

## Improving Cell-Edge User Connectivity in RIS-Assisted Wireless Networks via Cooperative NOMA and Vector Power Allocation

Asma Bagheri <sup>1\*</sup>, Mohammad Amin Karimi <sup>2</sup>

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.

<sup>1\*</sup> a.bagheri@esfarayen.ac.ir, bagheri.asma84@yahoo.com, <sup>2</sup> 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**— This paper investigates and enhances the connectivity of cell-edge users in fifth-generation (5G) and beyond cellular networks by leveraging advanced technologies such as multiple-input multiple-output (MIMO) systems, reconfigurable intelligent surfaces (RIS), and cooperative non-orthogonal multiple access (NOMA). In the proposed architecture, intra-cell users act as virtual relays and, by integrating direct, cooperative, and RIS-assisted reflective links, strengthen the communication reliability of cell-edge users in critical scenarios such as vehicular communications, unmanned aerial vehicle (UAV) control, and emergency response systems. To evaluate the performance, extensive statistical-numerical simulations based on the Monte Carlo method with one hundred thousand valid realizations have been conducted. The effects of several parameters such as the number of base station antennas, the number of RIS elements, signal-to-noise ratio (SNR), SNR and interference thresholds for near-user cooperative links, target SNR thresholds for far users, power allocation vectors, channel coefficients, and Nakagami- $m$  fading parameters are examined individually and jointly on the connection probability. Simulation results reveal that the proposed scheme significantly outperforms conventional and benchmark approaches, including orthogonal multiple access (OMA), non-orthogonal multiple access (NOMA), and cooperative variants without MIMO or RIS configurations. The proposed design achieves remarkable improvements in cell-edge connectivity under various fading environments such as Nakagami- $m$ , Rician, Rayleigh, and even more severe conditions, thus enhancing link success probability and spectral efficiency in dense and mission-critical scenarios of future cellular networks. Furthermore, while conventional cooperative schemes utilizing relays achieve only a 73.36% connectivity probability at an SNR of 10dB, the proposed architecture achieves a stable reliability level of 99.9% at a remarkably low SNR of 3dB with substantial power efficiency. These findings highlight the exceptional operational efficiency and robustness of the proposed scheme in securing reliable communication for cell-edge users.

**Keywords:** Cooperative non-orthogonal multiple access (CNOMA), Cell-edge users connectivity probability, multiple-input multiple-output (MIMO), Nakagami- $m$  fading, reconfigurable intelligent surfaces (RIS), vector power allocation.

## بهبود اتصال پذیری کاربران لبه‌ای در شبکه‌های سلولی بی‌سیم مبتنی بر سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر از طریق دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه و تخصیص توان برداری

اسما باقری<sup>۱\*</sup>، محمدامین کریمی<sup>۲</sup>

\* ۱- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، خراسان شمالی، ایران.

۲- دانشجوی مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، خراسان شمالی، ایران.

<sup>1\*</sup> a.bagheri@esfarayen.ac.ir, bagheri.asma84@yahoo.com, <sup>2</sup> 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: این مقاله به تحلیل و بهبود اتصال پذیری کاربران لبه سلول در شبکه‌های سلولی نسل پنجم و نسل‌های فراتر از آن با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته‌ای نظیر سامانه‌های چندورودی - چندخروجی، سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر و دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه می‌پردازد. در معماری پیشنهادی، کاربران درون سلولی به عنوان رله‌های مجازی عمل کرده و با ترکیب لینک‌های مستقیم، مشارکتی و بازتابی مبتنی بر سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، امکان تقویت ارتباط کاربران لبه‌ای در سناریوهای بحرانی نظیر ارتباطات خودرویی، کنترل پهپاد و سامانه‌های امدادی فراهم می‌شود. برای ارزیابی عملکرد، شبیه‌سازی آماری - عددی مبتنی بر روش مونت کارلو با صدهزار نمونه معتبر انجام شده و تأثیر عواملی نظیر تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه، تعداد المان‌های سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، نسبت سیگنال به نویز، آستانه‌های نسبت سیگنال به نویز و تداخل لازم برای لینک همکاری کاربر نزدیک، آستانه مورد نیاز برای کاربر دور، تخصیص توان برداری، ضرایب کانال و پارامترهای محوشدگی ناکاگامی -  $m$  به صورت مستقل و ترکیبی بر احتمال اتصال پذیری بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی نسبت به روش‌های متعارف و معیار شامل دسترسی چندگانه متعامد، دسترسی چندگانه غیرمتعامد و نسخه‌های همکارانه فاقد پیکربندی‌های چندورودی - چندخروجی و سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، بهبود قابل توجهی در اتصال کاربران لبه سلول در شرایط محوشدگی ناکاگامی، رایسین، رایلی و شدیدتر از رایلی ایجاد کرده و موجب افزایش نرخ موفقیت لینک و بهبود بهره‌وری طیفی در سناریوهای حساس و پرتراфик شبکه‌های سلولی آینده می‌شود. همچنین در شرایطی که طرح‌های مشارکتی متداول علی‌رغم بهره‌گیری از رله در نسبت سیگنال به نویز معادل 10dB تنها به احتمال اتصال پذیری 73.36% دست می‌یابند، معماری پیشنهادی قادر است با کاهشی محسوس در توان مصرفی، به سطح اطمینان پایداری 99.9% اتصال پذیری در نسبت سیگنال به نویز بسیار پایین 3dB دست یابد. این امر بیانگر کارایی عملیاتی فوق‌العاده طرح حاضر در تضمین ارتباطات کاربران لبه سلول است.

واژه‌های کلیدی: احتمال اتصال پذیری کاربران لبه سلولی، تخصیص توان برداری، چند ورودی - چند خروجی، دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه، سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، محوشدگی ناکاگامی -  $m$ .

## ۱- مقدمه

### ۱-۱- پیشینه تحقیق

دسترسی چندگانه متعامد<sup>۱</sup> به عنوان روش سنتی تخصیص منابع در نسل‌های اولیه شبکه‌های سلولی مبتنی بر جداسازی کاربران در حوزه‌های فرکانس، زمان یا کد است تا از بروز تداخل جلوگیری شود [۱]. در این روش، منابع رادیویی به صورت متعامد بین کاربران تقسیم می‌شوند که موجب سادگی در جداسازی سیگنال‌ها با پیچیدگی پایین در گیرنده می‌شود [۲]. با این حال، تعداد کاربران قابل پشتیبانی به شدت محدود به تعداد منابع متعامد موجود است [۳، ۴]. افزون بر این، پدیده‌های کانالی باعث تخریب خاصیت متعامد بودن می‌شوند [۵]. این رویکرد اگرچه در نسل‌های پیشین عملکرد قابل قبولی داشته، اما در مواجهه با ظرفیت بالا و بهره‌وری طیفی شبکه‌های نسل پنجم با محدودیت روبه‌رو است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به بازده طیفی پایین، عدم توانایی پشتیبانی همزمان از تعداد انبوهی کاربر و کاهش انعطاف‌پذیری در تخصیص منابع اشاره کرد [۶-۸]. این چالش‌ها، زمینه‌ساز ظهور تکنیک‌های نوینی مانند دسترسی چندگانه غیر متعامد<sup>۲</sup> شدند [۵].

دسترسی چندگانه غیرمتعامد، یک فناوری برای دسترسی به شبکه‌های فراتر از نسل پنجم<sup>۳</sup> است که تأخیر کم، قابلیت اطمینان بالا، بهره‌وری طیفی بهتر و پشتیبانی از تراکم اتصال را ارائه می‌دهد [۹]. این روش به چندین کاربر اجازه می‌دهد که به صورت غیرمتعامد و همزمان از یک منبع رادیویی مشترک استفاده کنند [۱۰]. این سازوکار با تداخل کنترل‌شده، اختصاص سطوح توان و استفاده از تفکیک‌پذیری، بهره‌وری طیفی و ظرفیت سیستم را افزایش می‌دهد. اما این امر باعث پیچیدگی در گیرنده و نیاز به گروه‌بندی بهینه کاربران می‌شود [۱۱]. از سوی دیگر، ارزیابی احتمال قطع ارتباط یکی از ارکان اساسی در تحلیل و طراحی شبکه‌های بی‌سیم محسوب می‌شود و نقش تعیین‌کننده‌ای در کمی‌سازی قابلیت اطمینان اتصال بین کاربران و ایستگاه پایه<sup>۴</sup> دارد. تجزیه و تحلیل این احتمال، ابزاری ضروری برای مدل‌سازی پایداری ارتباط، تضمین کیفیت خدمات<sup>۵</sup> و پیش‌بینی عملکرد شبکه فراهم می‌کند [۱۲].

تکنیک دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه<sup>۶</sup>، رویکردی پیشرفته در مخابرات بی‌سیم است که در آن کاربران نزدیک به ایستگاه پایه، به‌عنوان رله‌های مجازی عمل کرده و به کاربران دور (لبه سلول) در ارسال اطلاعات کمک می‌کنند [۱۳، ۱۴]. در فاز اول، ایستگاه پایه سیگنال ترکیبی کاربران را ارسال می‌کند و در فاز دوم، کاربر نزدیک که سیگنال کاربر دور را با موفقیت رمزگشایی کرده است، آن را برای

کاربر مورد نظر بازپخش می‌کند. این فرآیند دارای پتانسیل کاهش احتمال قطع و بهبود قابلیت اطمینان در برقراری ارتباط کاربران لبه‌ای در شبکه‌های تلفن همراه است [۱۵]. این امر به ویژه در شبکه‌ها و محیط‌های فاقد خط دید مستقیم<sup>۷</sup> حیاتی است. برخلاف دسترسی چندگانه غیرمتعامد در حوزه توان که بیشتر بر تخصیص نابرابر توان برای تفکیک سیگنال در گیرنده متکی است [۱۰، ۱۱]؛ این روش با استفاده از تنوع همکاری به طور مستقیم به تقویت نرخ داده قابل دستیابی و الگوی عملکرد کاربران لبه‌ای می‌پردازد. با این حال، خطا در حذف تداخل متوالی<sup>۸</sup> و وابستگی به مسیر کمکی، عملکرد سیستم را محدود می‌کند [۱۳].

چند ورودی - چند خروجی<sup>۹</sup> یک فناوری پیشرفته در سیستم‌های ارتباط بی‌سیم است که از چندین آنتن در فرستنده و گیرنده برای ارسال و دریافت همزمان چندین جریان داده استفاده می‌کند [۱۶]. معماری‌های این فناوری، ارسال همزمان داده‌های مستقل را از طریق تسهیم فضایی ممکن ساخته و با تعدد<sup>۱۰</sup> و تسهیم<sup>۱۱</sup> در حوزه‌ی فضایی<sup>۱۲</sup>، نه تنها منجر به افزایش نمایی ظرفیت کانال و بهره‌وری طیفی آن می‌شود [۱۷]؛ بلکه با استفاده از شکل‌دهی پرتو دیجیتال - هیبرید پیشرفته، بهره انرژی و بهره‌وری طیفی را در شرایط انتشار با خط دید مستقیم<sup>۱۳</sup> به طور همزمان بهینه می‌سازد [۱۸]. علاوه بر این، استقرار آنتن‌ها در چارچوب ورودی - خروجی چندگانه عظیم<sup>۱۴</sup>، بهره‌های حاصل از پیش‌کدگذاری مبتنی بر تخمین کانال در محدوده امواج میلی‌متری<sup>۱۵</sup> و زیر تراهرتز<sup>۱۶</sup>، امکان دستیابی به تأخیر بسیار کم و قابلیت اطمینان فوق‌العاده بالا<sup>۱۷</sup> را در کاربردهای حیاتی ارتباطات فراهم می‌آورد [۱۹]. توسعه این پیشرفت‌ها، این فناوری را به عنوان هسته مرکزی برای تحقق اتصالات ترابیتی، ارتباطات هولوگرافیک و شبکه‌های حسگر فراگیر در سامانه‌های نسل ششم<sup>۱۸</sup> تثبیت کرده است [۲۰].

سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر<sup>۱۹</sup>، یک فناوری تحول‌آفرین با بازطراحی محیط انتشار رادیویی مبتنی بر فرامواد در شبکه‌های بی‌سیم نسل ششم است که امکان دخالت هوشمند در محیط انتشار امواج الکترومغناطیسی را فراهم می‌کنند [۲۱]. این سطوح، یک ساختار مسطح متشکل از آرایه‌ای وسیع از تعداد زیادی المان‌های زیر طول موج و قابل تنظیم است که می‌تواند به صورت پویا، تغییر فاز کنترل‌پذیر و تغییر دامنه در امواج رادیویی فرودی را با مصرف توان ناچیز اعمال کند؛ برخلاف رله‌های متعارف، این سطوح به صورت غیرفعال عمل می‌کنند و تنها به انرژی ناچیزی برای بازپیکربندی نیاز دارند که امکان بهبود قابل توجه در نسبت سیگنال به نویز<sup>۲۰</sup>، بازدهی انرژی و مقیاس‌پذیری استثنایی را ارائه می‌دهند [۲۲]. با این حال، بهینه‌سازی فازهای سطوح هوشمند

بازپیکربندی‌پذیر در شرایط محوشدگی مرکب (ترکیب رایلی<sup>۲۱</sup> و لگ - نرمال<sup>۲۲</sup>) همچنان یک چالش حل‌نشده محسوب می‌شود [۲۳].

## ۲-۱- کارهای مرتبط

در شبکه‌های سلولی بی‌سیم، تحلیل اتصال‌پذیری برای تضمین موفقیت ارتباطات به‌ویژه برای کاربران واقع در لبه سلول حیاتی است. مطالعات فراوانی بر مدل‌سازی و تحلیل اتصال‌پذیری متمرکز شده‌اند که چگونه راهبردهای همکاری نظیر همکاری کاربران درون سلولی، رله‌گذاری تقویت - ارسال و رله‌گذاری رمزگشایی - ارسال می‌توانند اتصال‌پذیری و ارتقای عملکرد شبکه را فراهم کنند. در پژوهش [۲۴] با ارائه تحلیلی از فناوری دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه مبتنی بر انتقال همزمان اطلاعات و قدرت بی‌سیم<sup>۲۳</sup>، سازوکاری برای بهینه‌سازی متغیرهای سیستم، ارزیابی عملکرد (شامل احتمال قطع ارتباط و نرخ کل) و طراحی پروتکل‌های ارتباطی متنوع مطرح می‌شود. این تحلیل به بررسی عمیق مطالعات بر اساس نوع رله، تعداد رله‌ها و طرح‌های دسترسی چندگانه می‌پردازد. مکمل این پژوهش، کار [۲۵] بر افزایش قابلیت اطمینان و ظرفیت در سیستم‌های دسترسی چندگانه غیرمتعامد از طریق مخابره رله‌ای و به صورت سلسله‌مراتبی متمرکز است. در این معماری، کاربران نزدیک به عنوان رله‌های مجازی برای تسهیل ارتباط با کاربران دور عمل کرده و یک سازوکار کلیدزنی تطبیقی مبتنی بر کیفیت لینک شناخته‌شده پیاده‌سازی می‌کنند. در [۲۶]، عملکرد سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی مبتنی بر دسترسی چندگانه غیرمتعامد تحت شرایط حذف تداخل متوالی ناقص از طریق معیارهای ظرفیت و قطع ارتباط ارزیابی شده است، اما این مطالعه فاقد سازوکارهای همکاری رله مجازی و مدل‌سازی توان برداری است؛ با این حال، این مرجع در بخش نتایج شبیه‌سازی به‌عنوان یکی از مبانی مقایسه با معماری پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در [۲۷]، یک چارچوب پیچیده‌تر چند ورودی - چند خروجی مبتنی بر دسترسی چندگانه متعامد برای سیستم‌های نسل ششم اتخاذ شده که بر افزایش ظرفیت ارگودیک<sup>۲۴</sup> از طریق رله‌گذاری تمام دوطرفه<sup>۲۵</sup> تأکید دارد، اما فرضیات آن بر مدل محوشدگی ناکاگامی - ام<sup>۲۶</sup> استوار بوده و معیارهای اتصال‌پذیری را پوشش نمی‌دهد. کار ارائه‌شده در [۲۸] به بررسی دسترسی چندگانه غیرمتعامد مبتنی بر ترتیب توان در سامانه‌های ورودی - خروجی چندگانه عظیم با به‌کارگیری روش تک‌حاملی با برابرسازی در حوزه فرکانس<sup>۲۷</sup> می‌پردازد، اما دامنه آن به انتقال تک‌حاملی محدود شده و مدل‌سازی نسبت سیگنال به تداخل و نویز<sup>۲۸</sup> ویژه زیرکانال را شامل نمی‌شود. پژوهش [۲۹]، یک بررسی جامع از دسترسی چندگانه

غیرمتعامد در حوزه توان<sup>۲۹</sup> همکار یکپارچه‌شده با فناوری‌هایی مانند سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر و یادگیری ماشین<sup>۳۰</sup> ارائه می‌دهد، اما فاقد استنتاج تحلیلی یا کمی‌سازی عملکرد است. مطالعات [۳۰] و [۳۱] به ترتیب بر بهینه‌سازی قطع ارتباط و کمینه‌سازی توان از طریق پیکربندی‌های چند ورودی - چند خروجی در مقیاس بزرگ و راهبردهای شکل‌دهی پرتو متمرکزند؛ با این حال، متکی بر شبیه‌سازی‌ها بوده و رفتار احتمالی اتصال‌پذیری کاربر لبه‌ای را ثبت نمی‌کنند.

