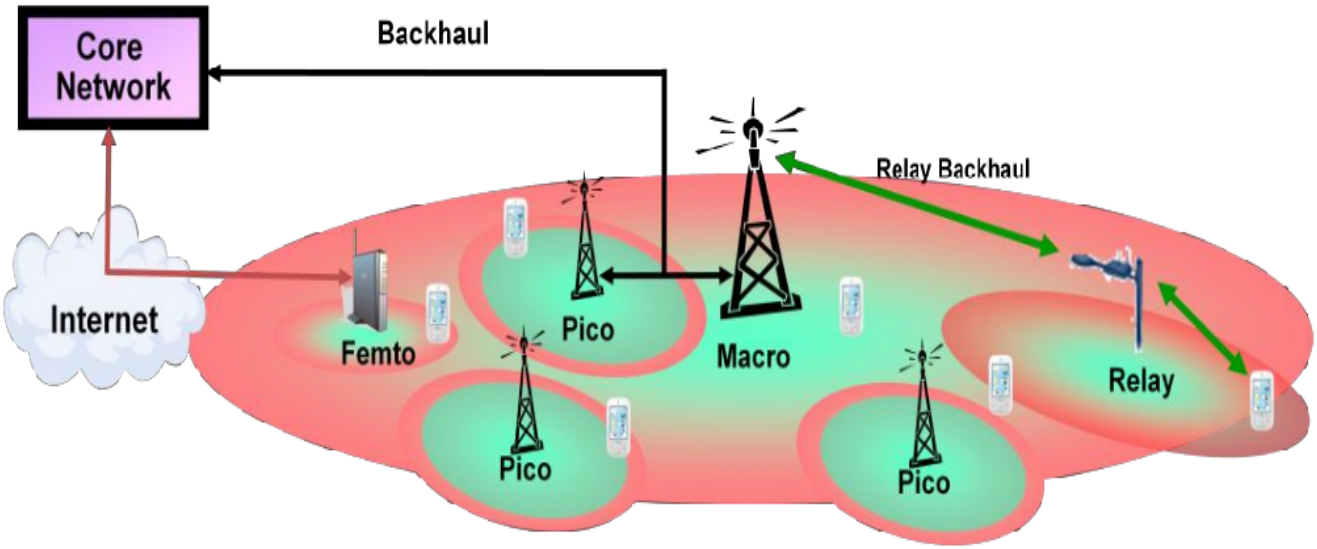



مقاله علمی-پژوهشی

# نرخ ارگادیک در شبکه‌های ناهمگن تصادفی مبتنی بر راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد

المیرا شهرکی*، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران، elmira.shahraki@pgs.usb.ac.ir
مهتاب میرمحسنی، دانشکده مهندسی الکترونیک و علوم کامپیوتر، دانشگاه ساری، انگلستان، mirmohseni@sharif.edu
هنگامه کشاورز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران، keshavarz@ece.usb.ac.ir
*نویسنده مسئول

**چکیده**

در راستای راه‌حل برای چالش‌های موجود در طراحی شبکه‌های نسل پنجم و پس‌از آن، فناوری و راهبردهای جدیدی برای شبکه‌های بی‌سیم ازجمله فناوری شبکه‌های ناهمگن و راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد برای بهبود کارایی طیف پیشنهاد شده است. در این مقاله، عملکرد کارایی طیف در شبکه‌های ناهمگن تصادفی مبتنی بر راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد بررسی می‌شود. یک شبکه ناهمگن چندسلولی با K لایه که راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد دو کاربره در تمامی لایه‌ها اعمال شده است، درنظرگرفته می‌شود. ایستگاه‌های پایه و کاربران مجهز به تک آنتن هستند. موقعیت ایستگاه‌های پایه و کاربران به‌طور تصادفی برطبق فرایندهای نقطه پواسون همگن توزیع می‌شوند. رویکردهای هندسه تصادفی برای محاسبه نرخ ارگادیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. اثرات فناوری‌های شبکه‌های ناهمگن و NOMA با استفاده از نتایج عددی نشان داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اعمال NOMA به یک شبکه ناهمگن عملکرد کارایی طیف را بهبود می‌بخشد. علاوه‌براین، درنظرگرفتن فناوری NOMA در تمامی لایه‌های شبکه ناهمگن باعث بهبود قابل‌توجهی در میزان نرخ ارگادیک می‌شود.

**کلمات کلیدی:** راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد، شبکه‌های ناهمگن، نرخ ارگادیک، هندسه تصادفی

# Ergodic Rate in Non-Orthogonal Multiple Access-Based Random Heterogeneous Networks

Elmira Shahraki *, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran., elmira.shahraki@pgs.usb.ac.ir
Mahtab Mirmohseni,Institute for Communication Systems, School of Computer Science and Electronic Engineering, mirmohseni@sharif.edu
Hengameh Keshavarz ,Department of Electrical and Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran., keshavarz@ece.usb.ac.ir
*Corresponding Author

**Abstract**

In response to the challenges for design of 5G and beyond, new technologies for wireless networks

have been proposed, including heterogeneous networks (HetNets) and non-orthogonal multiple access (NOMA) to enhance spectral efficiency. In this paper, the performance of spectral efficiency in random NOMA-enabled heterogeneous networks is analyzed. A K-tier multi-cell heterogeneous networks is considered, where the two-user NOMA technique is applied in all tiers. The base stations and users are equipped with a single-antenna. The locations of base stations and users are randomly distributed regarding homogeneous Poisson point processes (HPPPs). Stochastic geometry approaches are exploited to characterize the ergodic rate. The effects of HetNets and NOMA technologies are investigated using numerical results. The results reveal that applying NOMA to a HetNet improves the spectrum efficiency performance. Furthermore, considering NOMA technology in all tiers of the heterogeneous networks significantly improves the ergodic rate.

**Keywords:** Non-orthogonal multiple access (NOMA), Heterogeneous networks (HetNets), Ergodic rate, Stochastic geometry.

## ۱-مقدمه

یک شبکه ناهمگن (HetNet)[۱] از لایه‌های مختلفی از شبکه که در همان پهنای باند سیستم عمل می‌کند، تشکیل شده است. ایده اصلی شبکه ناهمگن برقراری لینک‌های کاربر-ایستگاه پایه[۲] (BS) نزدیک‌ترتوسط قرارگیری متراکم سلول‌های کوچک[۳] می‌باشد. درنتیجه با کاهش فاصله بین کاربران و ایستگاه‌پایه، مزایایی همچون کاهش مصرف توان، افزایش گذردهی[۴]، بهبود پوشش و ظرفیت شبکه را به‌ارمغان می‌آورد. همچنین با افزایش استفاده مجدد از کانال و با انتقال به سمت سلول‌های کوچک نیز کارایی طیف را بهبود می‌بخشد [۱،۲]. راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد (NOMA)[۵] منابع زمانی و فرکانسی یکسان را به کاربران مختلف به‌جای استفاده از طیف متعامد اختصاص می‌دهد. در این راهبرد از تفاوت بهره کانال بین کاربران برای دستیابی به کارایی طیف بیش‌تر استفاده می‌شود. بنابراین، بهبود قابل توجهی در کارایی طیف را می‌توان توسط NOMA به‌دست آورد. ایده اصلی راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد استفاده از فناوری کدگذاری برهم‌نهی (SC)[۶] در فرستنده و حذف تداخل متوالی (SIC)[۷] در گیرنده است. به‌ویژه، راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد در حوزه توان با برهم‌نهی چندین کاربر در حوزه توان، کارایی طیفی را بهبود می‌بخشد [۳]. اعمال راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد به فناوری شبکه ناهمگن خود دارای چندین مشکل می‌باشد که ازجمله می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد. راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد، تداخل اضافی از سیگنال برهم‌نهی‌شده از ایستگاه پایه متصل ایجاد می‌کند. همچنین در سیاست اتصال کاربر می‌بایست اثرات اشتراک توان کاربران راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد را درنظر گرفت. ازاین‌رو، نمایش تعاملات بین راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد و شبکه‌های ناهمگن به‌عنوان دو فناوری کلیدی برای شبکه‌های نسل پنجم و پس‌ازآن مساله‌ای حائز اهمیت است که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود.

