Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
DOI: 10.22034/jscit.2025.219354
Volume 14, Number 1, Spring 2025, pp. 37-44
Received: 01/27/2025, Revised: 04/15/2025, Accepted: 04/17/2025

The Impact of Using the Non-Orthogonal Multiple Access Technique in Collaborative Wireless Cellular Networks on Improving Communication Quality

Asma Bagheri[1*], Mohammadamin Karimi[2]
1*- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, North Khorasan, Iran.
2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, North Khorasan, Iran.
[1*] a.bagheri@esfarayen.ac.ir, bagheri.asma84@yahoo.com, [2] makarimi.ee@gmail.com

Corresponding author's address: Asma Bagheri, North Khorasan, Esfarayen County, Azadegan Boulevard, at the corner of Mother Square, Higher Education Complex Engineering Esfarayen, Faculty of Electrical and Computer Engineering.

Abstract: Collaborative Non-Orthogonal Multiple Access (CNOMA) reduces the probability of outages for cell edge users in wireless networks, where in-cell users are utilized as relays to improve network coverage and increase reliability. In this approach, relays retransmit information to the cell edge users, thereby enhancing signal power through diversity selection. The statistical analysis of outage probability is crucial for evaluating coverage quality and network performance. However, the analysis faces challenges such as the impact of channel fading and Successive Interference Cancellation (SIC). SIC, a key technique in NOMA systems, decodes stronger signals first and subtracts their interference to detect weaker signals, but its performance is highly sensitive to channel conditions, which can lead to error propagation. Additionally, channel fading significantly impacts outage probability, as it introduces random fluctuations in signal strength, making reliable communication more challenging, especially for cell edge users. Assuming fading channels and the presence of SIC at relay users, this paper presents a closed-form expression for the outage probability of cell edge users. The closed-form expression is evaluated through simulations.

Keywords: Outage probability, Collaborative NOMA, Rayleigh fading, Successive Interference Cancellation (SIC), Wireless cellular networks.

مجله علمی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
شناسه دیجیتال: 10.22034/jscit.2025.219354
جلد ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴ ، صفحه ۳۷-۴۴
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

بررسی تاثیر استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه غیر متعامد همکارانه در شبکه‌های سلولی بی‌سیم بر بهبود کیفیت مخابره

اسما باقری*[۱]، محمدامین کریمی[۲]
*۱- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، خراسان شمالی، ایران.
۲- دانشجو مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، خراسان شمالی، ایران.

[1*] a.bagheri@esfarayen.ac.ir, bagheri.asma84@yahoo.com,[2] makarimi.ee@gmail.com

* نشانی نویسنده مسئول: اسما باقری، خراسان شمالی، شهرستان اسفراین، بلوار آزادگان، نبش میدان مادر، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

چکیده: دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه (CNOMA) راهکاری است جهت کاهش احتمال قطع کاربران لبه سلولی در شبکه‌های بی‌سیم که در آن از کاربران درون سلولی به عنوان رله استفاده می‌شود تا بهبود در پوشش شبکه و افزایش قابلیت اطمینان حاصل شود. در این رویکرد، رله‌ها اطلاعات را برای کاربران لبه سلول ارسال می‌کنند. این عمل موجب تقویت قدرت سیگنال از طریق انتخاب تنوع می‌شود. تحلیل آماری احتمال قطع کاربران محکی جهت درک کیفیت پوشش و عملکرد کلی در شبکه‌های سلولی شناخته شده است. البته، تحلیل آماری احتمال قطع کاربران لبه سلولی در این نوع شبکه‌ها با چالش‌های خاصی مواجه است. این چالش‌ها شامل تأثیر محو شدن کانال و اثر لغو تداخل متوالی (SIC) در کاربران رله می‌باشد. در این مقاله ما با فرض وجود کانال‌های محوشدگی و احتمال وقوع SIC در کاربران رله، فرمول بسته‌ای را برای احتمال قطع ارتباط کاربران لبه سلول ارائه می‌دهیم. سپس این فرمول با استفاده از نتایج شبیه‌سازی ارزیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: احتمال قطعی، NOMA همکارانه، محو شدن رایلی، لغو تداخل متوالی (SIC)، شبکه‌های سلولی بی‌سیم.

۱- مقدمه

NOMA[۱] (دسترسی چندگانه غیرمتعامد) یک تکنیک امیدوارکننده برای شبکه‌های فراتر از نسل پنجم (B5G)[۲] است که در مقایسه با OMA[۳]، تأخیر پایین، قابلیت اطمینان بالا، کارایی طیفی بهتر و عملکرد بهبود یافته اتصال را ارائه می‌دهد [۱]. این تکنیک روشی است که به چندین کاربر اجازه می‌دهد به صورت همزمان و روی یک منبع فرکانسی یکسان ارتباط برقرار کنند. این تکنیک با اختصاص سطوح مختلف توان به کاربران و استفاده از تفکیک‌پذیری در حوزه توان، کارایی طیفی و ظرفیت سیستم را افزایش می‌دهد.

اهمیت تحلیل احتمال قطع ارتباط در شبکه‌های تلفن همراه بی‌سیم در نقش آن در درک اتصالات کاربران و عملکرد کلی شبکه نهفته است. این تحلیل امکان مدل‌سازی و ارزیابی احتمال قطع ارتباط را فراهم می‌کند که برای تعیین موفقیت ارتباط بین کاربران و ایستگاه پایه (BS)[۴]، کیفیت خدمات (QoS)[۵] و عملکرد کلی شبکه بسیار ضروری است [۲].

تکنیک CNOMA[۶] (Cooperative NOMA) یا همکاری به روش NOMA، یک رویکرد پیشرفته در مخابرات بی‌سیم است که در آن کاربران نزدیک‌تر به ایستگاه پایه به عنوان رله عمل کرده و به

کاربران دورتر در ارسال اطلاعات کمک می‌کنند. CNOMA دارای پتانسیل کاهش احتمال قطع ارتباط کاربران در لبه سلولی در شبکه‌های تلفن همراه است [۳]. بر خلاف NOMA سنتی، که در آن قدرت بیشتری به کاربر لبه‌ای نسبت به کاربر نزدیک تخصیص داده می‌شود، CNOMA به تقویت بیشتر نرخ کاربر لبه‌ای می‌پردازد.

