

بیشینه‌سازی چندهدفی ظرفیت مؤثر رله‌های نیمه دوطرفه و تمام دوطرفه دومسیره در ارسال بسته‌های کوچک

محمد لاری^۱، استادیار، زهرا کشاورز گندمانی^۲، کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - m_lari@semnan.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - zahra_keshavarz@semnan.ac.ir

چکیده: جهت برآورد الزامات تأخیر در سیستم‌های مخابراتی، در این مقاله یک شبکه مشارکتی تحت سناریوی بسته‌های کوچک در کانال محو شونده رایلی را ارائه کرده‌ایم. رله موردنظر می‌تواند به صورت نیمه دوطرفه دومسیره یا تمام دوطرفه دومسیره باشد. همچنین جهت برآورد واقعی تر و کاهش تأخیر در ارتباطات، از سال و دریافت با بسته‌هایی با طول کوچک در نظر گرفته شده است. ظرفیت مؤثر معیار مناسب جهت بررسی نرخ ارسال تحت قید تأخیر است. بنابراین در اینجا به عنوان معیار ارزیابی عملکرد در نظر گرفته می‌شود. هنگام استفاده از رله دومسیره، دو گره با استفاده از رله با یکدیگر تبادل داده می‌کنند. اولویت و الزامات دو گره لزوماً مشابه یکدیگر نیست. بنابراین جهت افزایش عملکرد، از بهینه‌سازی چندهدفی استفاده می‌کنیم. به این ترتیب، توان ثابت موجود در شبکه، با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفی، بین رله و دو گره طوری تقسیم می‌شود که ظرفیت مؤثر دو گره بیشینه شود. با توجه به شرایط مسئله، مقدار بهینه توان تخصیص یافته به رله و گره‌ها قابل محاسبه است. اما با توجه به پیچیدگی و زمانبر بودن انجام محاسبات، روش تقریبی جهت افزایش سرعت محاسبات ارائه شده است که عملکرد بسیار نزدیکی با حل بهینه دارد. در انتها نیز مقایسه‌های متنوع در شرایط مختلف بین عملکرد رله نیمه دوطرفه و تمام دوطرفه انجام شده و بهبود عملکرد تخصیص توان چندهدفی مخصوصاً در حالتی که رله بین گره‌ها قرار نگرفته، نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: بسته‌های کوچک، بهینه‌سازی چندهدفی، تخصیص توان، تمام دوطرفه، رله دومسیره، ظرفیت مؤثر.

Multi-Objective Effective Capacity Maximization of Two Way Full-Duplex and Half-Duplex relays with Finite Block Length Packets Transmission

Mohammad Lari, Assistant Professor ¹, Zahra Keshavarz Gandomani, M.Sc. Student ²

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: m_lari@semnan.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: zahra_keshavarz@semnan.ac.ir

Abstract: In order to satisfy the delay requirements of telecommunication systems, in this paper, we present a cooperative network with the short packet transmission in the Rayleigh fading channel. The desired relay can be implemented as a two-way half-duplex (HD) or a two-way full-duplex (FD). Also, for more accurate satisfaction and reduction of communication delays, sending and receiving with short packets is considered. Effective capacity appropriately measures the transmission rate under the delay constraint. Therefore, it is considered as a performance evaluation criterion here. With a two-way relay, two nodes exchange data with each other using a relay simultaneously. The priorities and requirements of the two nodes are not necessarily the same. Therefore, to increase performance, the system is modeled and solved as a multi-objective problem. In this way, the available power in the network is divided between the relay and two nodes, and the effective capacity of the two nodes is maximized. Depending on the different conditions, the optimal amount of allocated power to relay and nodes is calculated. However, due to the complexity and time consuming calculations, an approximate method which speeds up the calculation is presented. The approximated solution has a very close performance to the optimal allocated power. Finally, various comparisons have been made in different conditions between the performance of two-way HD and two-way FD relays. The improvement of multi-objective power allocation has been shown, especially when the relay is not located in the middle of two nodes.

Keywords: Effective Capacity, Finite Length Packet, Full-Duplex, Multi-Objective Optimization, Power Allocation, Two Way Relays.