### ۱-۱-پژوهش‌های پیشین

نویسندگان در [۴] ساختار ارسال جدید به‌همراه راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد در سلول‌های کوچک و روش چندورودی-چندخروجی انبوه (mMIMO)[۸] در سلول‌های بزرگ در شبکه‌های ناهمگن را مطرح کرده‌اند. در ساختار سلول‌های کوچک به‌همراه راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد بافرض اینکه عملیات SIC همیشه در کاربر نزدیک انجام می‌شود، دو سناریو کاربر نزدیک و دور درنظرگرفته شده است که در سناریو کاربر نزدیک، کاربر جدید در فاصله کم‌تری نسبت به کاربر متصل قرار می‌گیرد و در سناریو کاربر دور، کاربر جدید در فاصله بیش‌تری نسبت به کاربر متصل قرار می‌گیرد. برای ارزیابی عملکرد ساختار پیشنهادی عبارت فرم‌بسته‌ای برای احتمال پوشش سلول‌های کوچک به‌همراه راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد به‌دست آمده است. سپس کارایی طیف کل شبکه توسط عبارت دقیقی برای سلول‌های کوچک به‌همراه راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد و باند پایینی برای سلول‌های بزرگ به‌همراه MIMO انبوه مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی گذردهی و پوشش فروسو در شبکه‌های ناهمگن با راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد غیرمشارکتی و روش ارسال توام راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد مشارکتی مطرح‌شده در [۵] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. عبارات دقیقی برای راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد غیرمشارکتی به‌دست آمده است. راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد مشارکتی مطرح شده است که در آن ایستگاه‌های پایه خالی بدون کاربر برای ارسال توام دورترین کاربر در یک سلول مشارکت می‌کنند. همچنین تخصیص بهینه توان بین K کاربر NOMA برای دو روش راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد غیرمشارکتی و مشارکتی با هدف ماکزیمم‌کردن پوشش و گذردهی سلول هر ایستگاه‌پایه مورد بررسی قرار گرفته است.

نویسندگان در [۶] روش تخصیص منابع جدیدی برای شبکه‌های ناهمگن به‌همراه راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد مطرح کرده‌اند که ایستگاه‌های پایه‌ی سلول‌های کوچک، برقراری ارتباط با چندین کاربر در این سلول‌ها را ازطریق NOMA انجام می‌دهند. باهدف ماکزیمم‌کردن نرخ مجموع کاربران، درحالی‌که عدالت نیز درنظرگرفته می‌شود، مساله توام تخصیص طیف فرکانسی به‌صورت یک بازی تطبیقی چند به یک با سایز بازیکن‌ها[۹] فرموله شده است. علاوه‌براین، جنبه‌ی اکتشاف[۱۰] به بازی تطبیقی برای بهبود بیش‌تر نرخ مجموع کاربران اعمال شده است.

احتمال پوشش شبکه‌های ناهمگن چندلایه با به‌کارگیری هماهنگی در تداخل برای دسترسی چندگانه نامتعامد در [۷] تحلیل شده است. دو روش هماهنگی در تداخل استفاده مجدد فرکانس جزئی سخت[۱۱] و استفاده مجدد فرکانس نرم مورد بررسی قرار گرفته است. عبارت فرم‌بسته‌ای برای کارایی طیف مبتنی بر احتمال پوشش در راستای ارزیابی عملکرد منصفانه بین روش‌های متفاوت استفاده مجدد فرکانس جزئی نیز به‌دست آمده است. تحلیل در هر دو حالت شبکه‌های دسترسی باز با سلول‌های میکرو و پیکو که کاربر به هر ایستگاه پایه با بالاترین میانگین توان

دریافتی متصل می‌شود، و شبکه‌های دسترسی بسته با سلول‌های فمتو، که کاربر به یک ایستگاه پایه ازپیش تعیین‌شده متصل می‌شود، انجام شده است.

عملکرد راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد در شبکه ناهمگن دو لایه با پیاده‌سازی به‌صورت غیریکنواخت در [۸] بررسی و مطالعه شده است. کاربران به ایستگاه پایه براساس ماکزیمم میانگین توان دریافتی متصل گردیده‌اند و سپس در چندین گروه NOMA براساس شیوه‌ی اتصال جفت شده‌اند. توزیع مشخصات آماری برای فواصل کاربران NOMA مختلف از ایستگاه‌های پایه متصل به آن‌ها بررسی شده است. برمبنای روش جفت‌شدن کاربر NOMA پیشنهادی، عبارات ریاضی برای احتمال پوشش و نرخ قابل دستیابی برای یک گروه NOMA دوکاربره محاسبه شده است.

نویسندگان در [۹] یک مدل ریاضی برای یک شبکه ناهمگن بهبودیافته با لایه ماکرو و فمتو پیشنهاد کرده‌اند. لایه فمتو مجهز به راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد و حس‌کردن حامل برای ارسال است که حس‌کردن حامل توسط یک فرایند نقاط دافع (RPP)[۱۲] مدل شده است. برای بالانس بار در شبکه‌ی ناهمگن، کاربران ماکرو از لایه‌ی مربوطه به لایه‌ی فمتو انتقال داده می‌شوند و سپس لایه‌ی فمتو کاربر انتقال داده‌شده را با یک کاربر جفت‌شده مناسب برای انجام راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد جفت می‌کند. این انتقال کاربر براساس ماکزیمم میانگین توان دریافتی بایاس‌شده انجام می‌گیرد.

بررسی ظرفیت شبکه‌های ناهمگن بی‌سیم با راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد مشارکتی در [۱۰] مطرح شده است. برای افزایش نرخ ارسال و دستیابی به بهره‌ی مشارکت، روش راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد مشارکتی از هردو دسترسی چندگانه نامتعامد و کدگذاری کاغذ لکه‌دار (DPC)[۱۳] استفاده می‌کند. روش پیش‌کدگذاری DPC برای حذف تداخل بین کاربری در سمت فرستنده مطرح شده است. سپس یک مساله بهینه‌سازی زمان‌بندی منبع[۱۴] فرموله شده است و مساله بهینه‌سازی موجود یک مساله غیرخطی ترکیبی عدد صحیح و مختلط می‌باشد.

مطالعات انجام‌گرفته تا به امروز در شبکه‌های با قرارگیری تصادفی تمامی گره‌های شبکه و مبتنی بر دو فناوری راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد و شبکه‌های ناهمگن، تکنولوژی NOMA را فقط در سلول‌های کوچک درنظرگرفته‌اند. علاوه‌براین، یک مطالعه کلی از دیدگاه کارایی طیف برای ارزیابی عملکرد دو فناوری NOMA و HetNet در راستای بررسی تعامل بین آنها مورد نیاز است. برخلاف [۴]، در این مقاله، ما نرخ ارگادیک را با دو تفاوت کلی بررسی می‌کنیم: نخست، فناوری NOMA در تمامی لایه‌های شبکه اعمال شده است که چالش برانگیزتر است. دوم، به‌دلیل قابل اعتماد نبودن کارایی طیف محاسبه‌شده بر اساس روش NOMA به‌کارگرفته‌شده در [۴]، در این مقاله روش NOMA متفاوتی مورد بررسی قرار داده می‌شود.

### ۲-۱-نوآوری

یک شبکه ناهمگن تصادفی مبتنی بر راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد (NOMA-Het) با استفاده از رویکردهای هندسه تصادفی درنظرمی‌گیریم و معیار مورد بررسی نرخ ارگادیک است. ساختار پیشنهادی یک شبکه ناهمگن چندسلولی با K لایه است که فناوری NOMA در همه لایه‌ها به‌کارگرفته می‌شود. ایستگاه‌های پایه و کاربران در تمامی لایه‌ها به‌صورت تک‌آنتنی هستند. کاربران یک روش NOMA دوکاربره متفاوت از کارهای موجود به‌کار می‌گیرند [۴]. موقعیت ایستگاه‌های پایه و کاربران به‌طورتصادفی می‌باشد. نوآوری انجام‌شده در این مقاله بشرح زیر است:

عبارات تحلیلی برای نرخ ارگادیک برای NOMA-Het را به‌دست می‌آوریم. برای این هدف، احتمال اتصال کاربر، تابع چگالی احتمال فاصله‌های کاربران، محاسبه نسبت سیگنال به نویز به‌علاوه تداخل با درنظرگرفتن ارسال NOMA و تابع مشخصه تداخل محاسبه می‌شوند. با چالش‌های پیچیدگی معادلات به‌دست‌آمده و سپس معادله نرخ ارگادیک از طریق محاسبات روبرو می‌شویم. عبارات نرخ ارگادیک به فرم انتگرال سه‌گانه هستند، درحالی‌که بازه انتگرال‌گیری در یکی از انتگرال‌ها محدود است. پیچیدگی محاسبات در این مقاله قابل مقایسه با کارهای موجود است و دستیابی به عبارات فرم‌بسته به‌دلیل پیچیدگی آن امری چالش برانگیز است. یکی از کارهای چالش برانگیز رسیدن به معادلات قابل‌محاسبه است. بنابراین، عبارات به‌دست‌آمده را تا بیشترین حد ممکن ساده می‌کنیم. سپس به‌صورت عددی نرخ ارگادیک به‌دست‌آمده را ارزیابی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی ارزیابی عددی را تایید می‌کند.