در شبکه‌های سلولی بی‌سیم، تحلیل احتمال قطع ارتباط برای اطمینان از برقراری ارتباط موفق، به ویژه برای کاربران در لبه سلول بسیار حیاتی است. مطالعات متعددی بر روی مدل‌سازی و تحلیل احتمال قطع ارتباط تمرکز کرده‌اند و بینش‌های ارزشمندی را برای بهبود عملکرد شبکه ارائه می‌دهند. در [۴] مروری بر تحقیقات اخیر مختلف در شبکه‌های CNOMA مبتنی بر انتقال همزمان اطلاعات و قدرت بی‌سیم (SWIPT)[۷] است که راهنمایی‌هایی برای طراحی سیستم، تحلیل عملکرد و پروتکل‌های ارتباطی متنوع ارائه می‌دهد. علاوه بر این، این مرور به بررسی عمیق مطالعات بر اساس نوع رله، تعداد رله‌ها و پروتکل‌های ارتباطی می‌پردازد. همچنین، آثار اخیر مرتبط به بهبود احتمال قطع ارتباط و ظرفیت مجموع در سیستم‌های NOMA از طریق طرح‌های رله‌گیری همکارانه می‌پردازند، همان‌طور که در [۵] پیشنهاد شده است. این طرح‌ها از کاربران داخلی سلول به عنوان رله‌ها استفاده می‌کنند تا به انتقال مستقیم به کاربران لبه‌ای کمک نمایند و مکانیزم خاموش/روشن را بر اساس کیفیت لینک شناخته‌شده پیاده‌سازی می‌کنند.

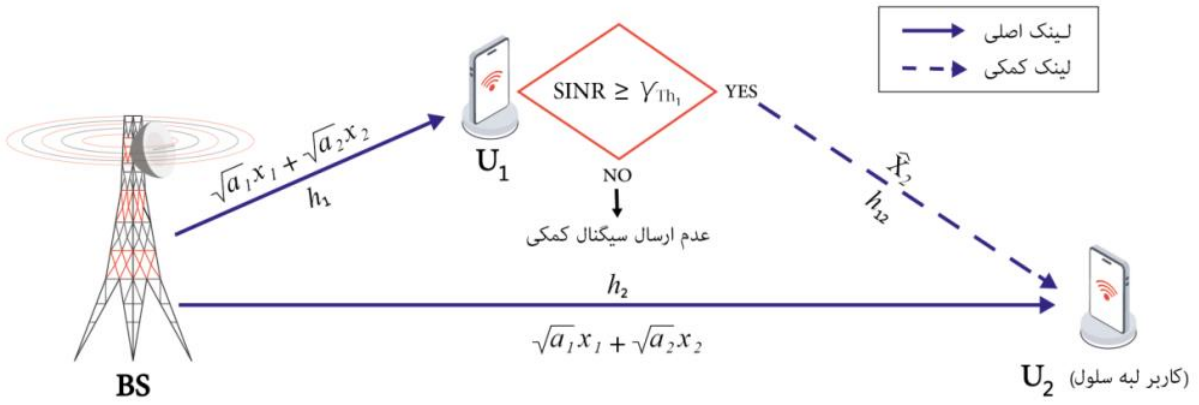
مطالعه دیگر، [۶]، به بررسی دو سناریوی انتقال برای خدمت‌رسانی به کاربران لبه سلول در شبکه‌های سلولی می‌پردازد و از سیاست انتخاب آنتن ارسال (TAS)[۸] برای بهبود قابل توجه عملکرد سیستم در شبکه‌های NOMA استفاده می‌کند. همچنین، [۷] یک مدل ارتباطی D2D[۹]-relay را معرفی می‌کند تا کیفیت پوشش کاربر لبه سلول را ارتقاء دهد و یک مسأله تخصیص منابع را فرموله کرده و یک الگوریتم تخصیص قدرت تکراری را پیشنهاد می‌کند. علاوه بر این، [۸] یک سیستم CNOMA تک‌سلولی با رله‌گیری دوطرفه جمع‌آوری انرژی را پیشنهاد می‌کند تا نرخ مجموع و بهره‌وری انرژی را در شبکه‌های سلولی افزایش دهد و مدلی در راستای دانلود با BS، کاربران داخلی سلول و کاربران لبه سلول در نظر می‌گیرد. این رویکرد شامل یک رله دوطرفه برای بهبود عملکرد یک کاربر لبه سلول و همچنین مسأله‌های بهینه‌سازی برای تخصیص قدرت به منظور حداکثر کردن نرخ مجموع و بهره‌وری انرژی است. با این حال، این مطالعات به طور خاص به احتمال قطع ارتباط کاربران لبه سلول نمی‌پردازند.

با توجه به رفتار تصادفی کانال‌های بی‌سیم، مانند اثرات محوشدگی، تحلیل و درک ویژگی‌های آماری احتمال قطع ارتباط، به ویژه برای کاربران لبه‌ای در شبکه‌های مبتنی بر CNOMA، ضروری است تا استراتژی‌های مؤثر تخصیص منابع، مکانیزم‌های انتخاب رله و تکنیک‌های مدیریت تداخل طراحی شود. بررسی تأثیر همکاری کاربران بر کاهش احتمال قطع ارتباط، راه را برای توسعه شبکه‌های بی‌سیم پیشرفته هموار می‌کند که قادر به پشتیبانی از برنامه‌های متنوع و تعداد زیادی از دستگاه‌های متصل هستند. با افزایش تقاضا برای نرخ‌های بالای داده و احتمال قطع ارتباط پایین، تحلیل احتمال قطع ارتباط در شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر CNOMA به عنوان یک نقطه کلیدی برای بهبود عملکرد و قابلیت‌های سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم نسل بعدی مطرح است.