در [۳۲] یک مرور جامع از سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر نوظهور با قابلیت بازتاب و ارسال همزمان<sup>۳۱</sup> در زمینه شبکه‌های ارتباطی نسل ششم ارائه می‌شود که برخلاف سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر سنتی، پوشش 360 درجه برای کاربران دو سوی سطح فراهم می‌کند و براساس آرایش‌های افزایش پوشش، بهبود امنیت لایه فیزیکی<sup>۳۲</sup> با تغییر محیط انتشار، بیشینه‌سازی نرخ جمعی در ترکیب با دسترسی چندگانه غیرمتعامد، بهبود بهره‌وری انرژی<sup>۳۳</sup> و کاهش تداخل در سه پروتکل تغییر حالت<sup>۳۴</sup>، تقسیم انرژی<sup>۳۵</sup> و تغییر زمان<sup>۳۶</sup> می‌پردازد. درحالی که [۳۳] با تمرکز بر سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر سنتی تقویت شده با چند آنتن، مدل‌های مختلف کانال را با تلفات مسیر و مدل‌های فضایی پواسون همگن برای تحلیل توزیع کاربران و همچنین محوشدگی مقیاس کوچک مبتنی بر قضیه حد مرکزی<sup>۳۷</sup> بررسی می‌کند. با این حال، در هر دو مرجع [۳۲] و [۳۳] سازوکار دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه مورد توجه قرار نگرفته است. محدودیت اساسی پژوهش [۳۲] و [۳۳] در تخمین اطلاعات دقیق و به موقع حالت کانال به دلیل ماهیت غیرفعال سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر است که مکمل آن در کار [۳۴] با آموزش فنی و تحلیلی سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر سنتی و پیاده‌سازی مبتنی بر ساختارهای آرایه‌های بازتابی<sup>۳۸</sup> و فراسطح<sup>۳۹</sup> در دو مدل بازپراکنده‌سازی دوگانه<sup>۴۰</sup> و پراکندگی فضایی به برآورد اطلاعات حالت کانال بی‌سیم<sup>۴۱</sup> و بهبود عدد شرطی کانال<sup>۴۲</sup> برای ارتقای چندگانگی فضایی<sup>۴۳</sup> می‌پردازد. با این حال، تمرکز خاص بر استخراج اطلاعات حالت کانال بی‌سیم و انتقال اطلاعات توسط خود سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر در شرایط محدودیت وضوح فاز را در [۳۵] می‌توان یافت. برخلاف [۳۵-۳۲] که به اصول، مدل‌سازی کانال و بهینه‌سازی کلی سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر می‌پردازد؛ [۳۶]، تحلیلی بر بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی در سیستم‌های چند ورودی - تک خروجی<sup>۴۴</sup> چند کاربره در ارتباطات پایین‌دست<sup>۴۵</sup> با سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر و مقایسه آن با رله‌های تقویت و ارسال<sup>۴۶</sup> سنتی ارائه می‌دهد که در نتایج عددی، بهبود بهره‌وری انرژی سطوح

هوشمند بازپیکربندی‌پذیر را تا 300% بالاتر از رله‌های تقویت - ارسال نشان می‌دهد. با اینکه در این پژوهش‌ها با یکپارچه‌سازی سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر و سازوکارهای دسترسی چندگانه غیرمتعامد به افزایش بهره‌وری طیفی و اتصال همزمان کاربران پرداخته شده است، با این حال فاقد مکانیزم‌های همکاری با کاربران درون سلولی (یا نزدیک‌تر) به عنوان رله‌های مجازی برای کاهش قطع ارتباط کاربران لبه سلول (دورتر) است.

در پژوهش [۳۷] یک سیستم چندکاربره مبتنی بر امواج میلی‌متری با کمک سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر با هدف کمینه‌سازی سن اطلاعات<sup>۴۷</sup> ارائه شده است. در این کار، زمان‌بندی کاربران، تخصیص توان ارسالی و تنظیم ضرایب فازی عناصر سطوح هوشمند به صورت مشترک مدل‌سازی شده و مسئله بهینه‌سازی به شکل یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوفی<sup>۴۸</sup> فرموله می‌شود که با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق مبتنی بر گرادینان سیاست قطعی عمیق<sup>۴۹</sup> حل می‌گردد. اگرچه این رویکرد می‌تواند تازگی اطلاعات در شبکه را بهبود دهد، اما تمرکز اصلی آن بر معیار سن اطلاعات بوده و مسائل مربوط به کاربران لبه سلول و احتمال قطعی ارتباط را مستقیماً بررسی نمی‌کند. از سوی دیگر، پژوهش [۳۸] با بهره‌گیری از یادگیری عمیق و شبکه حافظه بلندمدت کوتاه‌مدت دوطرفه<sup>۵۰</sup> بر بهبود نرخ خطای بیت<sup>۵۱</sup> در سیستم‌های چندحاملی تمرکز دارد و هدف آن افزایش دقت آشکارسازی سیگنال در حضور نویز و محوشدگی است؛ با این حال، مسائل سطح شبکه مانند قابلیت اتصال کاربران، به‌ویژه کاربران لبه سلول و تحلیل احتمال قطعی در معماری‌های تعاونی را در نظر نمی‌گیرد. در حالی که در این مقاله، عملکرد سیستم در کانال‌های ناکاگامی، رایسین<sup>۵۲</sup> و رایلی و در چندین سناریوی مختلف و معماری متفاوت مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته و تأثیر پارامترهای ساختاری و طراحی سیستم بر احتمال اتصال کاربران به‌طور جامع ارزیابی شده است.

### ۱-۳- نوآوری‌های مقاله حاضر

در مقابل، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از یک معماری نوین ترکیبی مبتنی بر دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکاری، سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی و با تجدید آرایش سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر، به تحلیل آماری و بهبود اتصال‌پذیری کاربران لبه سلول که در آن تخصیص توان به صورت برداری و عبارات نسبت سیگنال به تداخل و نویز برای زیرکانال‌ها ادغام شده است می‌پردازد. برخلاف پژوهش‌های پیشین مانند [۲۵] و [۲۶] که تنها بر همکاری ساده یا مدل‌های تخصیص توان متمرکز بودند، این مقاله با ارائه یک مدل سیستم چندلایه و چندکاربره، امکان مدیریت هوشمند تداخل

و بهبود نرخ داده را از طریق یک راهبرد تصمیم‌گیری دو حالتی مبتنی بر مقایسه نسبت سیگنال به تداخل و نویز و آستانه برای فعال‌سازی همکاری با سوئیچینگ تطبیقی بر اساس نرخ داده هدف فراهم می‌کند. همچنین، برخلاف کارهای [۳۲] و [۳۳] که تنها به نقش غیرفعال سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر در بهبود نسبت سیگنال به نویز پرداخته‌اند، در این تحقیق از سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر به صورت فعال در مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم برای افزایش بهره‌وری سیستم و کاهش قطع ارتباط استفاده شده است. علاوه بر این، با به‌کارگیری روش‌های تحلیلی پیشرفته و شبیه‌سازی‌های گسترده، بهبود معناداری در نرخ قطع ارتباط و بهره‌وری طیفی سیستم نسبت به روش‌های متعارف مانند دسترسی چندگانه متعامد و دسترسی چندگانه غیرمتعامد بدون همکاری حاصل شده است. نکته مهم این است که هیچ یک از مطالعات پیشین به هدف اصلی مقاله ما، یعنی استخراج بیان آماری - عددی برای بهبود احتمال اتصال‌پذیری کاربر لبه سلول در سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی مجهز به سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر که مبتنی بر دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکاری با تخصیص توان برداری و در شرایط مختلف کانال نظیر ناکاگامی، رایسین، رایلی و شدیدتر از رایلی باشد، نپرداخته است. در حالی که در کار اخیر ما نیز به مسئله‌ای مشابه پرداخته شده بود، مدل ارائه‌شده به یک سیستم تک‌آنتنه محدود بوده و سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر را در نظر نمی‌گرفت؛ از این رو امکان بهره‌گیری از تنوع فضایی و بررسی سناریوهای کانالی با غالب بودن مؤلفه دید مستقیم یا شرایط محوشدگی چندمسیره در آن فراهم نبود [۳۹]. در ادامه و در امتداد همان پژوهش، در کار بعدی خود، با توسعه مدل ارائه‌شده در [۳۹]، ساختار سیستم را به یک معماری چند ورودی - چند خروجی ارتقا دادیم و بیان تحلیلی فرم‌بسته‌ای برای احتمال اتصال‌پذیری کاربران در مدل پایین‌دست استخراج کردیم [۴۰]. با این حال، در آن مطالعه نیز سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر در مدل سیستم لحاظ نشده و اثر مسیرهای بازتابی و پیوندهای مشارکتی مبتنی بر این فناوری مورد بررسی قرار نگرفته بود. همچنین، در یکی دیگر از کارهای اخیر ما، اتصال‌پذیری کاربران لبه سلول در شبکه‌های مبتنی بر دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکاری برای سناریوهای فراتر از نسل پنجم و ششم تحت کانال‌های رایلی هم‌بسته بررسی شد و با استفاده از نظریه کاپولا، فرم بسته احتمال اتصال‌پذیری کاربر لبه‌ای استخراج گردید [۴۱]. با وجود در نظر گرفتن لینک‌های مشارکتی و هم‌بستگی کانال، این مطالعه نیز از تخصیص توان برداری و ساختار چند ورودی - چند خروجی بهره نبرده و بر معماری‌های مبتنی بر سطوح هوشمند

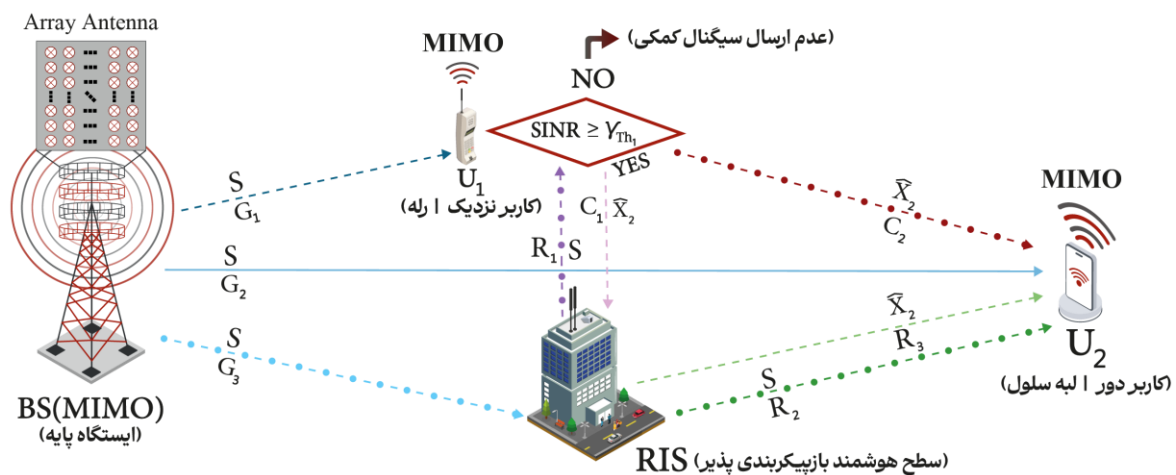
بازپیکربندی پذیر متمرکز نبوده است. در شبکه‌های سلولی بی‌سیم، تحلیل احتمال قطع ارتباط برای اطمینان از برقراری ارتباط موفق، به ویژه برای کاربران دور بسیار حیاتی است. این پژوهش گامی مهم در جهت تحقق ارتباطات پایدار، پوشش قابل اطمینان و ظرفیت بالا برای کاربران لبه‌ای در شبکه‌های نسل آینده محسوب می‌شود. همچنین معماری پیشنهادی می‌تواند در شرایط بحرانی و مأموریت‌محور، نظیر سامانه‌های امداد و نجات، ارتباطات اضطراری، کنترل پهپادها<sup>۵۳</sup> و ارتباطات خودرویی که نیازمند پایداری و قابلیت اطمینان بالای لینک‌های مخابراتی هستند، کاربرد قابل توجهی داشته باشد.

در این مقاله، مشارکت‌ها و نوآوری‌های اصلی به ترتیب در سه محور خلاصه می‌شوند: ۱- ارائه یک معماری جامع برای تحلیل اتصال پذیری کاربران لبه سلول در سامانه‌های دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه با در نظر گرفتن ساختارهای تک ورودی - تک خروجی، چند ورودی - چند خروجی و با بهره‌گیری از سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، ۲- بررسی عملکرد شبکه‌های سلولی بی‌سیم در سناریوها و معماری‌های مختلف تحت مدل‌های گوناگون کانال نظیر محوشدگی ناکاگامی -  $m$ ، راپسین، راپلی و شدیدتر از راپلی<sup>۵۴</sup> و ۳- ارائه یک مقایسه جامع و یکپارچه آماری - عددی با ساختارهای متعارف و مرجع که نشان می‌دهد معماری حاضر به‌طور معناداری اتصال پذیری کاربران لبه‌ای را بهبود می‌بخشد.