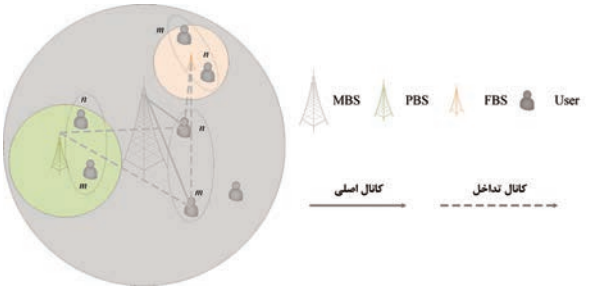
عملکرد NOMA-Het درنظرگرفته شده را توسط نتایج عددی و شبیه‌سازی ارزیابی می‌کنیم. برای مشاهده اثر فناوری‌های NOMA و شبکه‌های ناهمگن، نرخ ارگادیک به‌دست‌آمده با نرخ‌های ارگادیک در شبکه ناهمگن [۱۱] و شبکه ناهمگن مبتنی بر NOMA [۴] مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که NOMA در مقایسه با راهبرد دسترسی چندگانه متعامد (OMA)[۱۵] عملکرد کارایی طیف را بهبود می‌بخشد. علاوه‌براین، در یک شبکه دولایه، نرخ ارگادیک با افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه در لایه دوم بهبود می‌یابد. همچنین اعمال NOMA در تمامی لایه‌های شبکه ناهمگن، باعث بهبود عملکرد کارایی طیف در مقایسه با اعمال NOMA فقط در سلول‌های کوچک مطابق با [۴] می‌شود. ازطرفی مشاهده می‌شود که نرخ ارگادیک قابل اعتمادی به‌دلیل درنظرگرفتن روش NOMA متفاوت در این مقاله به‌دست می‌آید.

ادامه مقاله به شرح زیر می‌باشد. در بخش ۲، شبکه ناهمگن تصادفی مبتنی بر NOMA توضیح داده می‌شود. در بخش ۳، عبارات تحلیلی جدیدی برای نرخ ارگادیک در سیستم پیشنهادی به‌دست می‌آید. نتایج عددی در بخش ۴، ارائه شده است و بدنبال آن نتیجه‌گیری در ۵ بیان می‌شود.

## ۲- مدل سیستم

یک شبکه ناهمگن چندسلولی با K لایه (شبکه ناهمگن با K لایه به یک شبکه ناهمگن متشکل از K لایه از ایستگاه‌های پایه اشاره دارد.) که در لایه نخست سلول‌های بزرگ و در سایر لایه‌ها سلول‌های کوچک درنظرگرفته می‌شود. براساس هندسه تصادفی، کاربران و ایستگاه‌های پایه به‌طور تصادفی بر طبق یک فرایند نقطه پواسون همگن (HPPPs)[۱۶] توزیع می‌شوند. فرایند نقطه پواسون همگن یک فرایند پواسون با پارامتر پواسون ثابت است که میانگین چگالی نقاط را در یک محدوده مشخص از فضا توصیف می‌کند. در این مقاله یک روش NOMA دوکاربره که عملی‌تر است و بدون پیچیدگی زیاد، بهبود کارایی طیف را درپی دارد، به‌کار گرفته می‌شود. موقعیت ایستگاه‌های پایه در لایه j ام و کاربران برطبق HPPP بترتیب به‌صورت $\{\Phi_{bj}\}_{j=1,\dots,K}$ با چگالی $\lambda_j$ و $\Phi_u$ با چگالی $\lambda_u$ مدل می‌شود. کاربران و ایستگاه‌های پایه با

یک آنتن تکی مجهز هستند. در این سیستم فرض می‌شود که اطلاعات حالت کانال (CSI)[۱۷] کاربران در ایستگاه‌های پایه معلوم است. اگر CSI کاربران در ایستگاه پایه نامعلوم باشد، احتمال خاموشی[۱۸] بالا، مصرف پهنای باند و کاهش کارایی طیف وجود دارد. سیستم مدل پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده می‌شود.




**شکل ۱: نمایش مدل سیستم پیشنهادی (کانال اصلی به کانال سیگنال اصلی بین کاربر و ایستگاه پایه‌ای که سرویس می‌دهد اشاره دارد و کانال تداخل اشاره به کانال سیگنال‌های تداخل دریافتی در کاربر از ایستگاه‌های پایه دیگر به‌جز ایستگاه پایه‌ای که سرویس می‌دهد، دارد.)**

## ۲-۱-مدل سیگنال

هر ایستگاه پایه با یک مجموعه‌ای از کاربران ارتباط برقرار می‌کند. مجموعه تمامی کاربران در qامین ایستگاه پایه در لایه kام، $BS_{k,q}$، به‌صورت $\mathcal{N}_{k,q}=\{1,2,\ldots,n_{k,q}\}$ تعریف می‌شود که $n_{k,q}$ یک متغیر تصادفی است. بدون از دست دادن عمومیت، $BS_{k,q}$ برای ایجاد یک روش NOMA دوکاربره با جفت‌شدن تصادفی درهر زیرمجموعه، $\mathcal{N}_{k,q}$ را به $n_{k,q}/2$ زیرمجموعه تقسیم می‌کند. یکی از زیرمجموعه‌ها شامل کاربر m و n را درنظر می‌گیریم. فرض می‌شود که کاربر m نسبت به کاربر n از $BS_{k,q}$ دورتر است. با به‌کارگیری روش NOMA، $BS_{k,q}$ ، سیگنال زیر را ارسال می‌کند:

$$s_{k,q}=\sqrt{a_{m_{k,q}}P_k}\,s_{m_{k,q}}+\sqrt{a_{n_{k,q}}P_k}\,s_{n_{k,q}} \qquad (۱)$$

که $s_{mk,q}$ و $s_{nk,q}$ بترتیب پیام‌های ارسالی برای کاربر m و n هستند. $P_k$ توان ارسالی از $BS_{k,q}$ است. ($a_{nk,q}$ $a_{mk,q}$) ضرایب تخصیص توان برای کاربران m و n هستند، درحالی که $a_{mk,q}\geq a_{nk,q}$ و $a_{nk,q}+a_{mk,q}=1$. سیگنال‌های دریافتی در کاربر m و n طبق [۱۲، رابطه ۱] به‌صورت زیر هستند:

$$y_{i_{k,q}}=h_{i_{k,q}}\left(\sqrt{a_{m_{k,q}}P_k}\,s_{m_{k,q}}+\sqrt{a_{n_{k,q}}P_k}\,s_{n_{k,q}}\right)+z_{i_{k,q}} \qquad (۲)$$
$$+\sum_{j=1}^{K}\sum_{l\in\Phi_{b_j}\setminus\{BS_{k,q}\}}h_{i_{j,l}}\left(\sqrt{a_{m_{j,l}}P_j}\,s_{m_{j,l}}+\sqrt{a_{n_{j,l}}P_j}\,s_{n_{j,l}}\right),$$

که $i\in\{n,m\}$ است. در بخش نخست عبارت، $h_{i_{k,q}}=\sqrt{g_{i_{k,q}}}(R_{i_{k,q}})^{\frac{-\alpha_k}{2}}$ ضریب کانال بین $BS_{k,q}$ و کاربر $i$ام در $\mathcal{N}_{k,q}$ است؛ $g_{ik,q}\sim\exp(1)$ بهره توان کانال ارسال محوشدگی در مقیاس کوچک را با توزیع نمایی نشان می‌دهد، $R_{ik,q}$ نشان‌دهنده فاصله بین کاربر $i$ام و $BS_{k,q}$ و $\alpha_k$ توان تلفات مسیر لایه $k$ام است. در بخش دوم عبارت، $z_{ik,q}$ نویز گوسی سفید جمع‌شونده (AWGN)[۱۹] با میانگین صفر و واریانس $\sigma^2$، $z_{i_{k,q}}\sim\mathcal{N}(0,\sigma^2)$ است. در بخش سوم عبارت، $h_{i_{j,l}}=\sqrt{g_{i_{j,l}}}(R_{i_{j,l}})^{\frac{-\alpha_j}{2}}$ ضریب کانال بین $BS_{j,l}$ام (امین BS در لایه $j$) و کاربر $i$ام در $\mathcal{N}_{k,q}$ است که $g_{ik,q}\sim\exp(1)$ بهره کانال محوشدگی در مقیاس کوچک با توزیع نمایی می‌باشد؛ $R_{ij,l}$ فاصله بین کاربر $i$ام و $BS_{j,l}$ را نشان می‌دهد. در فرمول (۲) توجه داشته باشید که اندازه $hi$ ($|hi|$) توزیع رایلی با پارامتر مقیاس $\sqrt{\left(R_i^{\frac{-\alpha}{2}}\right)/2}$ را دنبال می‌کند که به‌صورت $\mathcal{R}\left(\sqrt{\left(R_i^{\frac{-\alpha}{2}}\right)/2}\right)$ نشان داده می‌شود. درحالی‌که $hi$ توزیع متقارن دایروی مختلط گوسی (CSCG)[۲۰] را با میانگین صفر و کواریانس $R_i^{\frac{-\alpha}{2}}$ دنبال می‌کند که به‌صورت $\mathcal{CN}\left(0,R_i^{\frac{-\alpha}{2}}\right)$ نشان داده می‌شود.