نام نویسنده مسئول: محمد لاری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

نسل پنجم سیستم‌های مخابراتی آغازگر عصر جدیدی از ارتباطات است که صنایع مختلف و زندگی روزمره ما را متحول خواهد کرد. از بین کاربردهای فن‌آورانه مخابراتی نسل پنجم، می‌توان به اینترنت اشیاء [۱]، اتومبیل‌های خودران و هوشمند [۲]، کنترل برخط و اتوماسیون صنعتی [۳] و واقعیت مجازی [۴، ۵] اشاره کرد. به عنوان نمونه، اینترنت اشیاء یک مفهوم بسیار گسترده و به معنی ارتباط تمامی اشیاء پیرامونی ما با یکدیگر است. این مفهوم می‌تواند در همه حوزه‌های انرژی، حمل‌ونقل، سلامت، ساخت و تولید و غیره برای ایجاد یک جهان هوشمند و همچنین بکارگیری بهینه منابع استفاده شود [۶، ۱]. جهت پاسخگویی به نیازمندی‌های جدیدی که در نسل پنجم ارتباطات طرح و هدف‌گذاری شده است، ساختار شبکه و و بسیاری از پارامترهای آن دچار تحول اساسی خواهد شد. به همین علت امکان ارائه سرویس‌های جدید و رفع نیازمندی‌هایی متفاوت از قبل امکان‌پذیر خواهد بود.

یکی از موضوعاتی که در نسل‌های قبل مورد توجه نبوده و یا توجه کمی به آن شده است، پارامتر تأخیر و در نظر گرفتن آن برای ارتباطات و ترافیک‌های حساس به تأخیر است [۷]. محور اصلی در طراحی نسل‌های گذشته سیستم‌های مخابراتی (نسل اول تا چهارم) اغلب انسان بوده است. از آنجا که حواس انسان به تأخیرهای کم چندان حساس نیست، بنابراین پارامتر تأخیر در نسل‌های قبلی معمولاً تضمین نشده و در بهترین حالت، میزان تأخیر تا چند ده میلی‌ثانیه امری کاملاً عادی بوده است [۸]. این شرایط برای نیازمندی‌های نوین مانند اتومبیل‌های خودران و هوشمند یا یک عمل جراحی از فاصله دور قابل قبول نیست. در این کاربردها و بسیاری از کاربردهای دیگر که جزئیات آن در مراجع مختلف مانند [۹، ۶] در دسترس است، تأخیر کم در حد چند میلی‌ثانیه و کمتر و همچنین تضمین مقدار تأخیر بسیار ضروری است [۸]. در این موارد در صورت افزایش تأخیر نسبت به میزان قابل قبول، حتی در صورت دریافت کامل و بدون خطا، بسته غیر قابل استفاده است و معمولاً دور انداخته می‌شود. تصور کنید که ارسال اطلاعات به خودروهای کناری توسط یک خودرو بدون سرنشین که در حال سبقت یا تغییر خط است، با تأخیر انجام شود. نتیجه فاجعه‌بار خواهد بود. از این رو توجه به تأخیر در لایه‌های مختلف شبکه و تکنیک‌های مختلف ارسال و دریافت و روش‌های مختلف تضمین آن به عنوان پارامتر کیفیت سرویس به شدت مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله با ارائه یک مدل مشارکتی جهت ارسال داده‌ها در کمترین بازه زمانی ممکن و همچنین تخصیص توان مناسب، تأخیر آماری بسته‌ها تضمین خواهد شد. منظور از تأخیر آماری، احتمال تأخیر و معطلی بسته‌ها در بافر فرستنده است.

تأخیر مفهومی بسیار گسترده است و در یک سیستم یا شبکه مخابراتی به دلایل مختلفی ایجاد می‌شود [۱۰]. از این رو جهت کاهش تأخیر و تضمین بیشینه آن، توجه به منشأ آن ضروری است. یکی از دلایل ایجاد تأخیر، ارسال و کدگذاری بسته‌های با طول نسبتاً زیاد در

گیرنده است. از آنجا که در تئوری شانون، رسیدن به نرخ برابر ظرفیت کانال به ازای بسته‌هایی با طول زیاد (بینهایت) امکان‌پذیر است، در سالیان گذشته و در مخابرات متداول، بسته‌های ار سالی از فرستنده به گیرنده، اغلب دارای طول زیاد بوده و یا با طول زیاد فرض شده است. در صورت طراحی مناسب این بسته‌ها با طول زیاد (مثلاً استفاده از کدهای تصحیح خطای توربو) یا کدهای با بیت توازن کم چگالی^۲، نرخ ارسال اطلاعات به نرخ شانون بسیار نزدیک می‌شود. با این حال، ارسال این بسته‌ها زمانبر و تأخیر کدگذاری آنها نیز زیاد است. بنابراین استفاده از آنها برای ترافیک‌های حساس به تأخیر اصلاً مناسب نیست. از طرف دیگر، داده‌های تولیدی فرستنده‌ها در بسیاری از کاربردها مانند شبکه‌های حسگری یا اینترنت اشیاء، اغلب بسیار کم و در حد چند بایت است و استفاده از بسته‌هایی با طول زیاد جهت ارسال این اطلاعات مختصر، اصلاً به صرفه نیست [۱۱، ۱۲]. از این رو ارسال بسته‌هایی با طول محدود و کوچک^۳ جهت انتقال اطلاعات و همچنین تحلیل عملکرد سیستم مخابراتی با ارسال بسته‌های کوچک، مورد توجه جدی قرار گرفته است [۱۳]. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نرخ ارتباطی هنگام استفاده از بسته‌هایی با طول کوچک با نرخ شانون فاصله دارد و خطای بسته‌های دریافتی در گیرنده نیز صفر نیست. اما زمان ارسال و کدگذاری این بسته‌ها کمتر است و به همین دلیل تحلیل و پیاده‌سازی این نوع از ارتباطات در نسل پنجم سیستم‌های مخابراتی در حال انجام است [۱۳]. علاوه بر تأخیر ارسال و کدگذاری، بافر فرستنده نیز می‌تواند سبب معطل شدن داده‌ها و تأخیر شود. همچنین محدود بودن بازه‌های زمانی و فرکانسی موجود در سیستم مخابراتی، می‌تواند سبب تأخیر انتقال بسته‌ها شود. موارد متعدد دیگری نیز مخصوصاً در شبکه‌های مخابراتی وجود دارند که ممکن است سبب تأخیر شوند که در اینجا به آنها اشاره نمی‌کنیم (برای بررسی بیشتر [۱۰] را ببینید).