## ۲- مدل سیستم

این بخش، مدل لایه فیزیکی مسیر پایین دست یک شبکه سلولی

در مرحله اول، ایستگاه پایه با استفاده از تکنیک دسترسی چندگانه غیرمتعامد برای ارسال سیگنال به کاربران از طریق لینک‌های مستقیم استفاده می‌کند که شامل اثرات تضعیف مسیر و محوشدگی چند مسیره راپلی است. این مسیر پایه‌ای‌ترین منبع دریافت سیگنال برای کاربران است. در شکل ۱،  $a_{1i}$  و  $a_{2i}$  ضرایب تخصیص توان<sup>۵۶</sup> برای هر کاربر بر روی زیر کانال  $i$  - ام و  $x_1$  و  $x_2$  سیگنال‌های کاربران را نشان می‌دهند. بدون از دست دادن کلیت، فرض می‌شود که  $a_{1i} < a_{2i}$  است، زیرا  $U_1$  و  $U_2$  بر اساس فاصله‌ی تصادفی و محدود از ایستگاه پایه، به ترتیب به عنوان کاربر درون سلولی و کاربر لبه سلولی فرض شده‌اند. سیگنال ارسالی ایستگاه پایه علاوه بر مسیرهای مستقیم به کاربران، به سمت سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر نیز ارسال می‌شود.



$$S = A_1 x_1 + A_2 x_2 \text{ where } A_1 \triangleq [\sqrt{a_{11}}, \sqrt{a_{12}}, \dots, \sqrt{a_{1N}}]^T \in R^{N \times 1} \text{ and } A_2 \triangleq [\sqrt{a_{21}}, \sqrt{a_{22}}, \dots, \sqrt{a_{2N}}]^T \in R^{N \times 1}$$

شکل ۱- مدل سیستم چند ورودی - چند خروجی مجهز به سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر با بهره‌گیری از تکنیک دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه

بازتابی سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر به ترتیب با  $N$  و  $M$  نشان داده می‌شوند. برای اطمینان از وضوح و جلوگیری از ابهامات نمادین، تمامی کانال‌ها را به‌طور صریح تعریف می‌کنیم به‌طوری که لینک‌های مستقیم و لینک‌های تقویت شده توسط کاربر نزدیک (رله مجازی) و سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر از یکدیگر مجزا شوند. رابطه (۱)، ماتریس بازتاب سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر را روی زیر کانال‌های  $i$  معرفی می‌کند [۴۳]:

$$\Theta_i = \text{diag}(e^{j\phi_{1i}}, \dots, e^{j\phi_{Mi}}), \quad \Theta_i \in \mathbb{C}^{M \times M}, \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad (1)$$

که در آن  $\Theta_i$  یک ماتریس قطری  $M \times M$  به ابعاد  $M \times M$  با درایه‌های  $e^{j\phi_{Mi}}$  روی قطر اصلی است. هر درایه‌ی قطر اصلی این ماتریس بیانگر ضریب بازتاب فازی است که توسط هر عنصر سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر (از مجموع  $M$  عنصر) روی زیر کانال  $i$  اعمال شود. با تغییر زاویه‌ی فازی  $\phi_{Mi}$  سیگنال دریافتی، امکان کنترل هوشمند مسیر انتشار فراهم می‌شود. شکل ۱، بهره‌ی کانال‌ها را روی لینک‌های مختلف سیستم نمایش می‌دهد. کانال هر لینک با عضوی از مجموعه‌ی  $\{G_1, G_2, G_3, R_1, R_2, R_3, C_1, C_2\}$  مدل‌سازی می‌شود. در این مجموعه، هر ضریب از اعضای  $\{g_{1i}, g_{2i}, g_{3ji}, c_{1ji}, c_{2i}\}$  بهره‌ی کانال متناظر در زیر کانال  $i - m$  را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که در ضرایبی مانند  $c_{1ji}$  و  $g_{3ji}$ ، این بهره علاوه بر زیر کانال  $i - m$ ، به المان  $j - m$  سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر نیز وابسته است. همچنین، هر ضریب از مجموعه  $\{r_{1j}, r_{2j}, r_{3j}\}$  بیانگر بهره‌ی کانال متناظر با المان  $j - m$  آرایه سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر است. در این مدل، هر کانال با توجه به مسیر، گیرنده - فرستنده و نوع لینک، ابعاد و توزیع خود را دارد. برای مثال،  $g_{1i}$  و  $\sigma_{1i}^2$  به ترتیب بهره کانال مستقیم ایستگاه پایه به کاربر نزدیک و واریانس ضرایب کانال (یا توان میانگین محوشدگی) را نشان می‌دهند. رابطه (۲)، توزیع ریلی محوشدگی چندمسیره در مقیاس کوچک را که در محیط‌های بی‌سیم رایج است، ارائه می‌دهد. در این رابطه، کانال‌های مرتبط با لینک‌های  $\{G_1, G_2, C_2\}$  (که در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند) به صورت زیر بازنویسی می‌شوند.

$$G_1 \triangleq \begin{bmatrix} g_{11} \\ g_{12} \\ \vdots \\ g_{1N} \end{bmatrix}, \quad G_2 \triangleq \begin{bmatrix} g_{21} \\ g_{22} \\ \vdots \\ g_{2N} \end{bmatrix}, \quad C_2 \triangleq \begin{bmatrix} c_{21} \\ c_{22} \\ \vdots \\ c_{2N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $i \in \{1, \dots, N\}$  بوده و  $g_{1i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{1i}^2)$ ،  $G_1 \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  نشان‌دهنده تعداد آنتن‌ها یا زیر کانال‌های سیستم می‌باشد و به‌طور مشابه برای مسیر کانال‌های  $\{G_2, C_2\}$  نیز برقرار است که در بالای صفحه بعد بازنویسی شده است. در تعریف روابط، فرض شده است

در فاز اول از مرحله دوم، سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر که از یک آرایه‌ی متشکل از  $M$  المان بازتاب‌کننده تشکیل شده است، این سیگنال فرودی را دریافت می‌کند. هر المان سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر با اعمال یک تاخیر فاز کنترل شده ( $\phi_{Mi}$ ) برای المان  $M - i$  ام در زیر کانال  $i - m$  که توسط یک کنترل‌کننده مرکزی تنظیم می‌شود، پاسخ فرکانسی کانال را به‌طور هوشمندانه بازپیکربندی می‌کند. این عمل منجر به ایجاد یک الگوی بازتاب هدفمند می‌شود که سیگنال دریافتی را نه به صورت یکنواخت در همه جهات، بلکه به صورت بهینه‌شده به سمت کاربران مورد نظر متمرکز و هدایت می‌کند. بنابراین، هر کاربر علاوه بر دریافت سیگنال از مسیر مستقیم، یک نسخه‌ی تقویت‌شده‌ی هم‌فاز (یا به‌طور کلی بهینه‌شده) از سیگنال را نیز از طریق مسیر غیرمستقیم - BS - RIS - User دریافت می‌کند که در نهایت برای بهبود نرخ داده و قابلیت اطمینان ادغام می‌شوند. همچنین در فاز دوم، یک طرح همکاری مبتنی بر آستانه فرض می‌شود که در آن کاربری که شرایط کانالی بهتری در مجموع همه زیر کانال‌ها دارد، می‌تواند به عنوان رله مجازی به حفظ ارتباط کاربر لبه سلول کمک کند. یعنی اگر نسبت توان سیگنال به مجموع تداخل و نویز در  $U_1$  بیشتر از یک مقدار آستانه مبتنی بر نرخ داده هدف با محیط و کیفیت کانال باشد ( $i.e., \gamma_{Th1}$ )، این کاربر وارد فاز همکاری می‌شود. برای انجام این کار،  $U_1$  باید ابتدا سیگنال کاربر دور را استخراج کند. برای این منظور، سیگنال خود را به عنوان نویز در نظر می‌گیرد و از لغو پی‌درپی تداخل‌ها برای آشکارسازی سیگنال کاربر لبه سلول (که با توان بالاتر ارسال شده بود) استفاده می‌کند. پس از استخراج موفقیت‌آمیز، این کاربر سیگنال همکاری ( $i.e., \hat{x}_2$ ) خود را به صورت مستقیم از طریق لینک  $U_1 - U_2$  به کاربر لبه سلول ( $U_2$ ) با شرایط کانال ضعیف‌تر ارسال می‌کند. در این فاز از مرحله دوم، سیگنال  $\hat{x}_2$  به سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر نیز ارسال می‌شود.

در مرحله سوم، سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر سیگنال همکاری را مشابه مرحله قبل به کاربران ارسال می‌کند. در این سناریو،  $U_2$  سیگنال‌هایی را هم از ایستگاه پایه در طی یک فاز و هم از  $U_1$  و سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر در طی دو فاز دریافت می‌کند و سپس از تکنیک ترکیب نسبت حداکثری  $\hat{x}_2$  برای دستیابی به حداکثر نسبت سیگنال به تداخل و نویز استفاده می‌کند. به دلیل وجود مسیرهای متعدد بازتاب و پراکندگی، سیگنال دریافتی می‌تواند به طور تصادفی تقویت یا تضعیف شود. در روابط (۲) تا (۱۰) تضعیف رایی برای مدل‌سازی هر مسیر در تمام زیر کانال‌ها با ضرایب مستقل در محیط‌های شهری پر از موانع و بدون خط دید مستقیم فرض می‌شود. تعداد کل آنتن‌ها (زیر کانال‌های متعامد) و المان‌های

$$R_1 \triangleq \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ \vdots \\ r_{1M} \end{bmatrix}, R_2 \triangleq \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{22} \\ \vdots \\ r_{2M} \end{bmatrix}, R_3 \triangleq \begin{bmatrix} r_{31} \\ r_{32} \\ \vdots \\ r_{3M} \end{bmatrix}, \begin{cases} r_{1j} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{1j}^2), R_1 \in \mathbb{C}^{M \times 1} \\ r_{2j} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{2j}^2), R_2 \in \mathbb{C}^{M \times 1} \\ r_{3j} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{3j}^2), R_3 \in \mathbb{C}^{M \times 1} \end{cases}, \begin{cases} g_{1i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{1i}^2), G_1 \in \mathbb{C}^{N \times 1} \\ g_{2i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{2i}^2), G_2 \in \mathbb{C}^{N \times 1} \\ c_{2i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{2i}^2), C_2 \in \mathbb{C}^{N \times 1} \end{cases} \quad (3)$$

$$G_3 \triangleq \begin{bmatrix} g_{311} & g_{312} & \dots & g_{31N} \\ g_{321} & g_{322} & \dots & g_{32N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{3M1} & g_{3M2} & \dots & g_{3MN} \end{bmatrix}, C_1 \triangleq \begin{bmatrix} c_{111} & c_{112} & \dots & c_{11N} \\ c_{121} & c_{122} & \dots & c_{12N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1M1} & c_{1M2} & \dots & c_{1MN} \end{bmatrix}, \begin{cases} g_{3ji} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{3ji}^2), G_3 \in \mathbb{C}^{M \times N} \\ c_{1ji} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{1ji}^2), C_1 \in \mathbb{C}^{M \times N} \end{cases} \quad (4)$$

ایستگاه پایه، سیگنال تقویت شده به  $U_1$  برسد.

کانال موثر پایه برای دریافت سیگنال‌های مبتنی بر تکنیک دسترسی چندگانه متعامد (بدون همکاری) در کاربر لبه سلولی با ترکیب مسیر مستقیم  $BS \rightarrow U_2$  و مسیر بازتابی سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر به کاربر لبه سلول  $BS \rightarrow RIS \rightarrow U_2$  در رابطه زیر بازنویسی می‌شود.

$$H_2^{eff} = G_2^T + H_2^{RIS}, H_2^{eff} = [h_{21}^{eff}, h_{22}^{eff}, \dots, h_{2N}^{eff}] \in \mathbb{C}^{1 \times N} \quad (6)$$

در این رابطه  $H_2^{RIS} \triangleq R_2^T \Theta_i G_3$ ، مشابه  $H_1^{RIS}$  نشان‌دهنده یک بردار  $\mathbb{C}^{1 \times N}$  است با این تفاوت که مسیر ترکیبی  $BS \rightarrow RIS \rightarrow U_2$  را روی زیر کانال  $i$  - ام توصیف می‌کند [۴۳]. در واقع با تنظیم  $\Theta_i$  انرژی سیگنال به سمت  $U_2$  به صورت متمرکز هدایت می‌شود و بهره کانال موثر به طور محسوسی افزایش می‌یابد.

کانال همکاری مستقیم و چند مرحله‌ای کاربر نزدیک با کاربر لبه سلول، تنها زمانی موثر است که شرط آستانه برای فعال‌سازی سوئیچینگ ارضا شده باشد؛ در غیر این صورت، کاربر درون سلولی هیچگاه سیگنال‌های همیاری را برای کاربر دور ارسال نمی‌کند و گره در حالت غیرفعال باقی می‌ماند. رابطه (۷)، مجموع سه مسیر همکارانه مستقیم و چند مرحله‌ای کاربران نشان دهد که در آن  $H_c^{RIS} = R_3^T \Theta_i C_1$  در مرحله سوم، بهره مسیر  $U_1 \rightarrow RIS \rightarrow U_2$  را فرموله می‌کند [۴۳]. رله مجازی، داده سیگنال همکاری ( $\hat{x}_2$ ) ارسال شده به سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر در مرحله دوم را با استفاده از تنظیم فاز بازتاب‌ها به سمت کاربر لبه سلولی به صورت همافز ترکیب و بازپخش می‌کند.

$$H_c^{eff} = C_2^T + H_c^{RIS} = [h_{c1}^{eff}, \dots, h_{cN}^{eff}] \in \mathbb{C}^{1 \times N} \quad (7)$$

در بخش پیوست مقاله، در جداول (۲) و (۳) به ترتیب بهره و ضرایب کانال‌ها، زیرکانال‌ها و مسیرهای متناظر در سیستم و همچنین نمادها و پارامترهای سیستم به همراه تعاریف آن‌ها ارائه شده است.

که توان سیگنال دریافتی در زیرکانال‌ها به صورت آماری مستقل بوده و تغییرات تصادفی و واقعی کانال‌های بی‌سیم را مدل می‌کند. با همین رویکرد، مدل‌های کانال برای سایر مسیرهای مشخص شده اعم از  $\{R_1, R_2, R_3\}$  و  $\{G_3, C_1\}$  به ترتیب در روابط (۳) و (۴) نیز در پایین همین صفحه تعریف می‌شوند.

در این روابط،  $j \in \{1, 2, \dots, M\}$  نشان‌دهنده تعداد عناصر بازتابی سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر است. به این ترتیب، روابط (۲) تا (۴)، مدل‌های چند ورودی - چند خروجی را برای تمام مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم کمک‌شده با سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر به همراه طرح‌های مشارکتی کاربر درون سلولی بازنویسی می‌کنند.

### ۳- مدل‌سازی نوین کانال‌های موثر در شبکه‌های سلولی بی‌سیم نسل آینده

در چارچوب مدل‌سازی نوین کانال‌های موثر، برای توصیف دقیق تعامل سیگنال‌ها در حضور سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر و کاربران درون و لبه سلولی، مسیرهای ارتباطی متنوع باید به صورت یکپارچه در نظر گرفته شوند. روابط (۵) تا (۷) مسیرهای ترکیبی، مستقیم و همکارانه را به صورت ریاضی فرمول‌بندی می‌کنند. رابطه (۵)، کانال مؤثر بین ایستگاه پایه و کاربر درون سلولی را به صورت مجموعی از مسیر مستقیم  $BS \rightarrow U_1$  (که توسط ترانهاده بردار کانال ستونی  $G_1$  مدل می‌شود) و مسیر غیرمستقیم کمکی حاصل از بازتاب سیگنال از سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر توصیف می‌کند. این ترکیب، همزمان باعث افزایش توان دریافتی در کاربر درون سلولی می‌شود و اثر انسداد یا محوشدگی شدید را کاهش می‌دهد.

$$H_1^{eff} = G_1^T + H_1^{RIS} = [h_{11}^{eff}, h_{12}^{eff}, \dots, h_{1N}^{eff}] \in \mathbb{C}^{1 \times N} \quad (8)$$

در این رابطه  $H_1^{RIS} \triangleq R_1^T \Theta_i G_3$ ، نشان‌دهنده یک بردار  $\mathbb{C}^{1 \times N}$  است که مسیر ترکیبی  $BS \rightarrow RIS \rightarrow U_1$  را در زیر کانال  $i$  - ام مدل می‌کند [۴۳]. ماتریس قطری  $\Theta_i$  نیز فاز بازتاب عناصر سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر را تنظیم می‌کند تا پس از ارسال پیام

#### ۴- تحلیل آماری احتمال اتصال ارتباط کاربر لبه سلولی در شبکه‌های سلولی بی‌سیم مبتنی بر آستانه سوئیچینگ

در مرحله اول ارتباط، ایستگاه پایه از کدگذاری برپوششی<sup>۵۹</sup> استفاده کرده و سیگنال کل کاربران را ارسال می‌کند و در فاز اول از مرحله دوم، سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر با ایجاد یک الگوی بازتاب هدفمند، سیگنال‌ها را به کاربران بازارسال می‌کند. بنابراین، سیگنال دریافت شده توسط کاربر نزدیک ( $U_1$ ) به صورت رابطه (۸) در پایین همین صفحه نوشته می‌شود که در آن  $H_1^{eff} \triangleq [h_{11}^{eff}, h_{12}^{eff}, \dots, h_{1N}^{eff}]$ ، کانال موثر کاربر نزدیک ( $U_1$ ) است. هر ضریب  $h_{1i}^{eff}$  نشان‌دهنده بهره کانال موثر بین آنتن  $i$  - ام ایستگاه پایه و کاربر نزدیک از طریق لینک‌های مستقیم  $BS \rightarrow U_1$  و بازتابی  $BS \rightarrow RIS \rightarrow U_1$  می‌باشد. بردارهای تخصیص توان سیگنال‌های پیام  $x_1$  و  $x_2$  به ترتیب با نمادهای متناظر با کاربر اول  $A_1 \triangleq [\sqrt{a_{11}}, \sqrt{a_{12}}, \dots, \sqrt{a_{1N}}]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  و متناظر با کاربر دوم  $A_2 \triangleq [\sqrt{a_{21}}, \sqrt{a_{22}}, \dots, \sqrt{a_{2N}}]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  نمایش داده می‌شوند که در آن،  $a_{ki}$  نشان‌دهنده توان تخصیص یافته به سیگنال  $x_k \in \{x_1, x_2\}$  در آنتن  $i$  - ام است. این ساختار امکان توزیع انعطاف‌پذیر و متنوع توان را برای هر سیگنال دلخواه در بین  $N$  آنتن فراهم می‌کند. در این رابطه،  $P_T$  و  $n_1$  به ترتیب توان کل ارسال شده در ایستگاه پایه و نویز گوسی سفید جمع‌شونده<sup>۶۰</sup> را نشان می‌دهند. سیگنال دریافت شده توسط کاربر لبه سلول از طریق مسیر مستقیم و بازتابی (بدون همکاری کاربر درون سلولی) به صورت رابطه (۹) در انتهای همین صفحه فرموله می‌شود.

