاربر نزدیک به کاربران دور در سلول است.

در شکل ۵ و ۶، ظرفیت کلی ارگودیک را برای حضور ۳ کاربر در سلول و در حالت SIC کامل، برای روش بیان شده در بخش ۳-۱ و روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI، به ترتیب نسبت به SNR ارسالی و توان اختصاصی به کاربر نزدیک مقایسه می‌کنیم. برای روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI، سه کاربر نزدیک، میانی و دور با شرایط $d_{near} = 0.2$, $d_{mid} = 0.5$, $d_{far} = 1$ و $\phi_{near} = 0.2$, $\phi_{mid} \approx \phi_{far} = 0.45$ در نظر می‌گیریم. از شکل ۵ معلوم است که روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI، شامل «یک کاربر نزدیک، یک کاربر میانی و یک کاربر دور» در هر جفت، نسبت به روش بیان شده در بخش ۳-۱، شامل «یک کاربر نزدیک و دو کاربر دور» در هر جفت، ظرفیت کلی ارگودیک بالاتری در SNR های پایین فراهم می‌کند. همچنین از شکل ۵ معلوم است که جفت‌های شامل «یک کاربر نزدیک، یک کاربر میانی و یک کاربر دور» علاوه بر حذف یا حداقل کردن بروز SIC ناقص، ظرفیت ارگودیک سیستم را افزایش می‌دهند.

از شکل ۶ معلوم است که ظرفیت کلی ارگودیک سیستم، با استفاده از روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI، نسبت به روش بیان شده در بخش ۳-۱، با افزایش توان اختصاصی به کاربر نزدیک، افزایش زیادی می‌یابد. این افزایش در بازه ابتدایی سریع بوده سپس در بازه بعدی به دلیل توزیع توان بین کاربران، به کندی صورت می‌گیرد. همچنین از شکل ۶ معلوم است که با افزایش SNR، شکاف عملکرد بین دو روش کاهش می‌یابد، گرچه در این حالت هم روش جفت کردن کاربران بر اساس شاخص CQI، ظرفیت کلی ارگودیک بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها فراهم می‌کند.

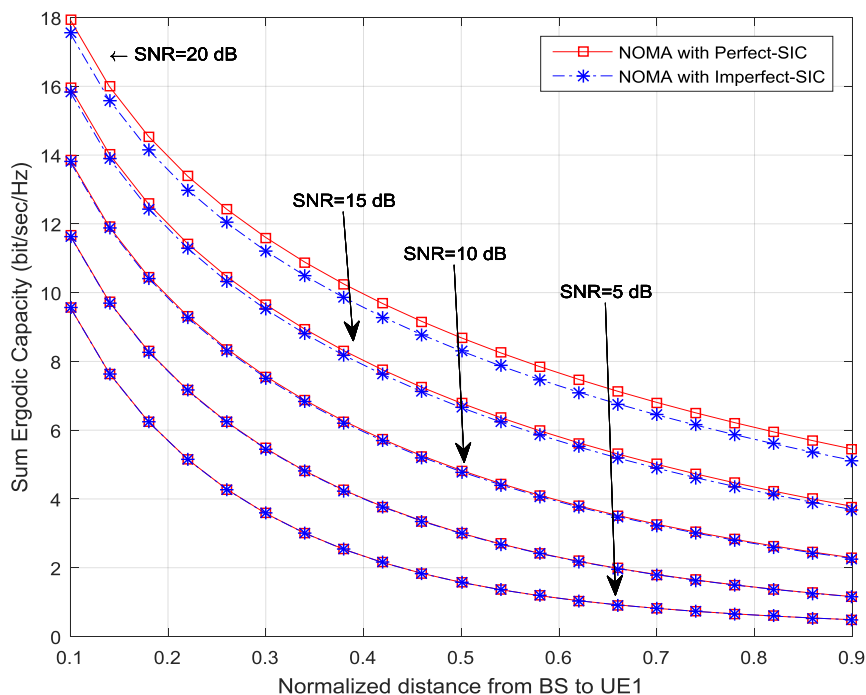


(الف)