## ۲-۲-احتمال اتصال کاربر و توزیع فاصله

فرایند اتصال کاربر در شبکه ناهمگن، اشاره به اتصال یک کاربر معمولی[۲۱] به ایستگاه پایه در لایه kام از شبکه دارد. در این مطالعه، اتصال کاربر براساس حداکثر توان دریافتی بایاس شده (BRP)[۲۲] می‌باشد. اتصال بایاس‌شده برای ایجاد تعادل بار بین هر لایه از شبکه‌های ناهمگن است. در این مقاله، یک کاربر به قوی‌ترین ایستگاه پایه از نظر معیار بیشترین توان دریافتی بایاس شده میانگین بلندمدت در کاربر متصل می‌شود [۱۳]. برای کاربر iام در لایه k، به‌عنوان کاربر متصل، میانگین توان دریافتی بایاس شده (BRP) به‌صورت زیر است:

$$P_{r_{k,q}}=a_{i_{k,q}}P_kB_kR_{i_{k,q}}^{-\alpha_k}, \qquad (۳)$$

که $B_k$ یک فاکتور بایاس مثبت از لایه $k$ است (فاکتور بایاس برای تمامی BSها در لایه $k$ یکسان است). مادامی که فاکتور بایاس مقدار ۱ را به‌خود می‌گیرد، به معنی اتصال بایاس نشده است و کاربر به ایستگاه پایه‌ای که بیشترین میانگین توان را پیشنهاد می‌دهد، متصل می‌شود. $Ri_{k,q}$ فاصله بین یک کاربر معمولی و $BS_{k,q}$ را نشان می‌دهد.

باتوجه به فرایند اتصال کاربر در شبکه ناهمگن با توجه به معیار بیان شده در رابطه (۳)، احتمال اتصال یک کاربر معمولی با ایستگاه‌های پایه شبکه ناهمگن مبتنی بر NOMA در لایه $k$ برطبق [۱۱، لم ۱] به‌صورت زیر است:

$$A_k=2\pi\lambda_k\int_0^{\infty}r\exp\left\{-\pi\sum_{j=1}^{K}\lambda_j\left(\hat{P}_j\hat{B}_j\right)^{2/\alpha_j}r^{2/\hat{\alpha}_j}\right\}dr, \qquad (۴)$$

که $\hat{P}_j=Pj/Pk$ و $\hat{B}_j=Bj/Bk$ و $\hat{\alpha}_j=\alpha j/\alpha k$ نسبت‌های لایه jام متداخل به لایه kام که سرویس می‌دهد، هستند.

فاصله بین کاربر معمولی و ایستگاه پایه‌ای که در لایه $k$ام سرویس می‌دهد، $R_u$ است. $R_u=\underset{k\in\{1,2,\ldots,K\}}{\arg\max}\,(P_{r_{k,q}})$ یک متغیر تصادفی است که توسط تابع چگالی احتمال (PDF)[۲۳] توصیف می‌شود. بادرنظرگرفتن [۱۱، لم ۳]، تابع چگالی احتمال فاصله بین یک کاربر معمولی و BSای که سرویس می‌دهد، به‌صورت زیر است:

$$f_{R_u}(r)=\frac{2\pi\lambda_k}{A_k}r\exp\left\{-\pi\sum_{j=1}^{K}\lambda_j\left(\hat{P}_j\hat{B}_j\right)^{2/\alpha_j}r^{2/\hat{\alpha}_j}\right\}. \qquad (۵)$$

## ۲-۳-ارسال NOMA

روش به‌کارگرفته شده NOMA در این مطالعه متفاوت از [۴] بوده و در ادامه به‌طور مفصل توضیح داده می‌شود. در این مقاله یک روش NOMA دوکاربره فرض می‌شود که نخستین کاربر به ایستگاه پایه در نوبت قبلی از فرایند اتصال کاربر متصل می‌شود و کاربر دوم همچنین به همان ایستگاه پایه متصل می‌شود. فاصله بین کاربر نخست و ایستگاه پایه را برخلاف [۴]، به‌عنوان

یک متغیر تصادفی Ra درنظر می‌گیریم. همچنین فاصله بین کاربر دوم و ایستگاه پایه متصل نیز یک متغیر تصادفی Rs است. فواصل Ra و $R_s$ توزیع $f_{Ru}(r)$ در (۵) را با درنظرگرفتن $u \in \{a, s\}$ ، دنبال می‌کنند. به‌دلیل نامعلوم‌بودن اینکه کاربر دوم نسبت به کاربر نخست دورتر یا نزدیک‌تر باشد، دو حالت درنظرگرفته شود. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده می‌شود، در حالت I، کاربر m کاربر متصل است و کاربر n کاربر دومی می‌باشد که نزدیک‌تر به $BS_{k,q}$ است (Rs ≤ Ra). در حالت II، کاربر n کاربر متصل است و کاربر m کاربر دومی می‌باشد که دورتر از $BS_{k,q}$ است (Rs > Ra). بنابراین، کاربر m همیشه کاربر دور و کاربر n همیشه کاربر نزدیک است. کاربر نزدیک پیام‌های هردو کاربرهای mام و nام را رمزگشایی می‌کند و SIC را انجام می‌دهد، درحالی‌که کاربر دور فقط پیام خودش را رمزگشایی می‌کند.

بنابراین، SINR زیر برای کاربر m با جایگذاری در (۲) به‌دست می‌آید:

$$\gamma_{m,m_{k,q}} = \frac{a_{m_{k,q}} P_k g_{m_{k,q}} R_{m_{k,q}}^{-\alpha_k}}{a_{n_{k,q}} P_k g_{m_{k,q}} R_{m_{k,q}}^{-\alpha_k} + I_{m_{k,q}} + \sigma^2}, \quad (۶)$$

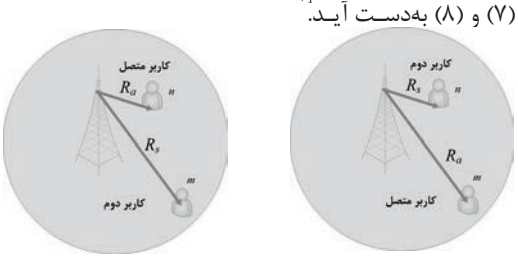
که $I_{m_{k,q}} = \sum_{j=1}^{K} \sum_{l \in \Phi_{b_j} \setminus \{BS_{k,q}\}} P_j g_{m_{j,l}} R_{m_{j,l}}^{-\alpha_j}$ تداخل در کاربر $m$ از ایستگاه‌های پایه در تمامی سلول‌های بزرگ و کوچک به‌جز ایستگاه پایه‌ای که سرویس می‌دهد، است. باجایگذاری در (۲)، SINR در کاربر $n$ام که پیام کاربر $m$ را رمزگشایی می‌کند، به‌صورت زیر است:

$$\gamma_{n,m_{k,q}} = \frac{a_{m_{k,q}} P_k g_{n_{k,q}} R_{n_{k,q}}^{-\alpha_k}}{a_{n_{k,q}} P_k g_{n_{k,q}} R_{n_{k,q}}^{-\alpha_k} + I_{n_{k,q}} + \sigma^2}, \quad (۷)$$

که $I_{n_{k,q}} = \sum_{j=1}^{K} \sum_{l \in \Phi_{b_j} \setminus \{BS_{k,q}\}} P_j g_{n_{j,l}} R_{n_{j,l}}^{-\alpha_j}$ تداخل در کاربر $n$ از ایستگاه‌های پایه در تمامی سلول‌های بزرگ و کوچک به‌جز ایستگاه پایه‌ای که سرویس می‌دهد، است. SINR در کاربر $n$ برای رمزگشایی پیام خودش (بعد از SIC) با جایگذاری $\{i \in n\}$ در (۲) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{n,n_{k,q}} = \frac{a_{n_{k,q}} P_k g_{n_{k,q}} R_{n_{k,q}}^{-\alpha_k}}{I_{n_{k,q}} + \sigma^2}, \quad (۸)$$

SINR در کاربرها برای حالت I و حالت II می‌تواند به‌ترتیب با جایگذاری $\{R_{m_{k,q}} = R_a, R_{nk,q} = R_s\}$ و $\{R_{mk,q} = R_s, R_{nk,q} = R_a\}$ در (۶)، (۷) و (۸) به‌دست آید.