بنابراین، در مرحله اول و فاز اول از مرحله دوم مخابره سیگنال پیام،  
 $SINR \triangleq \frac{\text{توان سیگنال مطلوب}}{\text{توان نویز} + \text{توان تداخل کاربری}}$  دریافت شده در کاربران به صورت روابط زیر نوشته می‌شود:

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{1i} |h_{1i}^{eff}|^2}{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{2i} |h_{2i}^{eff}|^2 + 1} \quad (۱۰)$$

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{2i} |h_{2i}^{eff}|^2}{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{1i} |h_{1i}^{eff}|^2 + 1} \quad (۱۱)$$

که در آن  $\gamma_0 = \frac{P_T}{N_0}$  میانگین نسبت سیگنال به نویز را نشان می‌دهد. همچنین تا قبل از فاز دو از مرحله دوم، نسبت سیگنال به تداخل و نویز دریافت شده در  $U_1$  از سیگنال ارسال شده برای  $U_2$ ، زمانی که  $U_1$  سیگنال خود را به عنوان نویز یا تداخل در نظر می‌گیرد (با نماد  $\gamma_{c1}$ )، به صورت زیر داده می‌شود:

$$\gamma_{c1} = \frac{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{2i} |h_{1i}^{eff}|^2}{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{1i} |h_{1i}^{eff}|^2 + 1} \quad (۱۲)$$

حال، اگر نسبت سیگنال به تداخل و نویز در  $U_1$  بیشتر از مقدار آستانه‌ی همکاری مبتنی بر نرخ داده هدف باشد ( $i.e., \gamma_{c1} \geq \gamma_{Th1}$ )، در فاز دو از مرحله دوم ارتباط، سیگنال همکاری را به  $U_2$  و سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر ارسال می‌کند که با  $\hat{x}_2$  نمایش داده می‌شود. بنابراین، سیگنال دریافت شده توسط کاربر لبه سلول در این فاز به صورت زیر است:

$$\gamma_{c1} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N n_{c1i} & ; \gamma_{c1} < \gamma_{Th1} \\ \sum_{i=1}^N \sqrt{P_T c_{2i}} \hat{x}_{2i} + n_{c1i} & ; \gamma_{c1} \geq \gamma_{Th1} \end{cases} \quad (۱۳)$$

در اینجا،  $n_{c1i}$  نویز گوسی سفید جمع‌شونده توزیع شده به صورت  $CN(0, N_0)$  است. با بازارسال سیگنال همکاری به  $U_2$  توسط سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر، در مرحله سوم، رابطه (۱۳) تکمیل شده و سیگنال کل دریافت شده توسط  $U_2$  از طریق همکاری مستقیم و

$$\begin{aligned} y_1 &= \sqrt{P_T} H_1^{eff} (A_1 x_1 + A_2 x_2) + n_1 = \sqrt{P_T} \cdot [h_{11}^{eff}, h_{12}^{eff}, \dots, h_{1N}^{eff}] \left( \begin{bmatrix} \sqrt{a_{11}} \\ \sqrt{a_{12}} \\ \vdots \\ \sqrt{a_{1N}} \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} \sqrt{a_{21}} \\ \sqrt{a_{22}} \\ \vdots \\ \sqrt{a_{2N}} \end{bmatrix} x_2 \right) + n_1 \\ &= \sqrt{P_T} \sum_{i=1}^N h_{1i}^{eff} (\sqrt{a_{1i}} x_1 + \sqrt{a_{2i}} x_2) + n_1 \end{aligned} \quad (۸)$$

$$\begin{aligned} y_2 &= \sqrt{P_T} H_2^{eff} (A_1 x_1 + A_2 x_2) + n_2 = \sqrt{P_T} \cdot [h_{21}^{eff}, h_{22}^{eff}, \dots, h_{2N}^{eff}] \cdot \left( \begin{bmatrix} \sqrt{a_{11}} \\ \sqrt{a_{12}} \\ \vdots \\ \sqrt{a_{1N}} \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} \sqrt{a_{21}} \\ \sqrt{a_{22}} \\ \vdots \\ \sqrt{a_{2N}} \end{bmatrix} x_2 \right) + n_2 \\ &= \sqrt{P_T} \sum_{i=1}^N h_{2i}^{eff} (\sqrt{a_{1i}} x_1 + \sqrt{a_{2i}} x_2) + n_2 \end{aligned} \quad (۹)$$

تداخل مورد نیاز برای رمزگشایی صحیح پیام کاربر لبه سلول در کاربر  $U_1$  است.

جمله اضافی  $\Delta_{min}$  تضمین می‌کند که همکاری تنها در صورتی به فعلیت می‌رسد که لینک‌های همکارانه مستقیم و غیر مستقیم، بهبود عملکرد کافی و معناداری فراهم کند. این موضوع از همکاری‌های غیر ضروری که منجر به افزایش مصرف انرژی و اضافه‌بار سیگنالینگ<sup>۶۴</sup> می‌شوند درحالی که سود اندکی ارائه می‌دهند، جلوگیری می‌کند. منطق افزودن  $\Delta_{min}$  دو جنبه اساسی امکان‌پذیری رمزگشایی و بهره‌وری منابع را به همراه دارد. حتی اگر  $U_1$  بتواند سیگنال کاربر لبه سلول را آشکارسازی کند، همکاری ممکن است سودمند نباشد اگر بهبود حاصل شده در کاربر لبه سلول ناچیز باشد. همچنین همکاری شامل هزینه‌هایی مانند توان ارسال، استفاده از طیف و پردازش است. با تحمیل یک حداقل بهره همکارانه، سیستم از فعال شدن رله در شرایطی که بازدهی کافی ندارد جلوگیری می‌کند. بر این اساس  $\Delta_{min}$  به صورت زیر انتخاب شود.

$$\Delta_{min} \leq \gamma_c = \frac{\gamma_0 \sum_{i=1}^N |h_{c_i}^{eff}|^2}{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{1i} |h_{2i}^{eff}|^2 + 1} \quad (18)$$

که تضمین می‌کند بهبود حاصل از انتقال همکارانه، از یک آستانه از پیش تعیین شده فراتر می‌رود. همچنین یک انتخاب عملی برای  $\Delta_{min}$  می‌تواند به شکل تابعی از یک پارامتر طراحی باشد که حداقل بهبود سودمند بهره‌ی همکاری قابل قبول را فراهم کند.

$$\gamma_c = \gamma_{c_1} + \gamma_{c_2} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N n_{c_i} = \sum_{i=1}^N n_{c_{1i}} + n_{c_{2i}} & ; \gamma_{c_1} < \gamma_{Th_1} \\ \sum_{i=1}^N \sqrt{P_T} h_{c_i}^{eff} \hat{x}_{2i} + n_{c_i} = \sum_{i=1}^N \sqrt{P_T} (c_{2i} + h_{c_i}^{RIS}) \hat{x}_{2i} + n_{c_{1i}} + n_{c_{2i}} & ; \gamma_{c_1} \geq \gamma_{Th_1} \end{cases} \quad (14)$$

$$\gamma_{tot_2} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \sqrt{P_T} h_{2i}^{eff} (\sqrt{a_{1i}} x_{1i} + \sqrt{a_{2i}} x_{2i}) + n_2 & ; \gamma_{c_1} < \gamma_{Th_1} \\ \sum_{i=1}^N \sqrt{P_T} (h_{c_i}^{eff} \hat{x}_{2i} + h_{2i}^{eff} (\sqrt{a_{1i}} x_{1i} + \sqrt{a_{2i}} x_{2i})) + n_{c_i} + n_2 & ; \gamma_{c_1} \geq \gamma_{Th_1} \end{cases} \quad (15)$$

$$\gamma_{tot_2} = \begin{cases} \gamma_2 = \frac{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{2i} |h_{2i}^{eff}|^2}{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{1i} |h_{2i}^{eff}|^2 + 1} & ; \gamma_{c_1} < \gamma_{Th_1} \\ \gamma_2 + \gamma_c = \frac{\gamma_0 (\sum_{i=1}^N a_{2i} |h_{2i}^{eff}|^2 + \sum_{i=1}^N |h_{c_i}^{eff}|^2)}{\gamma_0 \sum_{i=1}^N a_{1i} |h_{2i}^{eff}|^2 + 1} & ; \gamma_{c_1} \geq \gamma_{Th_1} \end{cases} \quad (16)$$

غیر مستقیم کاربر نزدیک به صورت رابطه (۱۴) در انتهای صفحه بازنویسی می‌شود.

کاربر لبه سلول، از ترکیب نسبت حداکثری برای سیگنال‌های دریافت‌شده در سه مرحله استفاده می‌کند و سیگنال کل دریافت شده توسط  $U_2$  به صورت رابطه (۱۵) در بالای صفحه بعدی تکمیل می‌شود. بنابراین، نسبت سیگنال به تداخل و نویز کل دریافت شده در  $U_2$  به صورت رابطه (۱۶) در بالای صفحه بعدی نوشته می‌شود.

## ۵- طراحی بهینه آستانه فعال‌سازی همکاری مبتنی بر نرخ داده هدف و بازده انرژی

احتمال اتصال ارتباط کاربر به عنوان احتمال اینکه نسبت سیگنال به تداخل و نویز دریافتی کاربر بیشتر از یک مقدار آستانه لازم مبتنی بر مشخصات مدولاسیون و کدینگ<sup>۶۵</sup>، نرخ داده هدف و احتمال خطای مجاز جهت آشکارسازی پیام مربوطه باشد، تعریف می‌شود. تحلیل عددی و بهبود احتمال اتصال ارتباط کاربر در لبه سلول، هدف اصلی این مقاله است؛ بنابراین، ما احتمال اتصال  $U_2$  را به عنوان احتمال اینکه نسبت سیگنال به تداخل و نویز دریافت‌شده در کاربر بیشتر از حد مرزی باشد محاسبه می‌کنیم. با توجه به اینکه ضرایب محوشدگی کانال و همچنین احتمال تصمیم‌گیری برای همکاری در  $U_1$  مستقل هستند؛ ما آستانه فعال‌سازی همکاری برای کاربر درون سلولی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\gamma_{Th_1} = \max\{2^{R_{x_2}} - 1, \Delta_{min}\} \quad (17)$$

که در آن  $R_{x_2}$  بر مبنای رابطه شانون، نرخ داده هدف کاربر لبه سلول را نشان می‌دهد [۴۴] و  $2^{R_{x_2}} - 1$  حداقل نسبت سیگنال به نویز و

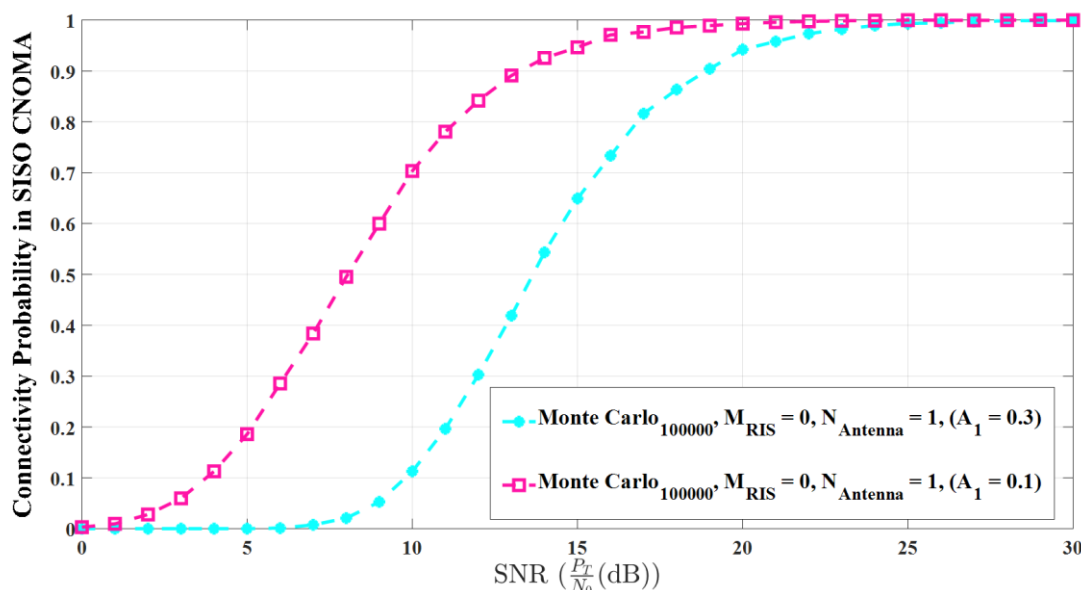
نظر گرفته و بدین ترتیب از دیدگاه کاربر لبه‌سلول، عبارات را تحت سناریوهای واقعی محوشدگی، تخصیص توان همکارانه با سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر در مقایسه با مدل‌های مشابه تک ورودی - تک خروجی و بدون مشارکت با سطوح هوشمند بررسی می‌کند. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، یک سلول دایره‌ای با شعاع 400 متر و یک ایستگاه پایه در مرکز سلول در نظر گرفته شده است. موقعیت کاربر رله مجازی (یا نزدیک) و سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر به صورت تصادفی یکنواخت در فاصله 10 تا 250 متری از ایستگاه پایه و کاربر لبه‌سلول به طور تصادفی یکنواخت در فاصله 400 تا 500 متری از ایستگاه پایه قرار داده شده است. با توجه به تنوع سناریوهای بررسی‌شده، سایر پارامترهای شبیه‌سازی به طور دقیق در عنوان شکل مربوطه مشخص شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها امکان ارزیابی اثر بهینه‌سازی فاز سطوح هوشمند بر احتمال اتصال کاربران لبه سلول را فراهم می‌کنند.

شکل ۲ نتایج حاصل از ارزیابی احتمال اتصال کاربر لبه سلول، بدون مشارکت با سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر را با خروجی‌های عددی روش مونت کارلو برای مقادیر مختلف سیگنال به نویز متوسط (یعنی نسبت توان کل ارسالی ایستگاه پایه به توان نویز  $(\gamma_0 = \frac{P_T}{N_0})$ ) در دو استراتژی متمایز تخصیص توان نرده‌ای در مدل تک ورودی - تک خروجی مبتنی بر دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه مقایسه می‌کند. برای ارزیابی جامع‌تر، مقایسه برای دو حالت تقسیم توان 0.1 و 0.3 برای  $a_1$  انجام می‌شود که در هر دو حالت  $a_2 = 1 - a_1$  در نظر گرفته شده است.