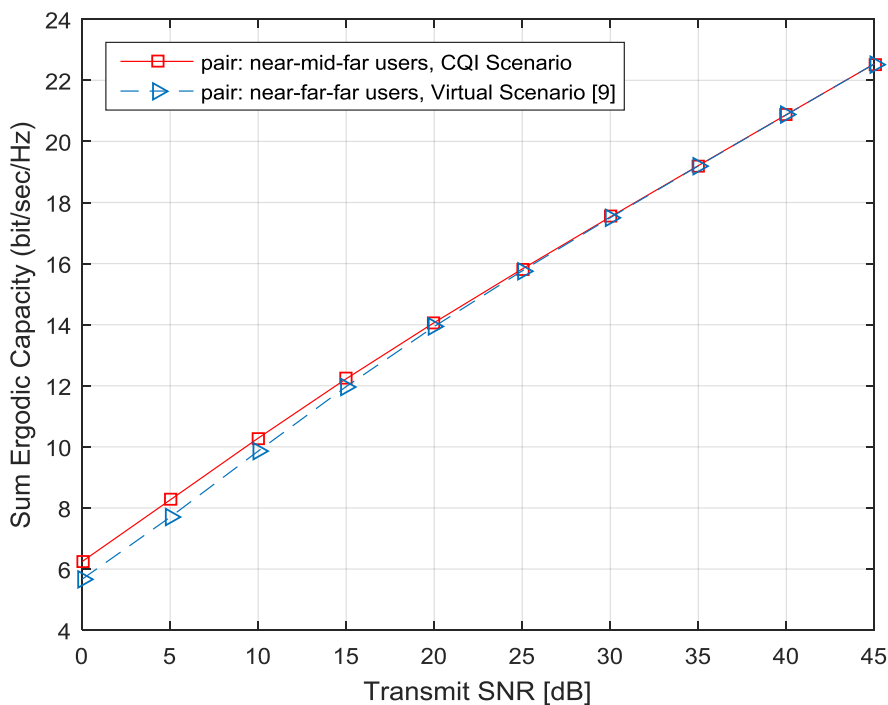


(ب)

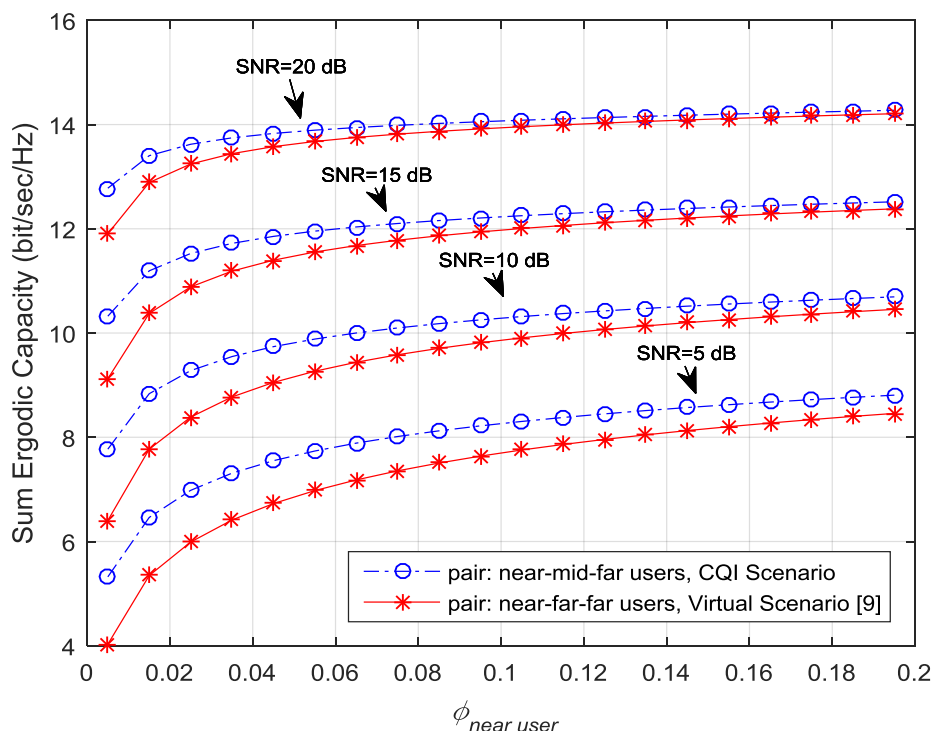
شکل ۳. (الف) ظرفیت کلی ارگودیک در دو حالت حذف کامل و ناقص تداخل متوالی، (ب) ظرفیت کلی ارگودیک در روش‌های مختلف نسبت به SNR ارسالی