(الف) حالت I (ب) حالت II

شکل ۲: حالت‌های سناریو NOMA

## ۲-۴-تابع مشخصه تداخل

برای دستیابی به نرخ ارگادیک در بخش ۳ نیاز به محاسبه تابع مشخصه تداخل می‌باشد. تابع مشخصه تداخل از ایستگاه‌های پایه در تمامی سلول‌های بزرگ و کوچک در کاربر $i$ با استفاده از [۴، لم ۲]، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{I_{i_{k,q}}}(s) = E\left[e^{-sI_{i_{k,q}}}\right] = \exp\left\{-\sum_{j=1}^{K} 2\pi\lambda_j \frac{sP_j\left(y_j(r_u)\right)^{2-\alpha_j}}{\alpha_j - 2} \times {}_2F_1\left(1, 1-\frac{2}{\alpha_j}; 2-\frac{2}{\alpha_j}; -\frac{sP_j}{\left(y_j(r_u)\right)^{\alpha_j}}\right)\right\}, \quad (۹)$$

که $i \in \{m, n\}$ و $u \in \{a, s\}$، ${}_2F_1(.,.;.;.)$ تابع فوق‌هندسی گوسی[۲۴] را نشان می‌دهد [۱۴]. فاصله بین کاربر $i$ و نزدیک‌ترین متداخل‌گر در لایه $y_j(r_u) = (\bar{P}_j \bar{B}_j)^{1/\alpha_j}(r_u)^{1/\alpha}$ است.

## ۳- کارایی طیف

در این بخش، در راستای بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی NOMA-Het عبارات تحلیلی برای نرخ ارگادیک به‌دست آورده می‌شود. نرخ ارگادیک میانگین نرخ داده قابل دستیابی است که می‌تواند از طریق کانال ارسال شود. در این مقاله، معیار نرخ ارگادیک در یک شبکه ناهمگن تصادفی چندسلولی با K لایه که روش NOMA دوکاربرهای متفاوت از کارهای موجود در همه لایه‌ها به‌کارگرفته شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ازاین‌رو، نخست در بررسی نرخ ارگادیک برای NOMA-Het، هر لایه از سیستم پیشنهادی را مطالعه می‌کنیم. نرخ‌های ارگادیک کاربران در لایه kام در لم ۱ به‌دست می‌آید و اثبات آن در پیوست آ می‌باشد.

**لم ۱.** براساس موقعیت کاربران NOMA، نرخ ارگادیک درزیر نمایش داده می‌شود.

**حالت I**: نرخ‌های ارگادیک از کاربر متصل (کاربر $m$) و کاربر دوم (کاربر $n$) در لایه $k$ام بترتیب در (۱۰) و (۱۱) به‌دست می‌آید.

$$\Re_{m,k}^{1} = \frac{1}{\ln 2}\int_0^{\infty}\int_0^{r_a}\int_0^{\frac{a_{m_{k,q}}}{a_{n_{k,q}}}} \frac{1}{1+t}\exp\left\{-\frac{t\sigma^2\left(r_a^{\alpha_k}+r_s^{\alpha_k}\right)}{\left(a_{m_{k,q}} - t a_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\} L_{I_m}\left\{\frac{t r_a^{\alpha_k}}{\left(a_{m_{k,q}} - t a_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\} L_{I_n}\left\{\frac{t r_s^{\alpha_k}}{\left(a_{m_{k,q}} - t a_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\} f_{R_s}(r_s) f_{R_a}(r_a)\, dt\, dr_s\, dr_a, \quad (۱۰)$$

$$\Re_{n,k}^{1} = \frac{1}{\ln 2}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty} \frac{1}{1+t}\exp\left\{-\frac{t\sigma^2 r_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}} P_k}\right\} L_{I_n}\left\{\frac{t r_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}} P_k}\right\} \left(1 - F_{R_a}(r_s)\right) f_{R_s}(r_s)\, dt\, dr_s, \quad (۱۱)$$

**حالت II**: نرخ‌های ارگادیک از کاربر متصل (کاربر $n$) و کاربر دوم (کاربر $m$) در لایه $k$ام بترتیب در (۱۲) و (۱۳) به‌دست می‌آید.

$$\Re_{n,k}^{\mathrm{II}} = \frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{1}{1+t}\exp\left\{-\frac{t\sigma^2 r_a^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\}L_{I_n}\left\{\frac{t r_a^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\} \left(1-F_{R_s}(r_a)\right) f_{R_s}(r_a)\,dt\,dr_a, \quad (۱۲)$$

$$\Re_{m,k}^{\mathrm{II}} = \frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\int_{r_a}^\infty\int_0^{\frac{a_{m_{k,q}}}{a_{n_{k,q}}}} \frac{1}{1+t}\exp\left\{-\frac{t\sigma^2\left(r_a^{\alpha_k}+r_s^{\alpha_k}\right)}{\left(a_{m_{k,q}}-t a_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\} L_{I_m}\left\{\frac{t r_s^{\alpha_k}}{\left(a_{m_{k,q}}-t a_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\} L_{I_n}\left\{\frac{t r_a^{\alpha_k}}{\left(a_{m_{k,q}}-t a_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\} f_{R_s}(r_s) f_{R_a}(r_a)\,dt\,dr_s\,dr_a. \quad (۱۳)$$

**نکته ۱.** بادرنظرگرفتن رفتار افزایشی توزیع $f_{R_u}(r)$ با افزایش تراکم ایستگاه‌های پایه در لایه $k$ام ($\lambda_k$) در لم ۱، نرخ ارگادیک در لایه $k$ام افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش توان ارسالی در لایه $k$ام ($P_k$) که موجب افزایش در عبارت نمایی و تابع مشخصه تداخل می‌شود، نرخ ارگادیک در لایه $k$ام افزایش می‌یابد.

پس از مطالعه هر لایه در NOMA-Het، نرخ ارگادیک برای مدل سیستم پیشنهادی در قضیه ۱ محاسبه شده است.

**قضیه ۱.** نرخ ارگادیک برای Het-NOMA به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Re = \sum_{k=1}^{K} A_k\left(\Re_k^{\mathrm{I}} + \Re_k^{\mathrm{II}}\right), \quad (۱۴)$$

که $\Re_k^{I}$ و $\Re_k^{II}$ بترتیب نشان‌دهنده‌ی نرخ‌های ارگادیک در لایه $k$ ام برای حالت I و حالت II هستند و در روابط (۱۰)-(۱۳) به‌دست آمده‌اند. $Ak$ نیز در رابطه (۴) به‌دست آمده است.

## ۴- نتایج عددی

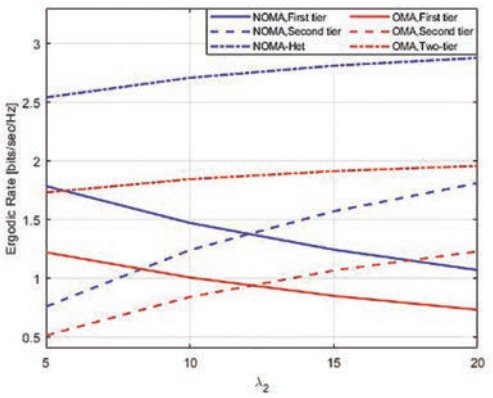
در این بخش به ارزیابی نتایج تحلیلی به‌دست‌آمده برای نرخ ارگادیک در سیستم پیشنهادی Het-NOMA در رابطه (۱۴) به‌صورت عددی پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی مونت‌کارلو نیز در این مطالعه برای تایید نتایج تحلیلی مورد استفاده انجام می‌شود. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ادامه ارائه شده است. ناحیه شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک دایره با شعاع ۱۰۴ متر است. همان‌طورکه در جدول مشاهده می‌شود، ضرایب اشتراک توان NOMA برای تمامی لایه‌ها یکسان است ($(a_{m_{k,q}}, a_{n_{k,q}})=(a_m, a_n)$). توجه داشته باشید که برای هر $am$، نرخ ارگادیک را مشخص می‌کنیم. برای شبیه‌سازی‌ها $1 - am < 0.5$ را برای کاهش احتمال ناتوانی SIC و دستیابی به نرخ‌های ارگادیک بالاتر، انتخاب می‌کنیم.