این تعریف اطمینان می‌دهد که همکاری تنها زمانی فعال شود که یا برای برآوردن کیفیت ارتباط و خدمات شبکه کاربر لبه سلولی ضروری است، یا زمانی که لینک تعاونی حداقل به اندازه پارامتر طراحی بهبود ایجاد کند. این رویکرد بازدهی انرژی و بهره‌وری سیستم را در شبکه‌های سلولی بی‌سیم مبتنی بر ورودی - خروجی چندگانه، بهینه می‌کند.

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، بیان عددی احتمال اتصال کاربر لبه سلول در یک سیستم سلولی چند ورودی - چند خروجی با مشارکت سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر و مبتنی بر دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه از طریق شبیه‌سازی رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب<sup>۶۳</sup> مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی نتایج روابط، از روش مونت کارلو استفاده شده است؛ روشی آماری که عملکرد سیستم‌های بی‌سیم را تحت شرایط تصادفی کانال نظیر محوشدگی رایلی، راسین و ناکاگامی یا کانال‌های همبسته‌ی تک ورودی - تک خروجی و چند ورودی - چند خروجی شبیه‌سازی می‌کند. در این شبیه‌سازی، تعداد زیادی نمونه مستقل از ضرایب کانال و پارامترهای کاربران تولید شده و بر اساس آن‌ها نسبت سیگنال به تداخل و نویز و نتایج اتصال کاربران لبه سلول محاسبه می‌شود. با تجمیع نتایج در بیش از 100,000 تکرار، برآورد دقیقی از احتمال اتصال به دست می‌آید که اثرات غیرخطی نسبت سیگنال به نویز و مولفه‌های تداخلی وابسته را که از نظر تحلیلی غیرقابل دسترس هستند، در



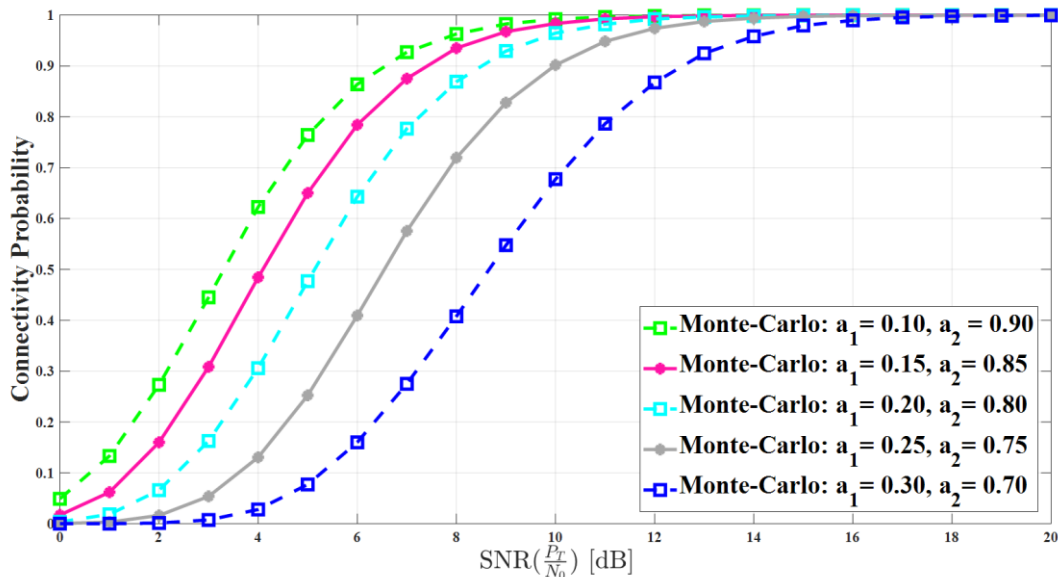
شکل ۲- احتمال اتصال ارتباط کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر میانگین SNR مختلف در سیستم  $SISO_{CNOMA}$  بدون تجهیز با RIS  
 $(\sigma_1^2 = \sigma_c^2 = 0\text{dB}, \sigma_2^2 = -3\text{dB}, \gamma_{Th1} = 1.5, \gamma_{Th2} = 2, N_{Antenna} = 1, M_{RIS} = 0)$

213.11% برتری اتصال پذیری سناریوی پنجم را به همراه دارد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش سطح آستانه‌ی تصمیم به همکاری در گره رله، اتصال‌پذیری کاربر لبه‌ای به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ زیرا احتمال همکاری کاربر  $U_1$  کاهش می‌یابد. برای مثال، هنگامی که  $\gamma_{Th1}$  این مولفه از مقادیر اولیه کم مانند 1 و 2 به مقادیر بالاتر شامل 3 و 4 افزایش می‌یابد، احتمال اتصال‌پذیری کاربر دور در  $\gamma_0 = 10 \text{ dB}$  به طور یکنواخت از 13.34% تا 39.91% کاهش می‌یابد. با این حال، افت شدید اتصال‌پذیری کاربر دور در سناریوهای سوم، چهارم و پنجم به ترتیب در مقادیر آستانه همکاری ( $\gamma_{Th1}$ ) برابر با 2.75، 4.5 و 1 با سقوط از 80% اتصال‌پذیری رخ می‌دهد. اگرچه این رویکرد در ظاهر احتمال اتصال‌پذیری کاربران دور را کاهش می‌دهد اما تضمین می‌کند که مشارکت تنها در صورتی به فعلیت می‌رسد که لینک‌های همکاری، بهبود عملکرد کافی و معناداری را فراهم کند. بنابراین مقدار آستانه تصمیم برای فعال‌سازی همکاری به طور مستقیم به نرخ داده هدف کاربر لبه‌ای وابسته است؛ به طوری که با افزایش نرخ داده هدف، مقدار نسبت سیگنال به نویز و تداخل مورد نیاز برای رمزگشایی صحیح سیگنال نیز افزایش می‌یابد.

در نتیجه، گره رله تنها در شرایطی وارد فرآیند همکاری می‌شود که مطابق روابط (۱۷) و (۱۸)، بتواند سیگنال کاربر لبه‌ای را با مقدار نسبت سیگنال به نویز و تداخل حداقل برابر با  $2^{R_{x2}} - 1$  آشکارسازی کرده و به این ترتیب نرخ داده هدف کاربر دور را تضمین

نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که در توان کل ارسالی، احتمال اتصال کاربر لبه سلول در  $\gamma_0 = 10 \text{ dB}$  در حالت  $a_1 = 0.1$  حدود 661% بیشتر از حالت  $a_1 = 0.3$  است. همچنین با تعمیم شکل ۲، ارتقاء سیستم و تعریف کانال محوشدگی جدید با پارامتر ناکاگامی ( $m, \Omega$ ) و تقریب آن با مدل رایسین با  $m_l > 1$  در شکل ۳ تأیید می‌شود که در توان کل ارسالی، احتمال اتصال کاربر لبه سلول در مدل فیزیکی پایه در  $\gamma_0 = 10 \text{ dB}$  (در حالتی که  $a_1 = 0.1$ ) حدود 146.44%، 110%، 102.84% و 101% به ترتیب بیشتر از حالت  $a_1$  برابر با 0.3، 0.25، 0.2 و 0.15 در سایر سناریوها است. علت این امر افزایش نسبت سیگنال به نویز و تداخل لینک مستقیم ایستگاه پایه به کاربر لبه سلول و همچنین افزایش آن در کاربر درون سلولی برای رمزگشایی پیام کاربر لبه سلول می‌باشد که در نتیجه در پی آن، احتمال ارسال مشارکتی افزایش می‌یابد. این مزیت از سناریوی اول در کل بازه‌ی نسبت سیگنال به نویز به‌ویژه در  $\gamma_0 = 6.5 \text{ dB}$  با عبور از مرز 90% نسبت به سایر سناریوها حفظ می‌شود. این برتری، مؤید تاثیر شگرف تخصیص بهینه توان بر احتمال اتصال‌پذیری کاربران لبه‌ای در شرایط بحرانی همراه با ترافیک و کیفیت نامطلوب کانال است؛ نمود بیشتر این تأثیر در سناریوی چهارم ( $a_1 = 0.25, a_2 = 0.75$ ) در حالی که  $\gamma_0 = 8 \text{ dB}$  است، تنها با 0.05 اختلاف در ضرایب تخصیص توان نسبت به سناریوی پنجم ( $a_1 = 0.20, a_2 = 0.80$ )، به افزایش احتمال اتصال‌پذیری و پوشش پایدار تا 176.47% منتج می‌شود. این سیر جهشی با مقایسه دو سناریوی سوم و پنجم،

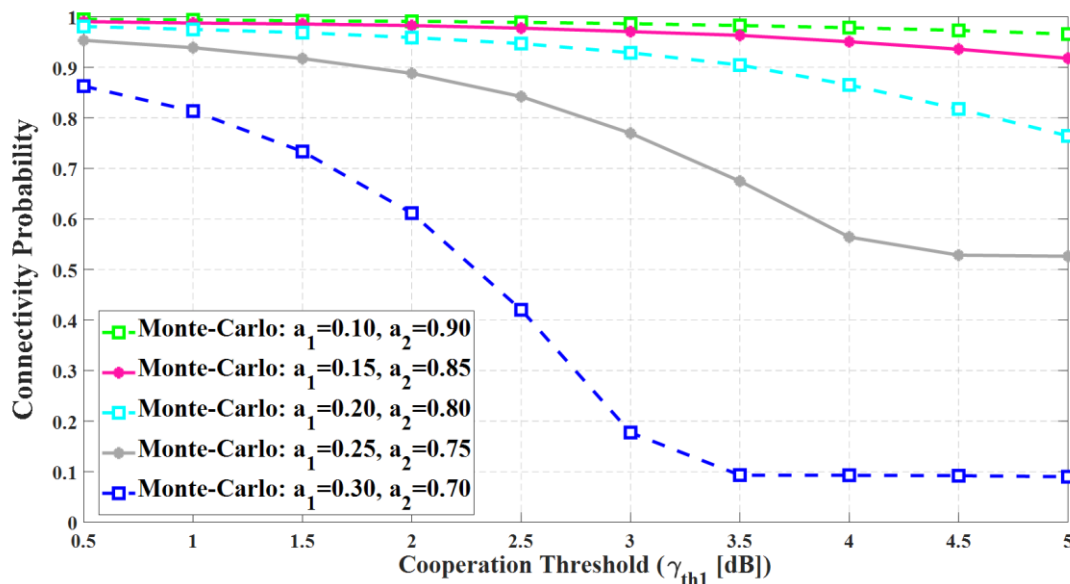


شکل ۳- احتمال اتصال‌پذیری کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر میانگین SNR مختلف در سیستم‌های مبتنی بر CNOMA تحت پنج سناریوی متفاوت

( $Monte - Carlo_{100000} \rightarrow m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 2, \Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \Omega_4 = \Omega_5 = 1, \gamma_{Th1} = 1.5, \gamma_{Th2} = 2$ )  
CASE<sub>1</sub>: ( $a_1 = 0.1$ ), CASE<sub>2</sub>: ( $a_1 = 0.15$ ), CASE<sub>3</sub>: ( $a_1 = 0.2$ ), CASE<sub>4</sub>: ( $a_1 = 0.25$ ), CASE<sub>5</sub>: ( $a_1 = 0.30$ )

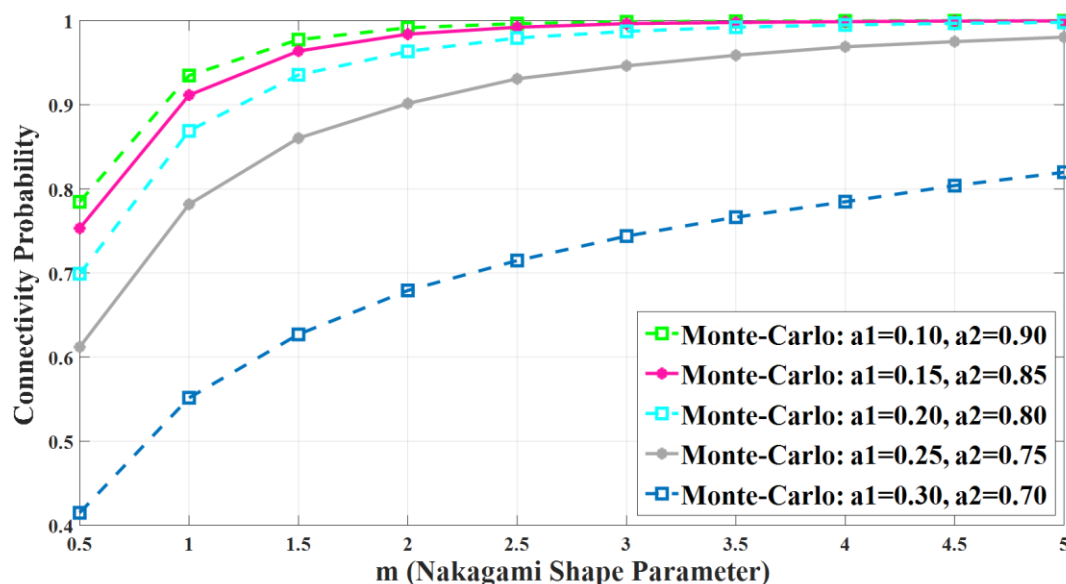
محوشدگی را به صورت فشرده ارزیابی و مقایسه کرد. برای این منظور، با فرض میانگین نسبت سیگنال به نویز  $\gamma_0 = 10 \text{ dB}$  در سناریوی سوم از شکل ۵ (با  $a_1 = 0.2, a_2 = 0.8$ ) در صورتی که پارامتر شکل کانال محوشدگی ناکاگامی  $m = 1$  باشد، این حالت دقیقاً برابر با مدل رایلی و با اتصال‌پذیری 86.91% در محیط‌های

کند. در شکل ۳ و ۴ به تحلیل تاثیرات  $\gamma_{Th1}$  و  $\gamma_0$  در سیستم مورد مطالعه پرداختیم؛ با این حال، یکی از اهداف این مقاله در مدل‌سازی لایه فیزیکی شبکه سلولی بی‌سیم (شکل ۱) متمرکز بر جامعیت کانال محوشدگی ناکاگامی -  $m$  می‌باشد که نتایج آن در شکل ۵ نهفته است. در این شکل، همزمان می‌توان توزیع مدل‌های مختلف



شکل ۴- احتمال اتصال‌پذیری کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر متفاوت سطح آستانه‌ی تصمیم به همکاری در گره رله در سیستم‌های مبتنی بر CNOMA

( $Monte - Carlo_{100000} \rightarrow m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 2, \Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \Omega_4 = \Omega_5 = 1, \gamma_0 = 10 \text{ dB}, \gamma_{Th2} = 2$ )  
CASE<sub>1</sub>: ( $a_1 = 0.1$ ), CASE<sub>2</sub>: ( $a_1 = 0.15$ ), CASE<sub>3</sub>: ( $a_1 = 0.2$ ), CASE<sub>4</sub>: ( $a_1 = 0.25$ ), CASE<sub>5</sub>: ( $a_1 = 0.30$ )