در این مقاله ما یک تحلیل آماری از احتمال قطع کاربران در لبه‌ی سلولی در شبکه‌های بی‌سیم ارائه می‌دهیم. سسپس این رابطه از طریق شبیه‌سازی‌ها ارزیابی می‌کنیم تا مزایا و موانع بالقوه مرتبط با پیاده‌سازی CNOMA، NOMA سنتی و OMA در شبکه‌های بی‌سیم را بررسی کنیم.

۲- مدل سیستم

این بخش مدل لایه فیزیکی یک شبکه سلولی مبتنی بر CNOMA با یک ایستگاه پایه (BS) و دو کاربر موبایل $\left(U_1 و U_2\right)$ را شرح می‌دهد، که هر گره به یک آنتن مجهز است. تصویری از مدل سیستم مورد نظر در در شکل۱ ارائه شده است. مرحله اول، ایستگاه پایه از تکنیک NOMA برای ارسال سیگنال‌ها به کاربران از طریق لینک‌های مستقیم استفاده می‌کند. در شکل۱، a_1 و a_2 ضریب‌های تخصیص توان[۱۰] (PA) و x_2 و x_1 سیگنال‌های کاربران را نشان می‌دهند. بدون از دست دادن کلیت، فرض می‌شود که $a_1 < a_2$ است. در مرحله دوم، یک طرح همکاری مبتنی بر آستانه فرض می‌شود، که در آن کاربری که شرایط کانال بهتری دارد می‌تواند بعنوان رله به حفظ ارتباط کاربر لبه سلول کمک کند. یعنی اگر نسبت توان سیگنال به مجموع تداخل و نویز[۱۱] (SINR) در U_1 بیشتر از یک مقدار آستانه از پیش تعیین شده باشد $(\text{i.e.,}\gamma_{\text{Th1}})$، این کاربر یک سیگنال همکاری $(\text{i.e.,}\ \hat{x}_2)$ را به کاربر لبه سلول (U_2) با شرایط کانال ضعیف‌تر ارسال می‌کند. برای انجام این کار، U_1 سیگنال خود را به عنوان نویز در نظر می‌گیرد و از SIC[۱۲] برای آشکارسازی سیگنال کاربر لبه سلول استفاده می‌کند. در این سناریو، U_2 سیگنال‌هایی را هم از BS و هم از U_1 دریافت می‌کند و سپس از تکنیک ترکیب نسبت حداکثری[۱۳] (MRC) برای دستیابی به حداکثر SINR استفاده می‌کند. فرض می‌شود که تضعیف رایلی (Rayleigh) برای مدل‌سازی هر لینک با ضرایب مستقل، با نمادهای h_1, h_2 و



شکل۱: مدل سیستم CNOMA

h_{c12} به ترتیب برای لینک‌های مستقیم بین $BS-U_1$، $BS-U_2$ و لینک همکاری بین U_1 و U_2، استفاده می‌شود. در این مدل، σ_i^2 واریانس ضرایب کانال‌ها را نشان می‌دهد.

$$h_i \sim \text{Rayleigh}(0,\sigma_i^2) \qquad i=1,2,c12 \qquad (۱)$$

در مرحله اول ارتباط، BS از کدگذاری برپوششی (SC)[۱۴] استفاده کرده و سیگنال کل کاربران را ارسال می‌کند؛ بنابراین، سیگنال‌های دریافت شده توسط کاربران به صورت زیر است:

$$y_i=\sqrt{P_T}h_i\left(\sqrt{a_1}x_1+\sqrt{a_2}x_2\right)+n_i \qquad i=1,2 \qquad (۲)$$

که در آن P_T و n_i به ترتیب توان کل ارسال شده در BS و نویز گوسی سفید جمع‌شونده[۱۵] (AWGN, $\text{CN}(0, \text{N}_0)$) را نشان می‌دهند. بنابراین، در مرحله اول، SINR دریافت شده در کاربران به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\gamma_1=\frac{\gamma_0 a_1|h_1|^2}{\gamma_0 a_2|h_1|^2+1} \qquad (۳)$$

$$\gamma_2=\frac{\gamma_0 a_2|h_2|^2}{\gamma_0 a_1|h_2|^2+1} \qquad (۴)$$

که در آن $\gamma_0=\frac{P_T}{N_0}$ میانگین SNR را نشان می‌دهد. همچنین، SINR دریافت شده در U_1 از سیگنال ارسال شده برای U_2، زمانی که U_1 سیگنال خود را به عنوان نویز در نظر می‌گیرد (با نماد γ_{12})، به صورت زیر داده می‌شود:

$$\gamma_{12}=\frac{\gamma_0 a_2|h_1|^2}{\gamma_0 a_1|h_1|^2+1} \qquad (۵)$$

حال، اگر SINR در U_1 بیشتر از مقدار آستانه‌ی همکاری باشد (i.e., $\gamma_{12}\geq\gamma_{Th1}$)، در مرحله دوم ارتباط، سیگنال همکاری را به U_2 ارسال می‌کند که با $\hat{x}_2$ نمایش داده می‌شود. بنابراین، سیگنال دریافت شده توسط U_2 در مرحله دوم به صورت زیر است:

$$y_{c12}=\begin{cases} n_{c12} & ;\ \gamma_{12}<\gamma_{Th1} \\ \sqrt{P_T}h_{c12}\hat{x}_2+n_{c12} & ;\ \gamma_{12}\geq\gamma_{Th1} \end{cases} \qquad (۶)$$

در اینجا، n_{c12} نویز AWGN توزیع‌شده به صورت $\text{CN}(0, \text{N}_0)$ است. U_2 از ترکیب نسبت حداکثری (MRC) برای سیگنال‌های دریافت‌شده در دو مرحله استفاده می‌کند، و سیگنال کل دریافت شده توسط U_2 به صورت رابطه (۷) در انتهای همین صفحه نوشته می‌شود. بنابراین، SINR کل دریافت شده در U_2 به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\gamma_{tot2}=\begin{cases} \dfrac{\gamma_0 a_2|h_2|^2}{\gamma_0 a_1|h_2|^2+1} & ;\ \gamma_{12}<\gamma_{Th1} \\ \dfrac{\gamma_0(a_2|h_2|^2+|h_{c12}|^2)}{\gamma_0 a_1|h_2|^2+1} & ;\ \gamma_{12}\geq\gamma_{Th1} \end{cases} \qquad (۸)$$