در شکل (۳)، رفتار نرخ ارگادیک برای Het-NOMA دو لایه بر حسب $\lambda_2$ برای هر دو روش NOMA و OMA نمایش داده می‌شود.

**جدول ۱: جدول پارامترها**

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| تعداد تکرارها | $10^6$ |
| توان نویز | $\sigma^2$=-90 dBm |
| توان ارسالی BS | $P_2$=30 dBm, $P_1$=40 dBm |
| توان تلفات مسیر | $\alpha_2$=4, $\alpha_1$=3.5 |
| چگالی ایستگاه‌های پایه لایه اول | $\lambda_1=1/\pi 500^2=1.2732\times10^{-6}$ |
| ضرایب اشتراک توان NOMA | (0.6,0.4) |

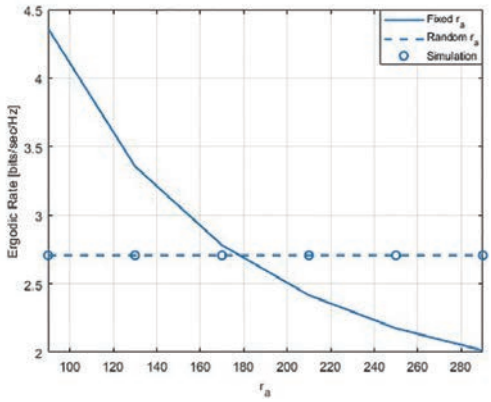
روش OMA با تقسیم دو کاربر در بازه‌های زمان/فرکانس یکسان در این مطالعه به‌کارگرفته می‌شود. برخلاف آنالیزهای قبلی و نتایج موجود در [۴]، فاصله کاربر نخست ($ra$) در اینجا ثابت نیست و نرخ ارگادیک براین اساس محاسبه می‌شود. نشان داده می‌شود که NOMA به‌طورقابل توجهی نسبت به OMA عملکرد بهتری دارد. عملکرد NOMA به‌طورقابل‌توجهی بهتر از سیستم‌های OMA در شبکه‌های با چگالی بالاتری از BSها است که این فرض باعث تداخل بیشتری می‌شود. علاوه‌براین، نشان داده می‌شود که نرخ ارگادیک کل شبکه با افزایش $\lambda_2$ به‌دلیل افزایش نرخ ارگادیک لایه دوم، بهبود می‌یابد.



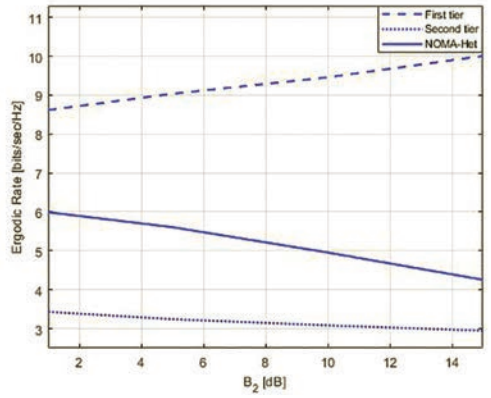

**شکل ۳: نرخ ارگادیک بر حسب چگالی ایستگاه‌های پایه در لایه دوم ($K=2, B_1=B_2=1$)**

تصادفی‌بودن فاصله کاربر نخست که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، به‌عنوان جنبه‌ی نوآوری در این مقاله برخلاف [۴] است. با خط‌چین نشان داده می‌شود که نرخ ارگادیک به مقدار $r_a$ با موقعیت کاربر نخست ثابت، بسیار وابسته است (همانند [۴]). همچنین نرخ ارگادیک بر روی موقعیت‌های کاربر نخست، با خط ثابت نشان داده می‌شود. در واقع، برای یک $r_a$ ثابت، مقدار نرخ ارگادیک به‌دست‌آمده نمی‌تواند به‌عنوان یک معیار عملکرد سیستم قابل‌اعتماد درنظرگرفته شود. بنابراین، با درنظرگرفتن $r_a$ تصادفی، طراحی یک سیستمی که به‌طور موثر بر روی میانگین درطول تمام فاصله‌ها عمل کند، امکان‌پذیر می‌شود. منحنی‌های تحلیلی مطابقت دقیقی با نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌دست‌آمده دارد.

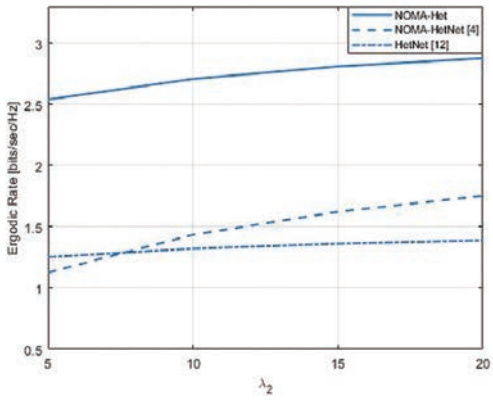
نرخ ارگادیک بر حسب B2 در شکل (۵) برای تمامی لایه‌های شبکه نشان داده می‌شود. همان‌طور که در [۱۱] مشاهده شد که با کارهای موجود قبلی مطابقت دارد، اتصال بایاس‌نشده همیشه از بایاس‌شده از نقطه‌نظر مطالعه نرخ در کل شبکه بهتر است.




**شکل ۴: نرخ ارگادیک بر حسب فاصله کاربر اول**
**($K=2$ ,$\lambda_2=10\lambda_1$ $B_1=B_2=1$)**




**شکل ۵: نرخ ارگادیک بر حسب فاکتور بایاس لایه دوم**
**($K=2$, $r_a=50$, $\lambda_2=10\lambda_1$, $B_1=1$ )**




**شکل ۶: نرخ ارگادیک بر حسب چگالی ایستگاه‌های پایه در لایه دوم**
***(K=2, B1=B2=1)***

مشاهده می‌شود که افزایش B2 باعث افزایش نرخ ارگادیک در لایه نخست می‌شود، در حالی‌که نرخ ارگادیک در لایه دوم کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که مادامیکه B2 افزایش می‌یابد، کاربران ماکرو بیشتر با SINR پایین به لایه دوم متصل می‌شوند. این افزایش اتصال کاربران ماکرو به لایه دوم، نرخ ارگادیک لایه مربوطه را کاهش می‌دهد اما این مقدار برای لایه نخست بهبود می‌یابد. با این‌حال، کاهش در نرخ ارگادیک لایه دوم با افزایش $\lambda_2$ جبران می‌شود. بنابراین، اتصال بایاس‌شده یک روش کارآمد در تعادل بار بین هر لایه از شبکه‌های ناهمگن است.

نرخ ارگادیک برای شبکه‌های ناهمگن در [۱۱] و باند پایین بر روی نرخ ارگادیک شبکه ناهمگن مبتنی بر NOMA در [۴]، در شکل (۶) برای مطالعه اثر NOMA فراهم می‌شود. MIMO انبوه در لایه نخست از مدل موجود در [۴] برای قابل‌مقایسه بودن با مدل پیشنهادی NOMA-Het حذف می‌شود. همان‌طورکه انتظار می‌رود، در نمودارهای مربوط به [۱۱]، [۴] و مدل پیشنهادی NO-MA-Het، افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه در لایه دوم نرخ‌های ارگادیک را افزایش می‌دهد (به‌ویژه در مقادیر پایین‌تر $\lambda_2$ها). شایان ذکر است که NOMA-Het پیشنهادی نسبت به [۱۱] و [۴] نرخ ارگادیک بالاتری را دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

کارایی طیف در یک شبکه ناهمگن تصادفی چند سلولی با $K$ لایه که راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد در تمام لایه‌ها اعمال شده است، مورد مطالعه قرار گرفته است. ایستگاه‌های پایه و کاربران به‌طور تصادفی در مدل سیستم درنظرگرفته‌شده توزیع می‌شوند. عبارات تحلیلی برای نرخ ارگادیک برای تمامی لایه‌های شبکه به‌دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که NOMA در مقایسه با OMA عملکرد کارایی طیف را بهبود می‌بخشد. همچنین اعمال NOMA در تمامی لایه‌های شبکه ناهمگن در مقایسه با درنظرگرفتن فقط در سلول‌های کوچک، نرخ ارگادیک را به میزان بیشتری افزایش می‌دهد. نرخ ارگادیک با افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه در لایه دوم در یک شبکه دو لایه افزایش می‌یابد در حالیکه چگالی ایستگاه‌های پایه در لایه نخست ثابت نگه داشته می‌شود.