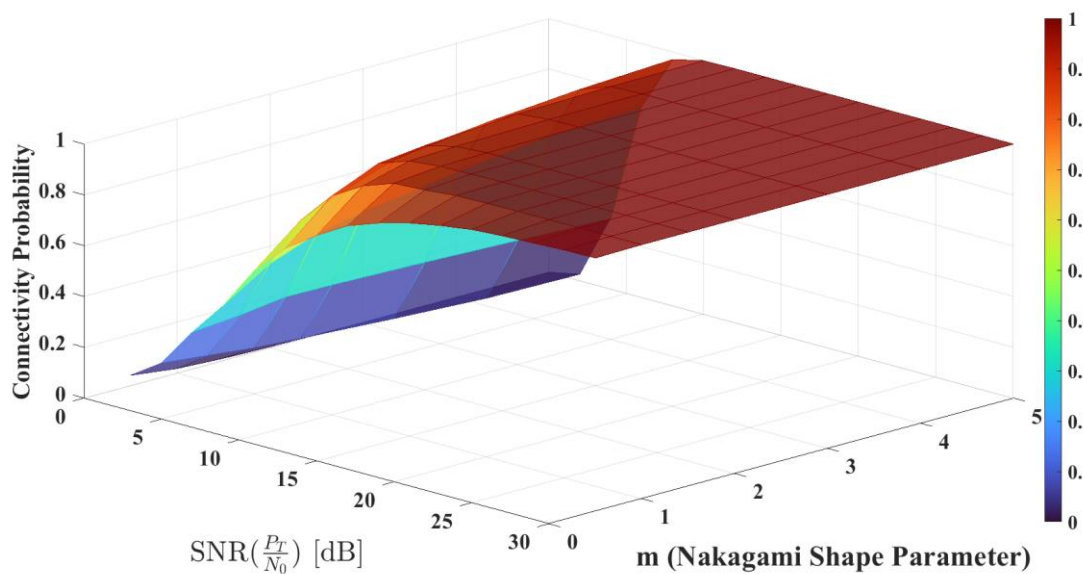
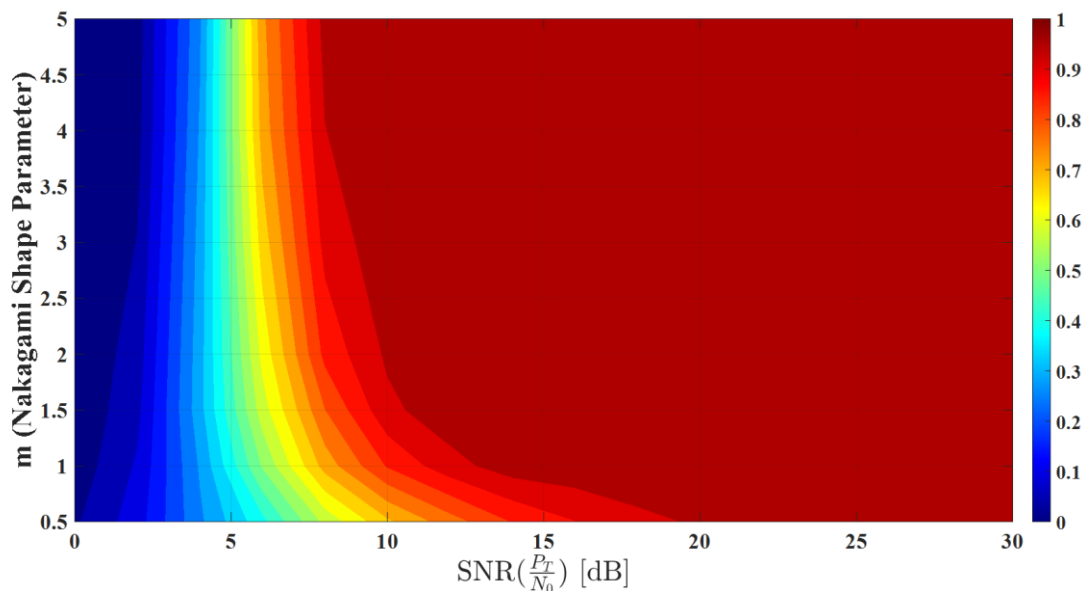


شکل ۵- احتمال اتصال‌پذیری کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر متفاوت پارامتر شکل مدل ناکاگامی -  $m$  در سیستم‌های مبتنی بر CNOMA

( $Monte - Carlo_{100000} \rightarrow \Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \Omega_4 = \Omega_5 = 1, \gamma_{Th1} = 1.5, \gamma_{Th2} = 2$ )  
CASE<sub>1</sub>: ( $a_1 = 0.1$ ), CASE<sub>2</sub>: ( $a_1 = 0.15$ ), CASE<sub>3</sub>: ( $a_1 = 0.2$ ), CASE<sub>4</sub>: ( $a_1 = 0.25$ ), CASE<sub>5</sub>: ( $a_1 = 0.30$ )

لبه‌ای را می‌توان با تقریب و برازش در مدل وایبول<sup>۶۴</sup> و لگ - نرمال از محوشدگی ناکاگامی -  $m$  برای محیط‌های با پراکندگی سنگین و زیررایلی ( $m < 1$ ) با نوسانات شدید نیز استخراج کرد. بنابراین مدل حاضر قابلیت انعطاف‌پذیری بالا در شرایط مختلف کانال را دارد. شکل ۶ با جمع‌بندی شکل ۳ و ۵ رفتار احتمال اتصال‌پذیری شبکه را به صورت تابعی از میانگین نسبت سیگنال به نویز و پارامتر شکل کانال ناکاگامی -  $m$  با تخصیص توان سناریوی سوم ( $a_1 = 0.2, a_2 = 0.8$ ) نمایش می‌دهد. همان گونه که در نمودارهای حرارتی مشاهده می‌شود، با افزایش توان سیگنال ارسالی و نیز با افزایش مقدار  $m$  که

شهری متراکم (برای مثال بین ساختمان‌ها) می‌باشد. برخلاف توزیع نمایی توان در مدل رایلی، این ارزیابی (مشروط بر  $m > 1$ ) در  $m = 3$  با کانال محوشدگی رایسین و توزیع توان غیرنمایی مدل شده و به مقدار قابل توجه اتصال‌پذیری 98.73% در محیط‌های با فضای باز یا نیمه‌باز می‌رسد. هرچند در مدل‌های رایلی ( $m = 1$ ) و رایسین ( $m = 3$ )، احتمال قطع ارتباط به ترتیب کم‌تر از 13.09% و 1.27% است اما در محیط‌های با محوشدگی شدیدتر (یعنی در  $m < 1$ ) با پارامتر شکل  $m = 0.5$  میزان اتصال‌پذیری کاربر دور تا 69.91% کاهش می‌یابد. این میزان از کاهش احتمال اتصال‌پذیری کاربر



شکل ۶- نمای سه بعدی و دو بعدی (حرارتی) احتمال اتصال‌پذیری کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر میانگین SNR و پارامتر شکل کانال محوشدگی ناکاگامی

( $Monte - Carlo_{100000} \rightarrow \text{CASE: } (a_1 = 0.2, a_2 = 0.8), \Omega = 1, \gamma_{Th_1} = 1.5, \gamma_{Th_2} = 2$ )

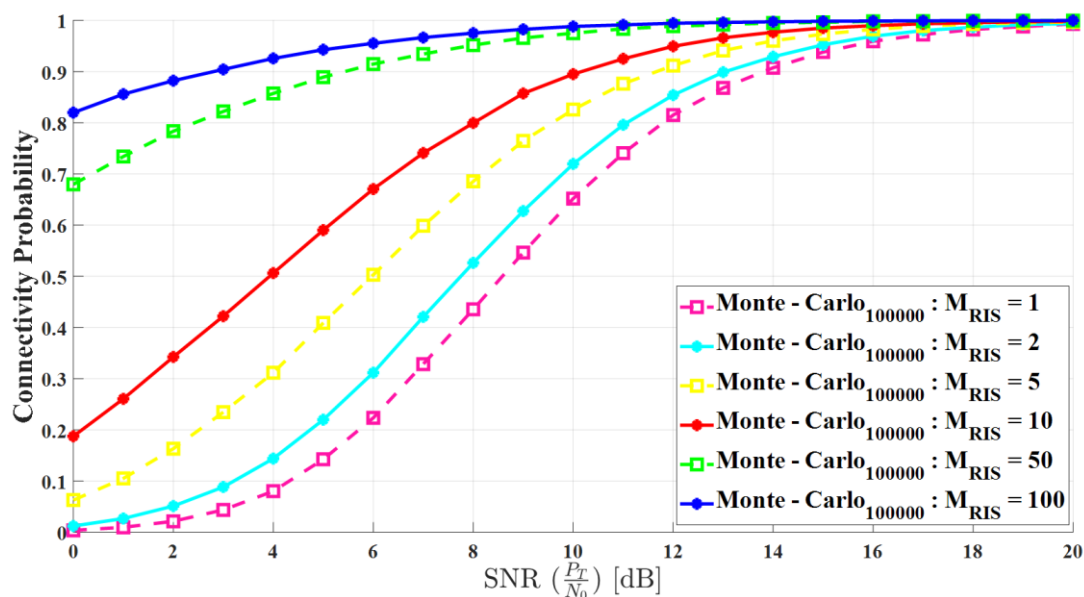
شبکه مانند اتوماسیون‌های صنعتی و کنترل ربات‌ها، ارتباطات بین خودروها و خودرو - زیرساخت، پزشکی از راه دور، کنترل پهپادها و سیستم‌های امدادی و اضطراری استخراج کرد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد عناصر بازتاب‌کننده‌ی سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر، عملکرد اتصال کاربر لبه‌ی سلول به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. هنگامی که تعداد عناصر از مقادیر اولیه کم (1,2) به مقادیر بالاتر شامل (5,10,50,100) افزایش می‌یابد، احتمال اتصال کاربر دور در  $\gamma_0 = 5dB$  از 286% تا 657% به طور یکنواخت رشد می‌کند. علت اساسی این روند در دو جنبه کلیدی از آرایش‌بندی سیستم نهفته است. نخست، افزایش تعداد عناصر سبب تقویت توان سیگنال دریافتی در سمت کاربر لبه‌ای شده و افت شدید ناشی از فاصله، تضعیف سیگنال در مسیر انتشار یا تضعیف کانال را جبران می‌کند. دوم، وجود تعداد زیاد عناصر امکان ایجاد تنوع فضایی و بهره‌گیری از اصول مشابه سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی<sup>۶۵</sup> را فراهم می‌سازد. به بیان دیگر، سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر با فراهم کردن مسیرهای بازتابی متعدد و قابل تنظیم، مانند یک آرایه‌ی آنتن بزرگ عمل کرده و هم‌ترازی فاز سیگنال‌ها را ممکن می‌سازد. این موضوع سبب می‌شود که سیگنال‌ها به صورت سازنده در سمت کاربر لبه‌ای ترکیب شده و نسبت سیگنال به نویز و تداخل بهبود یابد. در نتیجه، افزودن سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر نه تنها به عنوان یک تقویت‌کننده‌ی کانال عمل می‌کند، بلکه نوعی قابلیت شبه چند ورودی - چند خروجی.

بیانگر کاهش شدت محوشدگی کانال است، احتمال اتصال پذیری به طور یکنواخت افزایش یافته و به مقادیر نزدیک به یک میل می‌کند. نمودار سه بعدی، روند صعودی و پیوسته‌ی بهبود عملکرد سیستم را با افزایش همزمان  $\gamma_0$  و کیفیت کانال نشان می‌دهد. این بهبود به عنوان مولفه اساسی قابلیت اطمینان و پایداری بالای ارتباط شبکه‌های سلولی بی‌سیم به تدریج از نواحی آبی یا تیره به سمت

نواحی روشن تر مانند زرد افزایش می‌یابد. از طرفی در این نمودار، شیب زیاد در بخش‌های پایین  $\gamma_0$  بیانگر حساسیت شدید سیستم به تغییرات توان است که برای درک رفتار کلی سیستم و روابط غیر خطی بین پارامترها استفاده می‌شود. نمودار دو بعدی از شکل ۶ به عنوان نقشه راه تحلیل نمودار قبل، امکان شناسایی و تحلیل سریع نواحی عملکردی مطلوب شبکه را فراهم می‌سازد. این دو نمایش مکمل یکدیگر بوده و در تحلیل تطبیقی تأثیر پارامترهای کانال و توان انتقال بر پایداری لینک در سامانه‌های دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه کاربرد دارند.

با توجه به شکل ۵، در بازه  $\gamma_0 = (0, 5) dB$  به ازای تمام مقادیر  $m$  احتمال قطع ارتباط بیش از 50% است؛ این مقدار در بازه  $\gamma_0 = (5, 10) dB$  به طور یکنواخت کم شده تا آنجا که در  $\gamma_0 = 10 dB$  به ازای پارامتر شکل مدل محوشدگی ناکاگامی  $m = 1.75$  می‌توان به احتمال قطع نزدیک به 0.03% رسید. بنابراین متکی بر نتایج شبیه‌سازی سیستم حاضر، می‌توان به صورت بلادرنگ، نقطه کار دقیق پایداری و ارتباطات فوق‌العاده با اعتماد را برای شرایط بحرانی



شکل ۷- تأثیر تعدد عناصر بازتاب‌کننده RIS بر احتمال اتصال پذیری کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر میانگین SNR مختلف در سیستم CNOMA

$$Monte - Carlo_{100000} \rightarrow M_{RIS} = [1, 2, 5, 10, 50, 100]$$

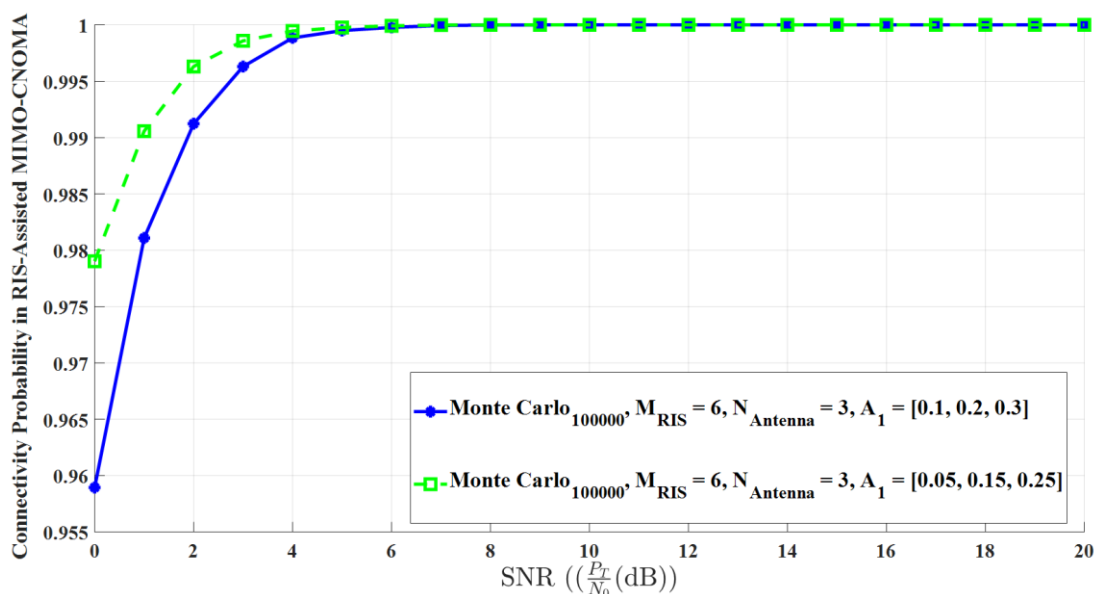
$$(a_1 = 0.2, a_2 = 0.8, \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_{3i}^2 = -3dB, \sigma_{4i}^2 = \sigma_5^2 = \sigma_{6i}^2 = -6dB, \sigma_{7i}^2 = -8dB, \gamma_{Th2} = 2)$$

خروجی مبتنی بر دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه به طور کمی تبیین می‌نمایند. در جدول ۱، احتمال اتصال پذیری کاربر لبه‌ای حاصل از نتایج شبیه‌سازی، برای تنظیمات مختلف پارامترهای سیستم و معماری‌های نوین شبکه‌های سلولی بی‌سیم ارائه شده است. این پارامترها شامل تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه ( $N$ )، تعداد المان‌های سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر ( $M$ )، نسبت سیگنال به نویز ( $\gamma_0$ )، آستانه‌های مورد نیاز نسبت سیگنال به نویز و تداخل برای لینک همکاری کاربر نزدیک ( $\gamma_{Th1}$ )، آستانه مورد نیاز کاربر دور ( $\gamma_{Th2}$ )، ضرایب تخصیص توان ( $A_1$ )، ضرایب کانال و پارامترهای محوشدگی ناکاگامی ( $m$ ) است که شرایط کانالی مختلفی نظیر رایسین، رایلی و حالت‌های شدیدتر از رایلی را مدل‌سازی می‌کنند.