جهت ارائه سرویس با کیفیت به ترافیک‌های حساس به تأخیر، در این مقاله یک سیستم مشارکتی شامل دو گره و یک رله نیمه دوطرفه^۴ دومسیره^۵ یا تمام دوطرفه^۶ دومسیره بین آنها در نظر گرفته می‌شود. جهت سادگی و درک بهتر مطالب، در ادامه عملکرد نیمه دوطرفه را با اختصار HD و عملکرد تمام دوطرفه را با اختصار FD بیان می‌کنیم. در حالت ساده جهت جابجایی داده بین دو گره و با استفاده از رله، ۴ بازه زمانی یا فرکانسی مورد نیاز است. اما در صورت استفاده از رله دومسیره، تعداد بازه‌های زمانی یا فرکانسی کاهش می‌یابد. این تکنیک یکی از روش‌های پیشنهادی برای ارتباط مستقیم و بدون واسطه دستگاه‌ها (منظور ارتباط دستگاه به دستگاه^۷ یا همان D2D است) در یک شبکه مخابراتی است [۱۴]. رله از نوع تقویت وار سال^۸ با بهره متغیر است. در رله دو مسیره با عملکرد HD، رله در یک بازه زمانی یا فرکانسی داده‌ها را از هر دو گره دریافت می‌کند و در بازه بعدی، رله داده‌های دریافتی را برای هر دو گره باز ارسال می‌کند. بنابراین تعداد بازه‌های زمانی یا فرکانسی مورد نیاز برابر ۲ می‌شود. به همین ترتیب در رله دو مسیره با

▪ در ادامه نشان خواهیم داد که حل مسئله بهینه‌سازی دارای پیچیدگی محاسباتی بالا و زمانبر است. به همین علت یک حل تقریبی ولی ساده‌تر با عملکردی بسیار نزدیک به عملکرد بهینه ارائه داده‌ایم که می‌تواند به حل سریع و با زمان کمتر حالت‌های مختلف بسیار کمک کند.

در ادامه و در بخش ۲ مرور مختصری از تحقیقات گذشته و مرتبط با موضوع مقاله آورده شده است. در بخش ۳ مدل سیستم شامل مخابرات بسته‌های با طول کوچک، رله دومسیره FD و HD، ظرفیت مؤثر و مدل کانال توضیح داده شده است. سپس در بخش ۴ مسئله بهینه‌سازی چندهدفه جهت بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر دو گرّه طرح و حل شده است. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه‌های مختلف و متنوع در بخش ۵ آورده شده است. در نهایت نیز در بخش ۶ نتیجه‌گیری مقاله انجام می‌شود.