## ۶-علائم و اختصارات

| | |
|---|---|
| $\{\Phi_{bj}\}_{j=1,\dots,K}$ | موقعیت ایستگاه‌های پایه در لایه $j$ برطبق HPPP |
| $\lambda_u$ و $\lambda_j$ | چگالی ایستگاه‌های پایه و کاربران |
| $\mathcal{N}_{k,q}=\{1,2,\dots,n_{k,q}\}$ | مجموع تمامی کاربران در $BS_{k,q}$ |
| $P_k$ | توان ارسالی از $BS_{k,q}$ |
| $a_{m_{k,q}}$ و $a_{nk,q}$ | ضرایب تخصیص توان برای کاربران $m$ و $n$ |
| $h_{ik,q}$ | ضریب کانال بین $BS_{k,q}$ و کاربر $i$ |
| $B_k$ | فاکتور بایاس لایه $k$ |
| $\alpha_k$ | توان تلفات مسیر لایه $k$ |
| $R_{i_{k,q}}$ | فاصله بین کاربر $i$ام و $BS_{k,q}$ |
| $A_k$ | احتمال اتصال کاربر به لایه $k$ |
| $f_{R_u}(r)$ | PDF فاصله بین کاربر و $BS_{k,q}$ |
| $L_{I_{ik,q}}$ | تابع مشخصه تداخل از ایستگاه‌های پایه در تمامی سلول‌های بزرگ و کوچک در کاربر $i$ |
| $\Re_k^{I}$ و $\Re_k^{II}$ | نرخ‌های ارگادیک در لایه $k$ برای حالت I و II |
| HetNet | شبکه ناهمگن |
| NOMA | راهبرد دسترسی چندگانه نامتعامد |
| Het-NOMA | سیستم پیشنهادی |
| BS | ایستگاه پایه |

| | |
|---|---|
| $K$ | تعداد لایه‌های شبکه ناهمگن |
| SIC | حذف تداخل متوالی |
| MIMO | چندورودی- چندخروجی |
| OMA | راهبرد دسترسی چندگانه متعامد |
| HPPP | فرایند نقطه پواسون همگن |
| CSI | اطلاعات حالت کانال |
| MBS | ایستگاه‌های پایه سلول بزرگ (لایه اول) |
| PBS | ایستگاه‌های پایه سلول‌های کوچک (لایه دوم) |
| FBS | ایستگاه‌های پایه سلول‌های کوچک (لایه سوم) |
| BRP | توان دریافتی بایاسشده |
| PDF | تابع چگالی احتمال |
| SINR | سیگنال به نویز به‌علاوه تداخل |

## پی‌نوشت‌ها

1 Heterogeneous network
2 Base Station
3 Small cell
4 Throughput
5 Non-orthogonal multiple access
6 Superposition Coding
7 Successive Interference Cancelation
8 Massive Multiple Input Multiple Output
9 Peer effects
10 Exploration
11 Strict
12 Repulsive Point Processes
13 Dirty Paper Coding
14 Resource scheduling optimization problem
15 Orthogonal multiple access
16 Homogeneous Poisson Point Processes
17 channel state information
18 Outage probability
19 Additive white Gaussian noise
20 Circularly Symmetric Complex Gaussian
21 typical user
22 Biased-Received-Power
23 Probability Density Function
24 Gauss hypergeometric function
25 Complete Cumulative Distribution Function

## مراجع


[1] N. Yang, L. Wang, G. Geraci, M. Elkashlan, J. Yuan, and M. Di Renzo, "Safeguarding 5G wireless communication networks using physical layer security," IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 4, pp. 27 – 20 , 2015.

[2] H. Ramazanali, A. Mesodiakaki, A. Vinel, and C. Verikoukis, "Survey of user association in 5G HetNets," in 2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), pp. 6 – 1 IEEE, 2016.

[3]M. Aldababsa, M. Toka, S. Gökçeli, G. K. Kurt, and O. Kucur, "A tutorial on nonorthogonal multiple access for 5G and beyond," Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2018.

[4]Y. Liu, Z. Qin, M. Elkashlan, A. Nallanathan, and J. A. McCann, "Non-orthogonal multiple access in large-scale heterogeneous networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 12, pp. ,2680 – 2667, 2017.

[5]C.-H. Liu and D.-C. Liang, "Heterogeneous networks with power-domain NOMA: coverage, throughput, and power allocation analysis," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 5, pp. ,3539 – 3524, 2018.

[6] J. Zhao, Y. Liu, K. K. Chai, A. Nallanathan, Y. Chen, and Z. Han, "Spectrum allocation and power control for non-orthogonal multiple access in HetNets," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 9, pp. ,5837 – 5825, 2017.

[7]C. Altay and M. Koca, "Stochastic geometry analysis of interference coordination in NOMA-based heterogeneous networks," arXiv preprint arXiv:180607410, 2018.

[8]T. Han, J. Gong, X. Liu, S. R. Islam, Q. Li, Z. Bai, and K. S. Kwak, "On downlink NOMA in heterogeneous networks with non-uniform small cell deployment," IEEE Access, vol. 6, pp. ,31109 – 31099, 2018.

[9]P. Swami, V. Bhatia, S. Vuppala, and T. Ratnarajah, "Offloading of users in NOMA-HetNet using repulsive point process," arXiv preprint arXiv:180511358, 2018.

[10] Y. Xu, H. Sun, R. Q. Hu, and Y. Qian, "Cooperative non-orthogonal multiple access in heterogeneous networks," in 2015 IEEE global communications conference (GLOBECOM), pp. ,6 – 1 IEEE, 2015.

[11] H.-S. Jo, Y. J. Sang, P. Xia, and J. G. Andrews, "Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: A comprehensive downlink SINR analysis," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 11, no. 10, pp. ,3495 – 3484, 2012.

[12] M. Forouzesh, P. Azmi, N. Mokari, K.-K. Wong, and H. Pishro Nik, "Robust physical layer security for power domain non orthogonal multiple access-based hetnets and hudns: Sic avoidance at eavesdroppers," *IEEE Access*, *vol*. 7, *pp*. ,107896 – 107879, 2019.

[13] *S. Wang*, *Y. Gao*, *C. Dong*, *N. Sha*, *and G. Zang*, "*Secure user association in two-tier heterogeneous cellular networks with in-band interference*," *Ieee Access*, *vol*. 6, *pp*. – 38607 ,38615, 2018.

[14] *A. Jeffrey and D. Zwillinger*, "*Table of integrals*, *series*, *and products*," 2007*A. Author* 1 *and B. Author* 2, *Title of the Book*. *John Wiley & Sons*, *pp*. 100-105, 2002.