در حالی که کار [۲۶] فاقد بهره‌گیری از فناوری فراتر از نسل پنجم و ششم نظیر سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر بوده و تنها نرخ خطای بیت را به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته است، احتمال اتصال پذیری کاربران لبه سلولی و پایداری شبکه در شرایط بحرانی را مورد بررسی قرار نداده است. همچنین در کار [۴۱] با فرض کانال‌های رایلی هم‌بسته در معماری تک ورودی - تک خروجی و بدون بهره‌گیری از سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر مشاهده می‌شود که در  $\gamma_0 = 10\text{ dB}$  و تخصیص توان  $\{a_1 = 0.1, a_2 = 0.9\}$  احتمال اتصال پذیری کاربر لبه‌ای همچنان به مرز 60% نمی‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که معماری مذکور، در چنین شرایطی، برای تضمین اتصال پذیری قابل اعتماد کاربران لبه‌ای کافی

ایجاد کرده و پایداری، ظرفیت و قابلیت اطمینان شبکه را برای کاربران لبه‌ای سلول به شکل چشم‌گیری ارتقا می‌دهد

شکل ۸ تاثیر توأم تعداد آنتن‌های فرستنده و طرح آرایش‌بندی لینک‌ها با سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر را بر عملکرد اتصال کاربر دور بررسی می‌کند؛ جایی که یک لینک ضعیف و غیرقابل اعتماد را به لینکی با قابلیت اطمینان بالا تبدیل می‌کند. به دلیل موقعیت لبه سلولی، کاربر دور، شرایط کانال ضعیف‌تر و تلفات مسیر بالاتری را تجربه می‌کند. افزایش  $N$  به همراه تجدید آرایش مناسب سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، منجر به بهره‌مندی چشمگیر از تنوع فضایی در محیط محوشدگی رایلی، هدایت و ارسال بهینه و متمرکز سیگنال پیام به کاربر دور می‌شود و پایداری عملکرد را در شبکه‌های سلولی بی‌سیم افزایش می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، عملکرد اتصال ارتباط کاربر لبه سلول در  $\gamma_0 = 10\text{ dB}$  تنها با دو آنتن بیشتر از مدل شکل ۲ و مشارکت شش المان بازتابی سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، به مرز ۱ می‌رسد و در همین نسبت سیگنال به نویز و تداخل در مقایسه با شکل ۲ به ترتیب 142% و 937% بهبود اضافی را به همراه دارد. این مزیت در کل بازه نسبت سیگنال به نویز حفظ می‌شود. در مجموع، نتایج شبیه‌سازی نه تنها اعتبار روابط پیشنهادی را تأیید می‌کنند، بلکه موازنه‌های عملکردی میان تخصیص توان، پیکربندی آنتن، طرح‌های مشارکتی با سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر و آستانه همکاری را در هر دو سیستم چند ورودی - چند خروجی و تک ورودی - تک



شکل ۸- احتمال اتصال ارتباط کاربر لبه سلولی به ازای مقادیر میانگین SNR مختلف در سیستم  $MIMO_{CNOMA}$  مجهز به RIS

$$(\sigma_1^2 = \sigma_{3-9}^2 = 0\text{ dB}, \sigma_2^2 = -3\text{ dB}, \gamma_{Th1} = 1.5, \gamma_{Th2} = 2, N_{Antenna} = 3, M_{RIS} = 6)$$

جدول ۱: نتایج احتمال اتصال پذیری کاربر لبه‌ای تحت سناریوها و معماری‌های مختلف شبکه‌های سلولی بی‌سیم.

| N | A <sub>1</sub>     | M   | Y <sub>Th1</sub> | Y <sub>Th2</sub> | m   | Y <sub>0</sub> | C <sub>p</sub> % |
|---|--------------------|-----|------------------|------------------|-----|----------------|------------------|
| 1 | {0.10}             | 0   | 1.5              | 2                | 2   | 7              | 92.73            |
|   |                    |     |                  |                  |     | 10             | 99.19            |
| 1 | {0.15}             | 0   | 1.5              | 2                | 2   | 7              | 87.52            |
|   |                    |     |                  |                  |     | 10             | 98.56            |
| 1 | {0.20}             | 0   | 1.5              | 2                | 2   | 7              | 77.68            |
|   |                    |     |                  |                  |     | 10             | 96.86            |
| 1 | {0.25}             | 0   | 1.5              | 2                | 2   | 7              | 57.54            |
|   |                    |     |                  |                  |     | 10             | 91.74            |
| 1 | {0.30}             | 0   | 1.5              | 2                | 2   | 7              | 27.51            |
|   |                    |     |                  |                  |     | 10             | 73.36            |
| 1 | {0.10}             | 0   | 1.5              | 2                | 0.5 | 10             | 78.47            |
|   |                    |     |                  |                  | 1   |                | 93.49            |
|   |                    |     |                  |                  | 1.5 |                | 97.75            |
| 1 | {0.15}             | 0   | 1.5              | 2                | 0.5 | 10             | 75.32            |
|   |                    |     |                  |                  | 1   |                | 91.16            |
|   |                    |     |                  |                  | 1.5 |                | 96.39            |
| 1 | {0.20}             | 0   | 1.5              | 2                | 0.5 | 10             | 69.91            |
|   |                    |     |                  |                  | 1   |                | 86.91            |
|   |                    |     |                  |                  | 1.5 |                | 93.55            |
| 1 | {0.25}             | 0   | 1.5              | 2                | 0.5 | 10             | 61.21            |
|   |                    |     |                  |                  | 1   |                | 78.17            |
|   |                    |     |                  |                  | 1.5 |                | 86.04            |
| 1 | {0.30}             | 0   | 1.5              | 2                | 0.5 | 10             | 41.49            |
|   |                    |     |                  |                  | 1   |                | 55.16            |
|   |                    |     |                  |                  | 1.5 |                | 62.71            |
| 1 | {0.20}             | 1   | 1.5              | 2                | 1   | 7              | 32.58            |
|   |                    | 2   |                  |                  |     |                | 41.65            |
|   |                    | 5   |                  |                  |     |                | 60.00            |
|   |                    | 10  |                  |                  |     |                | 73.92            |
|   |                    | 50  |                  |                  |     |                | 93.59            |
|   |                    | 100 |                  |                  |     |                | 96.67            |
| 3 | {0.10, 0.20, 0.30} | 6   | 1.5              | 2                | 1   | 3              | 99.53            |
| 3 | {0.05, 0.15, 0.25} | 6   | 1.5              | 2                | 1   | 3              | 99.86            |

پیچیدگی سخت‌افزاری، سربار پردازشی و محاسباتی، افزایش هزینه تخمین و تبادل اطلاعات کانال، مصرف انرژی بیشتر، هزینه بالاتر استقرار تجهیزات و نیز افزایش پیچیدگی هماهنگی میان گره‌های شبکه‌های سلولی بی‌سیم است. از این‌رو، نتایج نشان می‌دهد که دستیابی به سطوح بالاتر اتصال پذیری و قابلیت اطمینان، مستلزم پذیرش افزایش هزینه و پیچیدگی در طراحی و پیاده‌سازی سیستم است.

## ۷- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر یک بیان آماری - عددی جامع از احتمال اتصال پذیری کاربران لبه سلول در شبکه‌های سلولی بی‌سیم چند ورودی - چند خروجی با مشارکت سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر مبتنی بر دسترسی چندگانه غیرمتعامد همکارانه را ارائه می‌دهد. در چارچوب پیشنهادی، نه تنها کاربران درون سلولی می‌توانند به عنوان رله، محدودیت‌های اتصال برای کاربران لبه سلول را کاهش دهند؛ بلکه تجدید آرایش سطوح هوشمند نیز با اعمال یک تاخیر فاز کنترل شده و همچنین ایجاد الگوی هدفمند بازتاب سیگنال، به افزایش قابلیت اطمینان لینک‌های کمکی می‌افزاید. در این پژوهش، یک بیان

نبوده و نیازمند سازوکارهای تقویتی نظیر همکاری رله‌ای، تنوع فضایی و یا به‌کارگیری سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر است. افزون بر این، در کار [۴۰] نیز علی‌رغم استفاده از معماری چند ورودی - چند خروجی به دلیل عدم بهره‌گیری از سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، احتمال اتصال پذیری کاربر لبه‌ای در همان نسبت سیگنال به نویز کار [۴۱] همچنان کمتر از مرز 80% باقی می‌ماند؛ در مقابل، معماری پیشنهادی این پژوهش قادر است با کاهش محسوس توان مصرفی، سطح اطمینان اتصال پذیری را به حدود 99.9% در نسبت سیگنال به نویز بسیار پایین 3dB ارتقا دهد که بیانگر برتری قابل توجه آن در تضمین پایداری و قابلیت اطمینان شبکه‌های فراتر از نسل پنجم و نسل ششم است.

در معماری پیشنهادی و تحت بررسی 33 سناریوی مختلف، نتایج نشان داد که افزایش تعداد آنتن‌ها، تعداد المان‌های سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر، بهینه‌سازی تخصیص توان برداری و بهبود شرایط نسبت سیگنال به نویز و تداخل، به‌طور مستقیم موجب ارتقای احتمال اتصال پذیری کاربران، به‌ویژه کاربران لبه سلول، می‌شود. با این حال، این بهبود عملکرد همواره با نوعی مصالحه در پیاده‌سازی عملی شبکه همراه است. مهم‌ترین این چالش‌ها شامل افزایش

- & Tutorials, vol. 13, no. 3, pp. 503-520, Jul. 2011, doi: 10.1109/SURV.2011.011211.00016.
- [6] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26-35, May 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6815890.
- [7] K. Higuchi and Y. Kishiyama, "Non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (IEEE VTC'13 Fall)*, Sep. 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCFall.2013.6692307.
- [8] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C.-L. I, and Z. Wang, "Nonorthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 74-81, Sep. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349.
- [9] J. Sheeba, V. Kumaravelu, and A. Imoize, "Rate Maximization of Cell-Edge Users Through Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access," in *4th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSPC)*, Chennai, India, Mar. 2023, pp. 123-128, doi: 10.1109/ICSPC57692.2023.10125688.
- [10] P. Xu, Z. Ding, X. Dai, and H. V. Poor, "NOMA: An information theoretic perspective," May 2015, doi: 10.48550/arXiv.1504.07751.
- [11] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K.-S. Kwak, "Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 2, pp. 721-742, 2nd Quart., Oct. 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2621116.
- [12] 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, p. 1974, Mar. 2022, doi: 10.3390/s22051974.
- [13] Z. Shi, S. Ma, H. ElSawy, G. Yang, and M.-S. Alouini, "Cooperative HARQ-assisted NOMA scheme in large-scale D2D networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 9, pp. 4286-4302, Sep. 2018, doi: 10.1109/TCOMM.2018.2829469.
- [14] K. N. Pappi, P. D. Diamantoulakis, and G. K. Karagiannidis, "Distributed Uplink-NOMA for Cloud Radio Access Networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 10, pp. 2274-2277, Oct. 2017, doi: 10.1109/LCOMM.2017.2721945.
- [15] F. Kara and H. Kaya, "Threshold-based selective cooperative-NOMA," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 7, pp. 1263-1266, May. 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2019.2916856.
- [16] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [17] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
- [18] E. Björnson, L. Sanguinetti, and M. Kountouris, "Deploying Dense Networks for Maximal Energy Efficiency: Small Cells Meet Massive MIMO," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 4, pp. 832-847, Apr. 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2545539.
- [19] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, "6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities," *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166-1199, Jul. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3061701.
- [20] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957-975, Jul. 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3010270.
- [21] M. Di Renzo et al., "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, Nov. 2020, doi: 10.1109/JSAC.2020.3007211.
- [22] E. Basar, M. D. Renzo, J. D. Rosny, M. Debbah, M. S. Alouini and R. Zhang, "Wireless Communications Through Reconfigurable

عددی برای احتمال اتصال کاربر لبه سلول با بهره‌گیری از تخصیص توان برداری در هشت لینک مجزا و سه لینک موثر به همراه مدل‌سازی نسبت سیگنال به نویز و تداخل، تحت محوشدگی رایلی استخراج گردید. این مدل اثر حذف متوالی تداخل ناقص در رله را در نظر می‌گیرد؛ ویژگی‌های محوشدگی کانال‌های درگیر را لحاظ می‌کند و نقش حیاتی مشارکت توام کاربران درون سلولی با سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر را در بهبود اتصال کمی‌سازی می‌نماید. علاوه بر این، یک مطالعه مقایسه‌ای گسترده میان طرح‌های مشابه بدون سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر و ساختارهای متعارف تک ورودی - تک خروجی تحت شرایط مختلف کانال نظیر محوشدگی ناکاگامی -  $m$ ، رایسین، رایلی و شدیدتر از رایلی با طرح پیشنهادی انجام شد.

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که این رویکرد یک راهکار مؤثر و امیدبخش برای ارتقای ارتباطات بی‌سیم در محیط‌های با محوشدگی شدید، به‌ویژه برای کاربران لبه سلول، محسوب می‌شود. به عنوان مثال، بر اساس تحلیل ترکیبی اشکال ۲ و ۸، هنگامی که توان لینک مستقیم از ایستگاه پایه، به شدت تضعیف شده و  $\gamma_0 = 10 \text{ dB}$  باشد، احتمال قطع ارتباط کاربر لبه سلول در مدلی با سه آنتن و شش عنصر بازتابی هوشمند تا حدود 1.54 برابر کمتر از مدل‌های متعارف بدون این تجهیزات است. با این حال، دستیابی به عملکرد بهینه مستلزم طراحی دقیق پارامترهای سیستم مطابق با مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱ است. افزون بر این، لازم است محدودیت‌ها و خطاهای ناشی از برآورد ناقص وضعیت کانال، تحرک کاربران، سناریوهای چندکاربره<sup>۶۶</sup> و نیز به‌کارگیری استراتژی‌های پیشرفته همکاری، از جمله رله‌گذاری تمام‌دوطرفه با قابلیت ارسال و دریافت همزمان داده در کنار سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر، مورد توجه قرار گیرد که بررسی جامع آن‌ها می‌تواند مسیر مناسبی برای توسعه پژوهش‌های آینده فراهم سازد.