۳- تحلیل آماری قطع ارتباط کاربر در لبه‌ی احتمال سلولی

احتمال قطع ارتباط کاربر (OP)[۱۶] به عنوان احتمال اینکه SINR دریافتی کاربر کمتر از یک مقدار آستانه لازم جهت آشکارسازی پیام

$$y_{tot2}=\begin{cases} \sqrt{P_T}h_2\left(\sqrt{a_1}x_1+\sqrt{a_2}x_2\right)+n\,; & \gamma_{12}<\gamma_{Th1} \\ \sqrt{P_T}\left(h_{c12}\hat{x}_2+h_2\left(\sqrt{a_1}x_1+\sqrt{a_2}x_2\right)\right)+n; & \gamma_{12}\geq\gamma_{Th1} \end{cases} \qquad (۷)$$

مربوطه با احتمال خطای مورد قبول باشد، تعریف می‌شود. تحلیل و بررسی احتمال قطع ارتباط کاربر (OP) در لبه سلول هدف اصلی این مقاله است، بنابراین، ما احتمال قطعی U_2 را به‌عنوان احتمال اینکه SINR دریافت‌شده در کاربر کمتر از حد آستانه قطع باشد یا به عبارتی $\gamma_{tot2} < \gamma_{Th2}$، محاسبه می‌کنیم، که γ_{Th2} نشان‌دهنده‌ی سطح آستانه (مرتبط با حساسیت گیرنده کاربر) است. توجه شود که ضرایب محو شدگی کانال و همچنین احتمال تصمیم‌گیری برای همکاری در U_1 مستقل هستند. بنابراین، احتمال قطعی در U_2 در سیستم سلولی مبتنی بر CNOMA به صورت رابطه (۹) در انتهای همین صفحه می‌تواند فرموله شود.

ابتدا عبارات احتمال P_1، P_2 و P_3 در (۹) را جداگانه محاسبه می‌کنیم. احتمال P_1 به صورت رابطه (۱۰) در انتهای همین صفحه محاسبه می‌شود که در آن $\rho_{Th1} \triangleq \frac{\gamma_{Th1}}{\gamma_0(a_2 - a_1\gamma_{Th1})}$ است. در این روابط $|h_1|^2$، $|h_2|^2$ و $|h_{c12}|^2$ به ترتیب نمایش دهنده‌ی بهره توان لینک‌های مستقیم بین $BS - U_1$، $BS - U_2$ و لینک کمکی بین U_1 و U_2 هستند. از آنجا که ضرایب محو شدن کانال از توزیع ریلی پیروی می‌کنند؛ $|h_1|^2$، $|h_2|^2$ و $|h_{c12}|^2$ توزیع نمایی به شکل زیر خواهند داشت؛ زیرا مجذور یک توزیع ریلی، یک توزیع نمایی است [۹]:

$$|h_i|^2 \sim Exp(\lambda_i)\ , i = 1,2,c12 \qquad (۱۱)$$

بنابراین، از (۱۰) و (۱۱)، P_1، P_2 و P_3 محاسبه می‌شود که [۲]:

$$P\{\gamma_{12} < \gamma_{Th1}\} = 1 - exp(-\lambda_1\rho_{Th1}) \qquad (۱۲)$$

$$P\{\gamma_{12} \geq \gamma_{Th1}\} = exp(-\lambda_1\rho_{Th1}) \qquad (۱۳)$$

به‌طور مشابه، با فرض (۱۱)، احتمال P_2 به صورت رابطه (۱۴) در انتهای همین صفحه محاسبه می‌شود [۲]، که در آن $\rho_{Th2} \triangleq \frac{\gamma_{Th2}}{\gamma_0(a_2 - a_1\gamma_{Th2})}$ است. عبارت احتمالی آخر نیز به صورت رابطه (۱۵) در انتهای همین صفحه بازنویسی می‌شود.

برای محاسبه این احتمال، متغیرهای جدید $\rho_{Th0} \triangleq \frac{\gamma_{Th2}}{\gamma_0}$، $Z \triangleq |h_2|^2(a_2 - \gamma_{Th2}a_1)$ و $W \triangleq |h_{c12}|^2$ تعریف می‌شوند. به دلیل اینکه ضرایب محو شدگی کانال توزیع آماری ریلی دارند، Z و W متغیرهای تصادفی نمایی مستقل با توزیع‌های زیر خواهند بود [۹]:

$$f_Z(z) = \lambda_z e^{-\lambda_z z}, \qquad F_Z(z) = 1 - e^{-\lambda_z z} \qquad (۱۶)$$

$$f_W(w) = \lambda_w e^{-\lambda_w w}, \qquad F_W(w) = 1 - e^{-\lambda_w w} \qquad (۱۷)$$

که در آن پارامترهای نرخ متغیرهای تصادفی نمایی Z و W به‌ترتیب با $\lambda_z \triangleq \frac{\lambda_2}{(a_2 - \gamma_{Th2}a_1)}$ و $\lambda_w \triangleq \lambda_{c12}$ نشان داده شده است [۹]. حالا، (۱۵) به صورت $P\{Z + W \leq \rho_{Th0}\}$ بازنویسی شده و اگر $R \triangleq Z + W$ تعریف بشود، عبارت به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$P\{R < \rho_{Th0}\} = \int_0^{r=\rho_{Th0}} f_R(r)dr \qquad (۱۸)$$

که در آن $f_R(.)$ تابع چگالی احتمال R است و از آنجا که Z و W متغیرهای تصادفی مستقل با توابع چگالی احتمال به ترتیب $f_Z(.)$ و $f_W(.)$ هستند، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$f_R(r) = \int_{z=0}^{z=r} f_{WZ}(r - z, z)dz \qquad (۱۹)$$