شکل ۴. ظرفیت کلی ارگودیک در دو حالت حذف کامل و ناقص تداخل متوالی، نسبت به فاصله کاربر نزدیک تا ایستگاه پایه



شکل ۵. ظرفیت کلی ارگودیک دو روش جفت کردن کاربران نسبت به SNR ارسالی



شکل ۶. ظرفیت کلی ارگودیک دو روش جفت کردن کاربران نسبت به توان اختصاصی به کاربر نزدیک

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مشکل مربوط به روش جفت کردن کاربران در NOMA با سه کاربر در هر جفت، مورد ارزیابی قرار گرفت و ملاحظه گردید که اگر کاربران با شرایط کانال مشابه تشکیل جفت دهند، عملکرد این روش دچار افت خواهد شد. حالت ناقص که باعث کاهش شدید ظرفیت سیستم می‌شود، به صورت تحلیلی برای اولین بار در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین در دو حالت SIC کامل و ناقص برای گیرنده‌ها، ظرفیت کلی ارگودیک به دست آمده از طریق این روش را مقایسه کرده‌ایم. مطابق با شبیه‌سازی‌های انجام شده، نشان دادیم که ظرفیت کلی ارگودیک سیستم، در حالت ناقص و در SNRهای بالا، بیشتر تحت تأثیر تداخل ایجاد شده به وسیله سیگنال کاربران جفت شده، قرار گرفته و برعکس حالت SIC کامل که ظرفیت افزایش می‌یابد، کاهش پیدا خواهد کرد. از طرفی اثر کاربران میانی که دلیل اصلی بروز SIC ناقص هستند، روی عملکرد سیستم NOMA، مورد توجه قرار گرفت. اگر کاربران میانی با هم تشکیل جفت دهند، به دلیل نزدیکی شرایط کانال این کاربران به هم، SIC ناقص اتفاق خواهد افتاد و در نتیجه ظرفیت سیستم کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین در صورت جفت نشدن کاربران میانی، این کاربران از مزیت فراهم شده توسط NOMA، برای افزایش ظرفیت سیستم بی‌بهره خواهند ماند. برای حل این مشکل، روشی برای جفت کردن کاربران پیشنهاد گردید که در آن، کاربران برحسب شرایط کانال خود به کلاس‌های مجزا تقسیم می‌شوند و بعد تشکیل جفت صورت می‌گیرد. با این کار نه تنها کاربران میانی بلکه کاربران با شرایط کانال مشابه، روی پهنای باند مشترک مجبور به تشکیل جفت نخواهند شد و SIC ناقص اتفاق نخواهد افتاد. مطابق با شبیه‌سازی‌های انجام شده، این روش به عنوان راه‌حلی برای دوری از بروز SIC ناقص در جفت‌ها، ظرفیت ارگودیک سیستم را بهبود می‌بخشد.