## مراجع

- [1] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, "A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323, 3rd Quart., May. 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2835558
- [2] A. W. Scott and R. Frobenius, "Multiple access techniques: FDMA, TDMA, and CDMA," *RF Measurements for Cellular Phones and Wireless Data Systems*, pp. 413-429, Jan. 2008, doi: 10.1002/9780470289631.ch22
- [3] K. Higuchi and A. Benjebbour, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no. 3, pp. 403-414, Mar. 2015, doi: 10.1587/transcom.E98.B.403.
- [4] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge: Cambridge University Press, Jun. 2012, ch. 4, pp. 143-182, doi: 10.1017/CBO9780511807213.
- [5] R. Zhang and L. Hanzo, "A unified treatment of superposition coding aided communications: Theory and practice," *IEEE Commun. Surveys*

- Soft Computing and Information Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 25–38, 2024.
- [38] M. Mobini, G. Kaddoum, and M. Herceg, “A Multi-Carrier Deep Learning CSK Communication System,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 29, no. 6, p. 1191, Jun. 2025, doi: 10.1109/LCOMM.2025.3554270.
- [39] A. Bagheri and M. A. Karimi, “The Impact of Using the Non-Orthogonal Multiple Access Technique in Collaborative Wireless Cellular Networks on Improving Communication Quality,” *Journal of Soft Computing and Information Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 37–44, Jun. 2025, doi: 10.22034/jscit.2025.219354.
- [40] A. Bagheri and M. A. Karimi, “Statistical Analysis of Connectivity Enhancement for Cell-Edge Users in MIMO-Enabled Wireless Cellular Networks Using Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access (CNOMA) with Power Allocation,” *Journal of Communication Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 91–108, Jan.-Jun. 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1971596.1218.
- [41] A. Bagheri, “Toward Next-Generation Connectivity: Analyzing Cell Edge User Connectivity in Cooperative NOMA-Based Cellular Networks Over Correlated Rayleigh Channels for B5G and 6G,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 73, no. 11, pp. 12533–12544, Nov. 2025, doi: 10.1109/TCOMM.2025.3573498.
- [42] M. Di Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M.-S. Alouini, C. Yuen, and J. de Rosny, “Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and the Road Ahead,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2450–2525, Nov. 2020, doi: 10.1109/JSAC.2020.3007211.
- [43] A. L. Imoize, V. B. Kumaravelu, and D. T. Do, Eds., *Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G and Beyond Wireless Networks*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2025.
- [44] K. S. Shanmugan, *Digital and Analog Communication Systems*, New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1979, ch. 4, pp. 138-189.
- Intelligent Surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753-116773, Aug. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192.
- [23] N. Sharma, S. Gautam, “Optimizing RIS-assisted Wireless Communication Systems with Non-Linear Energy Harvesting,” in *Proc. 5th International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Flexible Green Energy Technologies (ICEPE)*, Shillong, India, Aug. 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEPE57949.2023.10201582.
- [24] O. Alamu, T. Olwal and K. Djouani, “Cooperative NOMA networks with simultaneous wireless information and power transfer: An overview and outlook,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 71, pp. 413-438., May. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.03.045.
- [25] T. Do, D. da Costa, T. Duong and B. An, “Improving the performance of cell-edge users in NOMA systems using cooperative relaying,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 5, p. 1883-1901, Jun. 2018, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2779114.
- [26] M. M. da Silva and R. Dinis, “Power-Ordered NOMA with Massive MIMO for 5G Systems,” *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, article 3541, Apr. 2021, doi: 10.3390/app11083541.
- [27] A. A. Amin and S. Y. Shin, “Capacity analysis of cooperative NOMA-OAM-MIMO based full-duplex relaying for 6G,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 7, pp. 1395–1399, Jul. 2021, doi: 10.1109/LWC.2021.3076877.
- [28] M. W. Xie, X. Ding, B. Cai, X. Li and M. Wei, “Downlink MIMO-NOMA System for 6G Internet of Things,” *Journal of Electronics*, vol. 11, no. 19, article 3233, Oct. 2022, doi: 10.3390/electronics11193233.
- [29] M. Ghous, A. K. Hassan, Z. H. Abbas, G. Abbas, A. Hussien, and T. Baker, “Cooperative Power-Domain NOMA Systems: An Overview,” *Journal of Sensors*, vol. 22, no. 24, article 9652, Dec. 2022, doi: 10.3390/s22249652.
- [30] M. Hassan, M. S. Goraya, K. Hamid, R. Saeed, M. Abdelhaq, and R. Alsaqour, “Design of Power Location Coefficient System for 6G Downlink Cooperative NOMA Network,” *Journal of Energies*, vol. 15, no. 19, article 6996, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15196996.
- [31] M. Fadhil, N. F. Abdullah, M. Ismail, R. Nordin, A. Saif, and M. Al-Obaidi, “Power Allocation in Cooperative NOMA MU-MIMO Beamforming Based on Maximal SLR Precoding for 5G,” *Journal of Communications*, vol. 14, no. 8, pp. 676–683, Aug. 2019, doi: 10.12720/jcm.14.8.676-683.
- [32] A. Wahid, M. Ahmed, S. S. Laique, W. U. Khan, A. Ihsan, F. Xu, S. Chatzinotas, and Z. Han, “A Survey on STAR-RIS: Use Cases, Recent Advances, and Future Research Challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 16, pp. 14689–14711, Aug. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3274443.
- [33] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, M. Di Renzo, and N. Al-Dhahir, “Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, May. 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3077737.
- [34] M. A. ElMossallamy, H. Zhang, L. Song, K. G. Seddik, Z. Han, and G. Y. Li, “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 6, no. 3, pp. 990–1002, Sep. 2020, doi: 10.1109/TCCN.2020.2986912.
- [35] X. Yuan, Y.-J. A. Zhang, Y. Shi, W. Yan, and H. Liu, “Reconfigurable-Intelligent-Surface Empowered Wireless Communications: Challenges and Opportunities,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 2, pp. 136–143, Apr. 2021, doi: 10.1109/MWC.001.2000374.
- [36] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen, “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy Efficiency in Wireless Communication,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 8, pp. 4157–4170, Aug. 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2922609.
- [37] M. Sheikhi, S. Asadi, and V. Hakami, “AoI-based Performance Optimization in RIS-Assisted mmWave Communications,” *Journal of*

## پیوست‌ها

جدول ۲: بهره و ضرایب کانال‌ها، زیرکانال‌ها و مسیرهای متناظر در سیستم.

| نماد بهره و ضریب هر کانال | نماد بهره و ضرایب کانال متناظر با زیرکانال $i - m$ المان $j - m$ سطوح هوشمند بازپیکربندی پذیر | مبدأ و مقصد متناظر هر کانال و زیرکانال |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| $G_1$                     | $g_{1i}$                                                                                      | $BS \rightarrow U_1$                   |
| $G_2$                     | $g_{2i}$                                                                                      | $BS \rightarrow U_2$                   |
| $G_3$                     | $g_{3ji}$                                                                                     | $BS \rightarrow RIS$                   |
| $R_1$                     | $r_{1j}$                                                                                      | $RIS \rightarrow U_1$                  |
| $R_2$                     | $r_{2j}$                                                                                      | $RIS \rightarrow U_2$                  |
| $R_3$                     | $r_{3j}$                                                                                      | $RIS \rightarrow U_2$                  |
| $C_1$                     | $c_{1ji}$                                                                                     | $U_1 \rightarrow RIS$                  |
| $C_2$                     | $c_{2i}$                                                                                      | $U_1 \rightarrow U_2$                  |
| $H_1^{RIS}$               | $h_{1i}^{RIS}$                                                                                | $BS \rightarrow RIS \rightarrow U_1$   |
| $H_1^{eff}$               | $h_{1i}^{eff}$                                                                                | $BS \rightarrow U_1$                   |
| $H_2^{RIS}$               | $h_{2i}^{RIS}$                                                                                | $BS \rightarrow RIS \rightarrow U_2$   |
| $H_2^{eff}$               | $h_{2i}^{eff}$                                                                                | $BS \rightarrow U_2$                   |
| $H_c^{RIS}$               | $h_{ci}^{RIS}$                                                                                | $U_1 \rightarrow RIS \rightarrow U_2$  |
| $H_c^{eff}$               | $h_{ci}^{eff}$                                                                                | $U_1 \rightarrow U_2$                  |
|                           |                                                                                               | $U_1 \rightarrow RIS \rightarrow U_2$  |

جدول ۳: نمادها و پارامترهای سیستم و تعاریف آن.

| نماد<br>پارامترهای<br>سیستم | تعریف نماد                                                                                                                                                                                      | نماد<br>پارامترهای<br>سیستم | تعریف نماد                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_1$                       | کاربر نزدیک یا درون سلولی (رله مجازی)                                                                                                                                                           | $n_2$                       | نویز گوسی سفید جمع‌شونده در گیرنده کاربر دور<br>$n_2 \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$                                                                                                  |
| $U_2$                       | کاربر دور یا لبه سلولی                                                                                                                                                                          | $n_{c_{1i}}$                | نویز گوسی سفید جمع‌شونده در لینک همکاری مستقیم در زیرکانال $i - \text{ام}$                                                                                                       |
| $N$                         | تعداد آنتن‌ها یا زیرکانال‌ها ( $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ )                                                                                                                                     | $n_{c_{2i}}$                | نویز گوسی سفید جمع‌شونده در لینک همکاری مبتنی بر سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر در زیرکانال $i - \text{ام}$                                                                        |
| $M$                         | تعداد المان‌های سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر ( $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ )                                                                                                                     | $n_{c_i}$                   | نویز مؤثر گوسی سفید جمع‌شونده در مسیر همکاری برای زیرکانال $i - \text{ام}$ که از مجموع نویز لینک همکاری مستقیم و لینک همکاری مبتنی بر سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر تشکیل می‌شود. |
| $x_1$                       | پیام کاربر نزدیک                                                                                                                                                                                | $\gamma_{Th_1}$             | آستانه نسبت سیگنال به نویز و تداخل لینک همکاری، متناظر با نرخ داده هدف کاربر نزدیک                                                                                               |
| $x_2$                       | پیام کاربر دور                                                                                                                                                                                  | $\gamma_{Th_2}$             | آستانه نسبت سیگنال به نویز و تداخل مورد نیاز برای کاربر دور، متناظر با نرخ داده هدف آن.                                                                                          |
| $\hat{x}_2$                 | نسخه دیدک شده پیام کاربر دور برای همکاری                                                                                                                                                        | $\gamma_1$                  | سیگنال دریافتی در گیرنده کاربر نزدیک                                                                                                                                             |
| $A_1$                       | بردار ضرایب تخصیص توان برای کاربر نزدیک                                                                                                                                                         | $\gamma_2$                  | سیگنال دریافتی در گیرنده کاربر دور                                                                                                                                               |
| $a_{1i}$                    | ضریب تخصیص توان سیگنال کاربر نزدیک در زیرکانال $i - \text{ام}$                                                                                                                                  | $\gamma_{c_1}$              | سیگنال دریافتی در لینک همکاری مستقیم                                                                                                                                             |
| $A_2$                       | بردار ضرایب تخصیص توان برای کاربر دور                                                                                                                                                           | $\gamma_{c_2}$              | سیگنال دریافتی در لینک همکاری مبتنی بر سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر                                                                                                              |
| $a_{2i}$                    | ضریب تخصیص توان سیگنال کاربر دور در زیرکانال $i - \text{ام}$                                                                                                                                    | $\gamma_c$                  | سیگنال دریافتی مؤثر در لینک همکاری که از مجموع لینک همکاری مستقیم و مبتنی بر سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر تشکیل می‌شود.                                                          |
| $P_T$                       | توان کل ارسال شده توسط ایستگاه پایه                                                                                                                                                             | $\sigma_i^2$                | واریانس ضرایب کانال (یا توان میانگین محوشدگی) در زیرکانال $i - \text{ام}$                                                                                                        |
| $N_0$                       | توان نویز حرارتی                                                                                                                                                                                | $\sigma_j^2$                | واریانس ضرایب کانال مربوط به المان $j$ ام سطح سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر                                                                                                       |
| $\gamma_0$                  | میانگین نسبت سیگنال به نویز                                                                                                                                                                     | $\sigma_{ji}^2$             | واریانس ضرایب کانال متناظر با لینک ترکیبی از المان $j - \text{ام}$ سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر و زیرکانال $i - \text{ام}$                                                       |
| $\gamma_1$                  | میانگین نسبت سیگنال به نویز و تداخل پیام دریافت شده در کاربر نزدیک                                                                                                                              | $\theta_i$                  | ماتریس قطری ضرایب فاز المان‌های سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر در زیرکانال $i - \text{ام}$                                                                                         |
| $\gamma_2$                  | میانگین نسبت سیگنال به نویز و تداخل پیام دریافت شده در کاربر دور                                                                                                                                | $\phi_{Mi}$                 | زاویه یا شیفت فازی المان $M - \text{ام}$ سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر در زیرکانال $i - \text{ام}$                                                                                |
| $\gamma_c$                  | نسبت سیگنال به نویز و تداخل مؤثر پیام همکاری پس از تجمیع زیرکانال‌ها                                                                                                                            | $R_{x_2}$                   | نرخ داده پیام کاربر دور                                                                                                                                                          |
| $\gamma_{c_1}$              | نسبت سیگنال به نویز و تداخل مؤثر سیگنال کاربر دور در گیرنده کاربر نزدیک طی مرحله حذف متوالی تداخل که در آن پس از تجمیع توان زیرکانال‌ها، سیگنال کاربر نزدیک به‌عنوان تداخل در نظر گرفته می‌شود. | $\Delta_{min}$              | حداقل آستانه نسبت سیگنال به نویز و تداخل لازم برای فعال شدن همکاری                                                                                                               |
| $\gamma_{tot_2}$            | نسبت سیگنال به نویز و تداخل کل پیام دریافت شده در کاربر دور                                                                                                                                     | $m$                         | پارامتر شکل در مدل محوشدگی ناکاگامی                                                                                                                                              |
| $n_1$                       | نویز گوسی سفید جمع‌شونده در گیرنده کاربر نزدیک<br>$n_1 \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$                                                                                                               | $\Omega$                    | توان متوسط کانال یا میانگین توان سیگنال دریافتی در مدل محوشدگی ناکاگامی                                                                                                          |

## پاورقی‌ها:

- <sup>1</sup> OMA (Orthogonal Multiple Access)
- <sup>2</sup> NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)
- <sup>3</sup> B5G (Beyond Fifth Generation)
- <sup>4</sup> BS (Base Station)
- <sup>5</sup> QoS (Quality of Service)
- <sup>6</sup> CNOMA (Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access)
- <sup>7</sup> NLOS (Non-Line-of-Sight)
- <sup>8</sup> SIC (Successive Interference Cancellation)
- <sup>9</sup> MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)
- <sup>10</sup> Spatial Diversity
- <sup>11</sup> Spatial Multiplexing
- <sup>12</sup> Spatial Domain
- <sup>13</sup> LOS (Line-of-Sight)
- <sup>14</sup> Massive MIMO (Massive Multiple-Input Multiple-Output)
- <sup>15</sup> mm Wave (millimeter Wave)
- <sup>16</sup> sub-THz (sub-Terahertz)
- <sup>17</sup> URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications)
- <sup>18</sup> 6G (Sixth Generation)
- <sup>19</sup> RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces)
- <sup>20</sup> SNR (Signal-to-Noise Ratio)
- <sup>21</sup> Rayleigh fading
- <sup>22</sup> Log-normal fading
- <sup>23</sup> SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer)
- <sup>24</sup> EC (Ergodic Capacity)
- <sup>25</sup> Full-Duplex
- <sup>26</sup> Nakagami-m Distribution
- <sup>27</sup> SC-FDE (Single-Carrier Frequency-Domain Equalization)
- <sup>28</sup> SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)
- <sup>29</sup> PD-NOMA (Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access)
- <sup>30</sup> ML (Machine Learning)
- <sup>31</sup> STAR-RIS (Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface)
- <sup>32</sup> PLS (Physical Layer Security)
- <sup>33</sup> EE (Energy Efficiency)
- <sup>34</sup> MS (Mode Switching)
- <sup>35</sup> ES (Energy Splitting)
- <sup>36</sup> TS (Time Switching)
- <sup>37</sup> CLT (Central Limit Theorem)
- <sup>38</sup> Reflectarray
- <sup>39</sup> Metasurface
- <sup>40</sup> Dual Backscatter
- <sup>41</sup> CSI (Channel State Information)
- <sup>42</sup> Condition Number
- <sup>43</sup> Spatial Multiplexing
- <sup>44</sup> MISO (Multiple-Input Single-Output)
- <sup>45</sup> Downlink
- <sup>46</sup> AF (Amplify-and-Forward)
- <sup>47</sup> AoI (Age of Information)
- <sup>48</sup> MDP (Markov Decision Process)
- <sup>49</sup> DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient)
- <sup>50</sup> Bi-LSTM (Bidirectional Long Short-Term Memory)
- <sup>51</sup> BER (Bit Error Rate)
- <sup>52</sup> Rician fading
- <sup>53</sup> UAV (Unmanned Aerial Vehicle)
- <sup>54</sup> Sub-Rayleigh fading
- <sup>55</sup> OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)
- <sup>56</sup> PA (Power Allocation)
- <sup>57</sup> MRC (Maximum Ratio Combining)
- <sup>58</sup> Diagonal Matrix
- <sup>59</sup> Superposition Coding
- <sup>60</sup> AWGN (Additive White Gaussian Noise),  $\mathcal{CN}(0, N_0)$
- <sup>61</sup> MCS (Modulation and Coding Scheme)
- <sup>62</sup> Signalling Overhead
- <sup>63</sup> MATLAB (R2024a)
- <sup>64</sup> Weibull fading
- <sup>65</sup> MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)
- <sup>66</sup> Multi-User Scenarios