بنابراین، مطابق با (۱۶) و (۱۷)، $f_R(r)$ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$\begin{aligned} OP_{CNOMA} &= P\{\gamma_{tot2} < \gamma_{Th2}\} \\ &= P\{\gamma_{12} < \gamma_{Th1}\}P\left\{\frac{\gamma_0 a_2|h_2|^2}{\gamma_0 a_1|h_2|^2 + 1} < \gamma_{Th2}\right\} + P\{\gamma_{12} \geq \gamma_{Th1}\}P\left\{\frac{\gamma_0(a_2|h_2|^2 + |h_{c12}|^2)}{\gamma_0 a_1|h_2|^2 + 1} < \gamma_{Th2}\right\} \\ &= P_1P_2 + \bar{P}_1P_3 \end{aligned} \qquad (۹)$$

$$P\{\gamma_{12} < \gamma_{Th1}\} = P\left\{\frac{\gamma_0 a_2|h_1|^2}{\gamma_0 a_1|h_1|^2 + 1} < \gamma_{Th1}\right\} = P\{|h_1|^2 < \rho_{Th1}\} = P_1 \qquad (۱۰)$$

$$P\left\{\frac{\gamma_0 a_2|h_2|^2}{\gamma_0 a_1|h_2|^2 + 1} < \gamma_{Th2}\right\} = P\{|h_2|^2 < \rho_{Th2}\} = exp(-\lambda_2\rho_{Th2}) = P_2 \qquad (۱۴)$$

$$P\left\{\frac{\gamma_0(a_2|h_2|^2 + |h_{c12}|^2)}{\gamma_0 a_1|h_2|^2 + 1} \leq \gamma_{Th2}\right\} = P\left\{|h_2|^2(a_2 - \gamma_{Th2}a_1) + |h_{c12}|^2 \leq \frac{\gamma_{Th2}}{\gamma_0}\right\} \qquad (۱۵)$$

$$OP_{CNOMA} = e^{-\lambda_2 \rho_{Th2}}\left(1 - e^{-\lambda_1 \rho_{Th1}}\right) + e^{-\lambda_1 \rho_{Th1}} \frac{\lambda_z e^{-\lambda_{c12} \rho_{Th0}} - \lambda_{c12} e^{-\lambda_z \rho_{Th0}}}{\lambda_z - \lambda_{c12}} \quad (۲۲)$$

$$f_R(r) = \frac{\lambda_z \lambda_w}{\lambda_z - \lambda_w}\left(e^{-\lambda_w r} - e^{-\lambda_z r}\right) \quad (۲۰)$$

بنابراین، $P\{R \le \rho_{Th0}\}$ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P\{R < \rho_{Th0}\} = 1 - \frac{\lambda_z e^{-\lambda_w \rho_{Th0}} - \lambda_w e^{-\lambda_z \rho_{Th0}}}{\lambda_z - \lambda_w} \quad (۲۱)$$

حال از (۱۲)، (۱۳)، (۱۴) و (۲۱)، احتمال قطع ارتباط U_2 در سیستم مبتنی بر CNOMA به صورت رابطه (۲۲) در بالای صفحه محاسبه می‌شود که در این رابطه، $\lambda_z \triangleq \frac{\lambda_2}{(a_2 - \gamma_{Th2} a_1)}$، $\rho_{Th0} \triangleq \frac{\gamma_{Th2}}{\gamma_0}$ است.

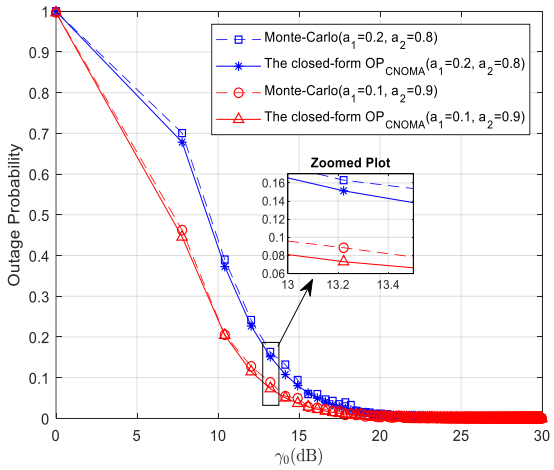
در قسمت بعد از طریق شبیه‌سازی‌های کامپیوتری به بررسی و ارزیابی کارایی رابطه بسته بدست آمده برای احتمال قطع ارتباط U_2 در سیستم مبتنی بر CNOMA می‌پردازیم.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، عبارت احتمال قطع برای کاربر U_2 در سیستم سلولی مبتنی بر CNOMA را از طریق شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در محیط MATLAB ارزیابی می‌کنیم. ابتدا، عبارت تحلیلی بدست آمده برای احتمال قطع را با نتایج عددی حاصل از روش مونت‌کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار مقایسه می‌کنیم تا صحت این رابطه بررسی شود. سپس عملکرد سیستم سلولی مبتنی بر CNOMA از نظر احتمال قطع ارتباط کاربر U_2 با دو سناریوی دیگر مقایسه شده است:
۱- سیستم مبتنی بر NOMA معمولی (بدون همکاری بین کاربران) و ۲- سیستم مبتنی بر OMA

در این شبیه‌سازی‌ها، سلول‌های دایره‌ای با شعاع ۱۰۰ متر و یک ایستگاه پایه در مرکز سلول در نظر گرفته شده است. موقعیت رله به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت در محدوده ۲ تا ۵۰ متری از ایستگاه پایه و موقعیت کاربر لبه‌ای نیز به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت در محدوده‌ی ۸۰ تا ۱۰۰ متری از ایستگاه پایه فرض شده است. با توجه به تنوع سناریوهای ارزیابی شده، مقادیر سایر پارامترهای مورد استفاده در هر شبیه سازی، به طور دقیق در توضیحات مربوط به هر شکل ذکر شده است.