مراجع

- [1] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-Orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," in Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th, 2013, pp. 1-5.
- [2] A. Benjebbour, A. Li, K. Saito, Y. Saito, Y. Kishiyama, and T. Nakamura, "NOMA: From concept to standardization," in 2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 2015, pp. 18-23.
- [3] Z. Ding et al., "Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks," IEEE Communications Magazine, 2017, vol. 55, no. 2, pp. 185-191.
- [4] K. Higuchi and A. Benjebbour, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access," IEICE Transactions on Communications, 2015, vol. 98, no. 3, pp. 403-414.
- [5] T. Yunzheng, L. Long, L. Shang, and Z. Zhi, "A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5G," China communications, 2015, vol. 12, no. 10, pp. 1-15.
- [6] S. Bharathi, L. Nandita, N. Venkateswaran, and R. Subhashini, "Performance analysis of non-orthogonal multiple access technique with precoding," in Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2017 International Conference on, 2017, pp. 1878-1882.
- [7] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, and T. Nakamura, "System-level performance of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) under various environments," in Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015 IEEE 81st, 2015, pp. 1-5.
- [8] Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, "Impact of User Pairing on 5G Non-orthogonal Multiple-Access Downlink Transmissions," IEEE Trans. Vehicular Technology, 2016, vol. 65, no. 8, pp. 6010-6023.
- [9] M. B. Shahab, M. F. Kader, and S. Y. Shin, "A virtual user pairing scheme to optimally utilize the spectrum of unpaired users in non-orthogonal multiple access," IEEE Signal Processing Letters, 2016, vol. 23, no. 12, pp. 1766-1770.
- [10] M. B. Shahab, M. Irfan, M. F. Kader, and S. Young Shin, "User pairing schemes for capacity maximization in non-orthogonal multiple access systems," Wireless Communications and Mobile Computing, 2016, vol. 16, no. 17, pp. 2884-2894.
- [11] M. B. Shahab, M. F. Kader, and S. Y. Shin, "On the power allocation of non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks," in Open Source Systems & Technologies (ICOSST), 2016 International Conference on, 2016, pp. 89-94.
- [12] H. Zhang, D.-K. Zhang, W.-X. Meng, and C. Li, "User pairing algorithm with SIC in non-orthogonal multiple access system," in Communications (ICC), 2016 IEEE International Conference on, 2016, pp. 1-6.
- [13] Z. Q. Al-Abbasi and D. K. So, "User-pairing based non-orthogonal multiple access (NOMA) system," in Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd, 2016, pp. 1-5.
- [14] Z. Yang, C. Pan, W. Xu, Y. Pan, M. Chen, and M. ElKashlan, "Power control for multi-cell networks with non-orthogonal multiple access," IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 927-942.

- [15] L. Bai, L. Zhu, T. Li, J. Choi, and W. Zhuang, "An Efficient Hybrid Transmission Method: Using Non-Orthogonal Multiple Access and Multiuser Diversity," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, vol. 67, no. 3, pp. 2276-2288.
- [16] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, vol. 35, pp. 2181-2195.
- [17] Y. Chen, A. Bayesteh, Y. Wu, B. Ren, S. Kang, S. Sun, Q. Xiong, C. Qian, B. Yu, and Z. Ding, "Toward the standardization of non-orthogonal multiple access for next generation wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 19-27.
- [18] M. Moltafet, N. Mokari, M. R. Javan, H. Saeedi, and H. Pishro-Nik, "A New Multiple Access Technique for 5G: Power Domain Sparse Code Multiple Access (PSMA)," *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 747-759.
- [19] M. B. Shahab, M. A. Wahla, and M. T. Mushtaq, "Downlink resource scheduling technique for maximized throughput with improved fairness and reduced BLER in LTE," *38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2015, pp. 163-167.
- [20] F. Liu, P. Mähönen, and M. Petrova, "Proportional fairness-based power allocation and user set selection for downlink NOMA systems," *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, pp. 1-6.