## پیوست‌ها

آ اثبات لم ۱

نرخ ارگادیک کاربران NOMA درلایه $k$ام به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$
\begin{aligned}
R_{i,k} &= E_{(r_s,r_a)} E_{\gamma_{i_{k,q}}}\left[\log(1+\gamma_{i_{k,q}}(r_s,r_a))\right] \\
&= \int_0^\infty\int_0^\infty E_{\gamma_{i_{k,q}}}\left[\log(1+\gamma_{i_{k,q}}(r_s,r_a))\right] f_{R_s,R_a}(r_s,r_a)dr_s dr_a \\
&= \int_0^\infty\int_0^{r_a} E_{\gamma^{\mathrm{I}}_{i_{k,q}}}\left[\log(1+\gamma^{\mathrm{I}}_{i_{k,q}}(r_s,r_a))\right] f_{R_s}(r_s\mid r_a) f_{R_a}(r_a)dr_s dr_a \\
&+ \int_0^\infty\int_{r_a}^\infty E_{\gamma^{\mathrm{II}}_{i_{k,q}}}\left[\log(1+\gamma^{\mathrm{II}}_{i_{k,q}}(r_s,r_a))\right] f_{R_s}(r_s\mid r_a) f_{R_a}(r_a)dr_s dr_a \\
&\overset{(a)}{=} \int_0^\infty\int_0^{r_a}\Bigg(E_{(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}},\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}})}\Big[\log\Big(1+\min\Big(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}}(r_s,r_a), \\
&\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}(r_s,r_a)\Big)\Big]+E_{\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}}\left[\log(1+\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}(r_s,r_a))\right]\Bigg) \\
&f_{R_s}(r_s) f_{R_a}(r_a)dr_s dr_a \\
&+ \int_0^\infty\int_{r_a}^\infty\Bigg(E_{(\gamma^{\mathrm{II}}_{m,m_{k,q}},\gamma^{\mathrm{II}}_{n,m_{k,q}})}\Big[\log\Big(1+\min\Big(\gamma^{\mathrm{II}}_{m,m_{k,q}}(r_s,r_a), \\
&\gamma^{\mathrm{II}}_{n,m_{k,q}}(r_s,r_a)\Big)\Big]+E_{\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}}\left[\log(1+\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}(r_s,r_a))\right]\Bigg) \\
&f_{R_s}(r_s) f_{R_a}(r_a)dr_s dr_a \\
&= R^{\mathrm{I}}_{m,k} + R^{\mathrm{I}}_{n,k} + R^{\mathrm{II}}_{m,k} + R^{\mathrm{II}}_{m,k},
\end{aligned}
\tag{۵}
$$

که (a) ناشی از تصادفی‌بودن انتخاب کاربر دوم از شبکه و است.
بافرض (۱۵)، نرخ ارگادیک کاربر متصل $(m)$ در حالت I به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R^{\mathrm{I}}_{m,k}=\int_0^\infty\int_0^{r_a}\Big(E_{(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}},\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}})}\Big[\log\Big(1+\min\Big(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}}(r_s,r_a),\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}(r_s,r_a)\Big)\Big]\Big)f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dr_sdr_a$$

$$=\int_0^\infty\int_0^{r_a}\Big\{\int_0^\infty\Pr\Big(\log\Big(1+\min\Big(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}}(r_s,r_a),\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}(r_s,r_a)\Big)\Big)>y\Big)dy\Big\}f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dr_sdr_a$$

$$\overset{(a)}{=}\int_0^\infty\int_0^{r_a}\left(\frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\frac{\overline{F}_{\min\left(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}}(r_s,r_a),\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}(r_s,r_a)\right)}(t)}{1+t}dt\right)f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dr_sdr_a \qquad (۱۶)$$

$$=\frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\int_0^{r_a}\int_0^\infty\frac{\Pr\left(\min\left(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}}(r_s,r_a),\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}(r_s,r_a)\right)>t\right)}{1+t}f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dtdr_sdr_a$$

$$\overset{(b)}{=}\frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\int_0^{r_a}\int_0^\infty\frac{\Pr\left(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}}>t\right)\Pr\left(\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}>t\right)}{1+t}f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dtdr_sdr_a,$$

که (a) از تغییر متغیر $y=\Theta(t)$ ناشی می‌شود.
$\overline{F}_{\min}(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}},\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}})$ تابع توزیع تجمعی کامل (CCDF)[۲۵] از $min(\gamma_{m,m_{k,q}}^{I},\gamma_{n,m_{k,q}}^{I})$ را نشان می‌دهد. (b) از استقلال $\gamma_{m,m_{k,q}}^{I}$ و $\gamma_{n,m_{k,q}}^{I}$ به‌دلیل فاصله‌ی $ra$ ثابت و مستقل از $rs$ ناشی می‌شود. بادرنظرگرفتن $\gamma_{m,m_{k,q}}$ برای حالت I با جایگذاری $d_{m_{k,q}}=r_a$ در (۶)، داریم:

$$\Pr\left(\gamma^{\mathrm{I}}_{m,m_{k,q}}>t\right)=\Pr\left(\frac{a_{m_{k,q}}P_kg_{m_{k,q}}r_a^{-\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_kg_{m_{k,q}}r_a^{-\alpha_k}+I_{m_{k,q}}+\sigma^2}>t\right) \qquad (۱۷)$$

$$=\exp\left\{-\frac{t\sigma^2r_a^{\alpha_k}}{\left(a_{m_{k,q}}-ta_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\}L_{I_m}\left\{\frac{tr_a^{\alpha_k}}{\left(a_{m_{k,q}}-ta_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\},$$

که $L_{Im}$ در (۹) به‌دست آمده است. بادرنظرگرفتن $\gamma_{n,m_{k,q}}$ برای حالت I با جایگذاری $d_{n_{k,q}}=r_s$ در (۷)، به‌طور مشابه به‌دست می‌آوریم:

$$\Pr\left(\gamma^{\mathrm{I}}_{n,m_{k,q}}>t\right)=\exp\left\{-\frac{t\sigma^2r_s^{\alpha_k}}{\left(a_{m_{k,q}}-ta_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\} \qquad (۱۸)$$

$$L_{I_n}\left\{\frac{tr_s^{\alpha_k}}{\left(a_{m_{k,q}}-ta_{n_{k,q}}\right)P_k}\right\},$$

که $L_{In}$ در (۹) به‌دست آمده است. بادرنظرگرفتن $(a_{m_{k,q}}-ta_{n_{k,q}})\geq 0$ که براساس در دسترس‌نبودن $(\Pr(-g_{m_{k,q}}>t(I_{k,q}+\sigma^2)/P_kr_a^{-\alpha_k})$ منجر به $(a_{m_{k,q}}/a_{n_{k,q}})\geq t$ می‌شود، حد بالای انتگرال بر روی متغیر $t$ در رابطه (۱۶) مقدار $a_{m_{k,q}}/a_{n_{k,q}}$ می‌شود. درنتیجه، رابطه (۱۰) با جایگذاری (۱۷) و (۱۸) در (۱۶) به‌دست می‌آید.
بافرض (۱۵)، نرخ ارگادیک کاربر دوم $(n)$ در حالت I به‌طور مشابه به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R^{\mathrm{I}}_{n,k}=\int_0^\infty\int_0^{r_a}E_{\gamma^{\mathrm{I}}_{n,n_{k,q}}}\left[\log(1+\gamma^{\mathrm{I}}_{n,n_{k,q}}(r_s,r_a))\right]f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dr_sdr_a$$

$$=\int_0^\infty\int_0^{r_a}\left(\frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\frac{\overline{F}_{\gamma^{\mathrm{I}}_{n,n_{k,q}}}}{1+t}dt\right)f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dr_sdr_a \qquad (۱۹)$$

$$=\frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\int_0^{r_a}\int_0^\infty\frac{\Pr\left(\gamma^{\mathrm{I}}_{n,n_{k,q}}>t\right)}{1+t}f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dtdr_sdr_a.$$

سپس، براساس $\gamma_{n,n_{k,q}}$ برای حالت I با جایگذاری $d_{n_{k,q}}=r_s$ در (۸)، داریم:

$$\Pr\left(\gamma^{\mathrm{I}}_{n,n_{k,q}}>t\right)=\exp\left\{-\frac{t\sigma^2r_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\}L_{I_n}\left\{\frac{tr_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\}. \qquad (۲۰)$$

با جایگذاری (۲۰) در (۱۹)، داریم:

$$R^{\mathrm{I}}_{n,k}=\frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\int_0^{r_a}\int_0^\infty\frac{1}{1+t}\exp\left\{-\frac{t\sigma^2r_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\}$$

$$L_{I_n}\left\{\frac{tr_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\}f_{R_s}(r_s)f_{R_a}(r_a)dtdr_sdr_a$$

$$=\frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{1}{1+t}\exp\left\{-\frac{t\sigma^2r_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\}L_{I_n}\left\{\frac{tr_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\} \qquad (۲۱)$$

$$f_{R_s}(r_s)dtdr_s\int_0^\infty f_{R_a}(r_a)dr_a$$

$$=\frac{1}{\ln 2}\int_0^\infty\int_0^\infty\frac{1}{1+t}\exp\left\{-\frac{t\sigma^2r_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\}L_{I_n}\left\{\frac{tr_s^{\alpha_k}}{a_{n_{k,q}}P_k}\right\}$$

$$\left(1-F_{R_a}(r_s)\right)f_{R_s}(r_s)dtdr_s.$$

بنابراین، رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید. روش اثبات روابط (۱۲) و (۱۳) بترتیب مشابه (۱۰) و (۱۱) است.

***