در شکل۲، مقایسه نتایج بدست آمده برای OP_{CNOMA} با نتایج عددی حاصل از روش مونت‌کارلو را به ازای مقادیر مختلف SNR یعنی نسبت توان کل ارسالی BS به نویز (i.e., $\gamma_0 = \frac{P_T}{N_0}$) نمایش می‌دهد. برای ارزیابی بهتر، مقایسه‌ها در دو حالت تقسیم توان متفاوت $(a_2, a_1) = (۰/۸, ۰/۲)$ و $(a_2, a_1) = (۰/۹, ۰/۱)$ انجام شده است. بررسی نمودارهای شکل۲ نشان می‌دهد که عبارت احتمال قطع بدست آمده برای کاربر U_2 در سیستم سلولی مبتنی بر CNOMA با نتایج عددی حاصل از روش مونت‌کارلو به ازای مقادیر مختلف γ_0 و در هر دو حالت متفاوت مفروض تطابق دارد. شکل۲، همچنین نشان می‌دهد که برای یک توان کل ارسالی یکسان، در حالتی که ضرایب تخصیص توان (a_2, a_1) برابر (۰/۹،۰/۱) باشد، احتمال قطع ارتباط در کاربر U_2 کمتر از حالتی است که (a_2, a_1) برابر با (۰/۸،۰/۲) است. این امر به این دلیل است که در حالت (۰/۹،۰/۱)، نسبت سیگنال به تداخل و نویز (SINR) دریافتی در کاربر U_2 از لینک مستقیم افزایش یافته است. علاوه بر این، SINR دریافتی در کاربر U_1 از سیگنال ارسالی برای کاربر U_2 نیز بالاتر است، که این موضوع منجر به افزایش احتمال ارسال سیگنال همکاری می‌شود. به‌عنوان مثال، نمای نزدیک بخشی از نمودارها برای نسبت توان کل ارسالی به نویز در محدوده‌ی ۱۳ تا ۱۳/۵ دسی‌بل نشان می‌دهد که در حالتی که نسبت تخصیص توان برابر (۰/۸،۰/۲) باشد، احتمال قطع ارتباط کاربر لبه‌ی سلولی حدود ۸۷٪ بیشتر از حالتی است که نسبت تخصیص توان برابر (۰/۹،۰/۱) باشد.



شکل۲: احتمال قطع ارتباط کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر میانگین SNR مختلف

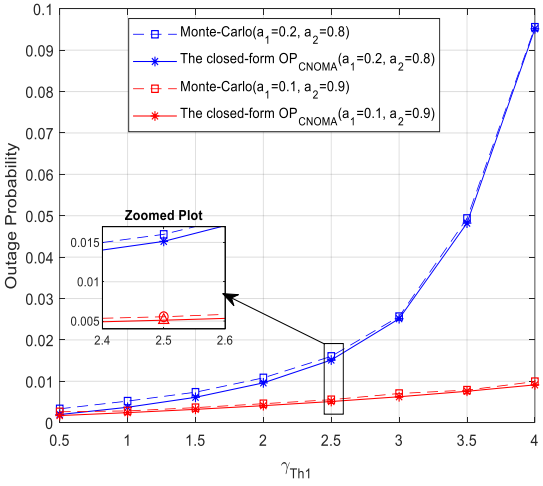
$(\sigma_1^2 = \sigma_{c12}^2 = 0dB, \sigma_2^2 = -3dB, \gamma_{Th1} = \gamma_{Th2} = 2)$

برای بررسی تأثیر سطح آستانه‌ی همکاری کاربر U_1، یعنی γ_{Th1}، در شکل۳، مقایسه‌ای بین نتایج تحلیلی استخراج شده برای OP_{CNOMA} و نتایج شبیه‌سازی به روش مونت کارلو برای مقادیر مختلف آستانه γ_{Th1} و نسبت‌های تخصیص توان a_1 و a_2 ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که افزایش γ_{Th1} منجر به افزایش احتمال قطع ارتباط کاربر U_2 می‌شود، زیرا احتمال همکاری کاربر U_1 کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، اگر γ_{Th1} مقدار بسیار کوچکی انتخاب شود، حتی در شرایطی که سیگنال دریافتی کاربر لبه‌ی سلولی از لینک مستقیم کیفیت مطلوبی دارد، کاربر رله همچنان سیگنال همکاری را ارسال می‌کند. این رفتار منجر به اتلاف انرژی قابل‌توجهی در کاربر رله می‌شود. علاوه بر این، ارسال سیگنال همکاری در شرایطی که کاربر رله سیگنال ضعیفی از کاربر لبه‌ی سلولی پس از اجرای SIC و آشکارسازی سیگنال دریافت کرده است، احتمال خطا در کاربر U_2 را افزایش می‌دهد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهند که اگرچه کاهش γ_{Th1} احتمال قطع ارتباط را کاهش می‌دهد، اما این بهبود با هزینه‌ی افزایش مصرف انرژی در کاربر رله و افزایش خطا در کاربر لبه‌ی سلولی همراه است. این تعادل بین عملکرد سیستم و مصرف انرژی، ضرورت توسعه‌ی الگوریتم‌های هوشمند برای تنظیم پویای γ_{Th1} را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که بتواند به‌صورت خودکار با تغییرات شرایط کانال و نیازهای کاربران سازگار شود.

نکته‌ی قابل توجه در شکل۳، افزایش تفاوت احتمال قطع ارتباط کاربر بین دو حالت تخصیص توان متفاوت $(a_2, a_1) = (۰/۸, ۰/۲)$ و $(a_2, a_1) = (۰/۹, ۰/۱)$ با افزایش سطح آستانه‌ی γ_{Th1} است.

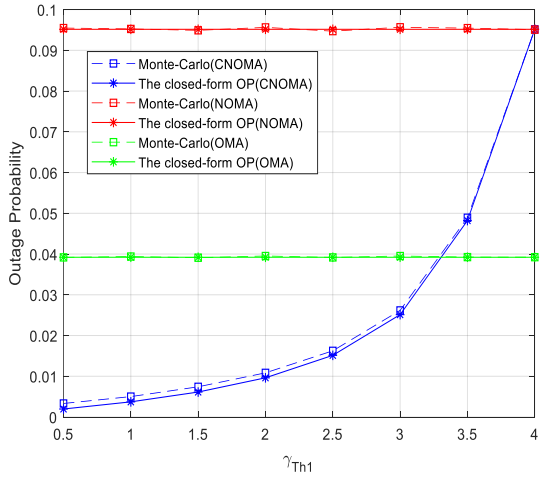
مطابق با توضیحات ارائه‌شده برای شکل۲، این موضوع نشان‌دهنده‌ی تأثیر مؤثر همکاری کاربر U_1 در حفظ ارتباط کاربر لبه سلولی در شرایطی است که توان دریافتی کاربر از لینک مستقیم کم باشد. به‌عنوان مثال، در نمای نزدیک بخشی از نمودارها برای γ_{Th1} برابر ۲،۵، مشاهده می‌شود که در حالتی که نسبت تخصیص توان برابر (۰/۸،۰/۲) باشد، احتمال قطع ارتباط کاربر لبه‌ی سلولی حدود ۳۰۰٪ بیشتر از حالتی است که نسبت تخصیص توان برابر (۰/۹،۰/۱) باشد. این تفاوت زمانی که γ_{Th1} به ۴ افزایش می‌یابد، به حدود ۸۵۰٪ می‌رسد.

در شکل۴، احتمال قطع اتصال کاربر لبه سلولی را به ازای مقادیر آستانه متفاوت در سه سناریوی NOMA، CNOMA، و OMA را ارائه کرده‌ایم. این نمودار نشان می‌دهد که CNOMA به طور قابل‌توجهی بر NOMA معمولی و OMA در احتمال حفظ اتصال کاربر لبه سلولی برتری دارد. به‌عنوان مثال، در نمای نزدیک بخشی از نمودارها برای γ_{Th1} برابر با ۲، مشاهده می‌شود که احتمال قطع کاربر لبه سلولی در CNOMA به ترتیب حدود ۳۹۰٪ و ۹۶۰٪ نسبت به OMA و NOMA کمتر است. این رفتار ناشی از همکاری و اشتراک منابع بین کاربران است که به CNOMA امکان می‌دهد در شرایط تضعیف بالا به طور مؤثرتری از منابع استفاده کند و احتمال قطع اتصال را کاهش دهد. این برتری CNOMA با کاهش مقدار γ_{Th1} افزایش می‌یابد؛ البته همانطور که در توضیحات شکل۳ بیان شد، این امتیاز به ازای مصرف انرژی بیشتر فراهم می‌گردد و تعیین مقدار مناسب برای آستانه تصمیم‌گیری ضروری می‌باشد.



شکل۳: احتمال قطع ارتباط کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر متفاوت سطح آستانه‌ی تصمیم به همکاری در گره رله

$(\gamma_0 = 20dB, \sigma_1{}^2 = \sigma_{c12}{}^2 = 0dB, \sigma_2{}^2 = -3dB, \gamma_{Th2} = 2)$

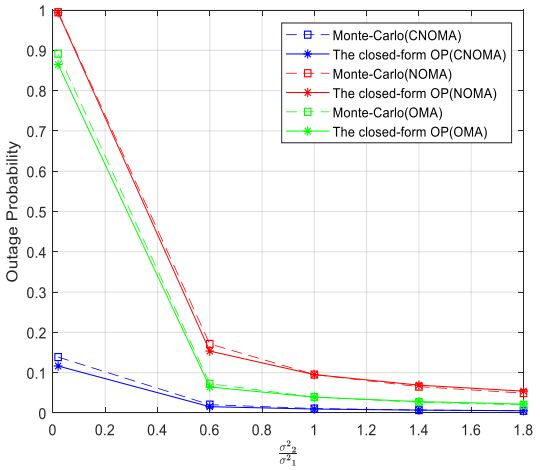


شکل۴: احتمال قطع اتصال کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر متفاوت سطح آستانه‌ی تصمیم به همکاری در گره رله در سه سناریوی NOMA ،OMA **و** CNOMA $(\gamma_0 = 20dB)$

$(\sigma_1{}^2 = \sigma_{c12}{}^2 = 0dB, \sigma_2{}^2 = -3dB, \gamma_{Th2} = 2)$

از سوی دیگر، با افزایش γ_{Th1} بیشتر از مقدار ۳/۲۶، بدلیل کوچک شدن احتمال همکاری گره رله، احتمال قطع ارتباط کاربر لبه سلولی در CNOMA به NOMA نزدیکتر شده و از OMA بزرگتر خواهد شد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که استفاده از OMA منجر به احتمال قطع کمتر نسبت به NOMA معمولی می‌شود. با این حال، این مزیت در ازای افزایش پهنای باند مورد نیاز برای ارتباطات در سیستم سلولی ممکن خواهد بود.

در شکل۵، احتمال قطع اتصال کاربر لبه سلولی برای مقادیر متفاوت نسبت توان ضرایب محوشدگی کانال‌های مستقیم را در سه سناریوی OMA، NOMA و CNOMA ارائه می‌دهیم. این شکل علاوه بر نمایش عملکرد بهتر روش CNOMA در حفظ اتصال کاربر لبه‌ی سلولی نسبت به NOMA معمولی و OMA، نشان می‌دهد که در شرایطی که کانال مستقیم کاربر لبه سلولی دچار محوشدگی شدید باشد، همکاری گره رله می‌تواند احتمال قطع ارتباط در لبه سلولی را به طور چشمگیری کاهش دهد. به عنوان مثال، در شکل۵ مشاهده می‌شود در حالتی که نسبت متوسط توان دریافتی از کانال‌های مستقیم، یعنی $\frac{{\sigma_2}^2}{{\sigma_1}^2}$ برابر با ۰/۰۱ باشد؛ احتمال قطع ارتباط برای کاربر لبه سلولی در سیستم مبتنی بر CNOMA، ۹ برابر کمتر از احتمال قطع ارتباط در سیستم مبتنی بر OMA است. در این شرایط احتمال قطع کاربر لبه سلولی در سیستم مبتنی بر NOMA تقریباً یک می‌باشد.



شکل۵: احتمال قطع اتصال کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر متفاوت نسبت توان ضرایب محوشدگی کانال‌های مستقیم در سه سناریوی OMA، NOMA و CNOMA

$(\gamma_0 = 20dB, {\sigma_{c12}}^2 = 0dB, \gamma_{Th1} = \gamma_{Th2} = 2)$

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک تحلیل آماری از عملکرد سیستم سلولی مبتنی بر CNOMA از نظر احتمال قطع ارتباط کاربر لبه‌ای (U_2) در شبکه‌های سلولی بی‌سیم ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، کاربران درون‌سلولی می‌توانند به عنوان رله عمل کرده تا مشکلات احتمال قطع ارتباط برای کاربران لبه سلول را کاهش دهند. ما یک فرمول‌بندی تحلیلی برای احتمال قطع کاربر لبه‌ی سلول در شبکه‌های مبتنی بر CNOMA استخراج کرده‌ایم که تأثیر کانال‌های تضعیف رایلی را در نظر گرفته و اثرات مثبت همکاری بین کاربران را بر کاهش احتمال قطع ارتباط نشان می‌دهد.

علاوه بر این، مقایسه‌ای جامع بین سناریوهای مختلف از جمله NOMA معمولی و تکنیک‌های دسترسی چندگانه متعامد (OMA) انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که CNOMA به‌طور قابل‌توجهی در کاهش احتمال قطع ارتباط کاربر لبه‌ی سلول نسبت به NOMA معمولی و OMA برتری دارد. این بهبود عملکرد ناشی از همکاری بین کاربران و اشتراک منابع است که به سیستم اجازه می‌دهد در شرایط تضعیف شدید کانال، ارتباط کاربر لبه‌ای را به‌طور مؤثرتری حفظ کند. به‌عنوان مثال، در شرایطی که نسبت توان دریافتی از کانال‌های مستقیم بسیار کم باشد $(\frac{{\sigma_2}^2}{{\sigma_1}^2} = 0.01)$، احتمال قطع ارتباط در CNOMA تا ۹ برابر کمتر از OMA و به‌طور چشمگیری کمتر از NOMA معمولی است. این نتایج نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای CNOMA در بهبود قابلیت حفظ ارتباطات در محیط‌های با تضعیف شدید است.

با این حال، بهبود عملکرد CNOMA با چالش‌هایی همراه است. تنظیم سطح آستانه‌ی همکاری (γ_{Th_1}) نقش کلیدی در تعادل بین عملکرد سیستم و مصرف انرژی دارد. کاهش γ_{Th_1} احتمال قطع ارتباط را کاهش می‌دهد، اما این بهبود با افزایش مصرف انرژی در کاربر رله و احتمال خطا در کاربر لبه‌ای همراه است. از سوی دیگر، افزایش γ_{Th_1} منجر به کاهش احتمال همکاری و در نتیجه افزایش احتمال قطع ارتباط می‌شود. این تعادل نشان‌دهنده‌ی ضرورت توسعه‌ی الگوریتم‌های هوشمند برای تنظیم پویای γ_{Th_1} است تا بتواند به‌صورت خودکار با تغییرات شرایط کانال و نیازهای کاربران سازگار شود. در نهایت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که CNOMA به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای بهبود ارتباطات در محیط‌های با تضعیف شدید کانال، به‌ویژه برای کاربران لبه‌ای سلولی، قابل توجه است. با این حال، برای دستیابی به عملکرد بهینه، نیاز به طراحی دقیق پارامترهای سیستم از جمله تخصیص توان و سطح آستانه‌ی همکاری وجود دارد. این یافته‌ها می‌تواند به عنوان

پایه‌ای برای تحقیقات آینده در زمینه‌ی بهینه‌سازی سیستم‌های مبتنی بر CNOMA و توسعه‌ی الگوریتم‌های هوشمند برای مدیریت منابع در شبکه‌های نسل آینده مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] J. Sheeba, V. Kumaravelu, and A. Imoize, "Rate maximization of cell-edge users through cooperative non-orthogonal multiple access," in *Proc. 4th Int. Conf. Signal Process. Commun. (ICSPC)*, 2023.

[2] T. Nguyen, S. Nguyen, P. Nguyen, and Y. Kim, "Evaluation of full-duplex SWIPT cooperative NOMA-based IoT relay networks over Nakagami-m fading channels," *Sensors*, vol. 22, no. 5, Art. no. 1974, 2022, doi: 10.3390/s22051974.

[3] F. Kara and H. Kaya, "Threshold-based selective cooperative-NOMA," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 7, pp. 1263–1266, 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2019.2914686.

[4] O. Alamu, T. Olwal, and K. Djouani, "Cooperative NOMA networks with simultaneous wireless information and power transfer: An overview and outlook," *Alexandria Eng. J.*, vol. 71, pp. 413–438, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.02.042.

[5] T. Do, D. da Costa, T. Duong, and B. An, "Improving the performance of cell-edge users in NOMA systems using cooperative relaying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 5, pp. 1883–1901, 2018, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2787994.

[6] X. Xing, J. Cao, and H. Zhou, "Improving quality of service for cell-edge users in D2D-relay networks," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 126, no. 2, pp. 1789–1804, 2022, doi: 10.1007/s11277-022-09825-8.

[7] C. Le, D. Do, and M. Voznak, "Wireless-powered cooperative MIMO NOMA networks: Design and performance improvement for cell-edge users," *Electronics*, vol. 8, no. 3, Art. no. 328, 2019, doi: 10.3390/electronics8030328.

[8] M. Shirazi and M. Zahabi, "A novel full-duplex relay selection and resource management in cooperative SWIPT NOMA networks," *J. Electr. Comput. Eng. Innov.*, vol. 11, no. 1, pp. 161–172, 2023, doi: 10.22061/jecei.2022.9043.546.

[9] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, Boston, MA: McGraw-Hill, 2002.

پاورقی‌ها:

[1] Non-Orthogonal Multiple Access
[2] Beyond fifth Generation
[3] Orthogonal Multiple Access
[4] Base Station
[5] Quality of Service
[6] Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access
[7] Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
[8] Transmit Antenna Selection
[9] Device to Device
[10] Power Assignment
[11] Signal to Interference & Noise Ratio
[12] Successive Interference Cancellation
[13] Maximum Ratio Combining
[14] Superposition Coding
[15] Additive White Gaussian Noise
[16] Outage Probability