۲- مرور تحقیقات گذشته

یکی از سناریوهای مورد توجه در نسل پنجم سیستم‌های مخابراتی، ارتباطات کم تأخیر و با قابلیت اطمینان بالا^{۱۲} یا در اختصار URLLC است (در مقاله حاضر فقط به بحث تأخیر پرداخته می‌شود و قابلیت اطمینان که همان خطای بسته‌های دریافتی است، بررسی نخواهد شد). در این نوع از ارتباطات که تا قبل از نسل پنجم مورد توجه جدی نبوده است، مقدار اطلاعات جابجا شده بین فرستنده و گیرنده کم است؛ اما همین اطلاعات کم باید با تأخیر کم و خطای اندک در گیرنده دریافت شود تا قابل استفاده باشد [۱۰، ۱۷]. تحقیقات پیرامون این نوع از ارتباطات در چند سال اخیر با مقاله‌هایی نظیر [۱۲] شروع شده و با مقاله‌های مختلف و متنوع دیگری مانند [۱۸-۲۰] ادامه یافته است. از آنجا که کیفیت سرویس مورد نظر در این نوع از ارتباطات بسیار متفاوت از ارتباطات متداول است (در ارتباطات متداول تأخیر زیاد مهم نیست بلکه نرخ ارسال اهمیت دارد؛ اما در URLLC، نرخ ارسال چندان مهم نیست، بلکه تأخیر کم و خطای ناچیز اهمیت دارد)، مراجع [۱۸-۲۰] همگی به بررسی مدیریت منابع جهت سرویس‌دهی مناسب به کاربران هر دو دسته پرداخته‌اند. به عنوان مثال در [۱۸]، یک شبکه سلولی شامل کاربران متفاوت با کیفیت سرویس‌های درخواستی متفاوت در نظر گرفته شده است. یک دسته کاربران سنتی شبکه هستند که نیاز به نرخ بالا دارند و تأخیر برای ایشان اهمیتی ندارد. دسته دیگر کاربرانی هستند که تأخیر کم و خطای اندک برای ایشان اهمیت بیشتری نسبت به نرخ ارسال دارد. ایستگاه مرکزی باید بازه‌های زمانی و فرکانسی و همچنین توان خود را طوری بین کاربران تقسیم کند، که ظرفیت بیشینه شود. در موارد دیگر مانند [۲۱]، افزایش نرخ کاربران و کاهش خطای آنها با قید تأخیر، هنگام سرویس‌دهی به کاربرانی که ارتباط کم تأخیر و قابلیت اطمینان بالا نیاز دارند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای مرور بیشتر و بررسی مسئله‌های مطرح دیگر، [۱۰، ۱۴] را ببینید.

عملکرد FD، رله در یک بازه زمانی یا فرکانسی داده‌ها را از هر دو گرّه دریافت می‌کند و در همان بازه داده‌های دریافتی را برای آنها باز ارسال می‌کند. مشخص است که در این حالت، گرّه‌ها هم باید به صورت FD عمل کنند. بنابراین، رله و گرّه‌ها با مشکل تداخل خودی^۹ یعنی نشت توان ارسالی به گیرنده خودی مواجه هستند که باید به نحو مناسبی مدیریت شده و کاهش یابد. به این ترتیب استفاده از رله دومسیره، علاوه بر افزایش بهره طیفی، به کاهش تأخیر نیز کمک می‌کند [۱۵، ۱۶].

یکی دیگر از گلوگاه‌های سیستم که سبب تأخیر می‌شود، بافر فرستنده است. در صورتی که نرخ ورود و خروج بسته‌ها به بافر درست تنظیم نشده باشد، توقف داده‌ها در بافر فرستنده زیاد شده و همین امر سبب تأخیر می‌شود. از آنجا که نرخ خروج بسته‌ها از بافر فرستنده متناسب با ظرفیت تصادفی و متغیر با زمان کانال بی‌سیم است، تنظیم مناسب نرخ ورود بسته‌ها به بافر، از اهمیت زیادی برخوردار است. در صورتی که نرخ ورود مقدار زیادی تنظیم شود، معطلی و تأخیر بسته‌ها در بافر زیاد خواهد بود. از طرف دیگر اگر این نرخ کم انتخاب شود، امکان ارائه سرویس‌های پرسرعت از بین می‌رود. این نرخ ورود که متناسب با کیفیت سرویس درخواستی کاربر تنظیم می‌شود و تضمین‌کننده تأخیر آماری بسته‌های متوقف در بافر است، ظرفیت مؤثر^{۱۰} نامیده می‌شود. در مقاله حاضر جهت بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر دو گرّه، توان بهینه جهت تخصیص به رله و گرّه‌ها محاسبه می‌شود. از آنجا که دو گرّه متفاوت هستند و لزوماً نرخ و کیفیت سرویس درخواستی آنها و همچنین شرایط آنها یکسان نیست، بنابراین باید ظرفیت مؤثر هر دو گرّه بیشینه شود. از این رو با یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی^{۱۱} روبرو هستیم. این مسئله در ادامه توضیح داده خواهد شد و به روش مناسب حل می‌شود. سپس، ظرفیت مؤثر سیستم در شرایط مختلف بر حسب پارامترهای سیستم مانند تداخل خودی باقیمانده، خطای بسته‌های کوچک دریافتی و پارامتر کیفیت سرویس، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. نوآوری‌های این مقاله در مقایسه با تحقیقات مشابه به شرح زیر است.

▪ بهینه‌سازی ظرفیت مؤثر سیستم مخابراتی مبتنی بر رله FD و همچنین رله دومسیره اصلی‌ترین نوآوری این مقاله است. از آنجا که رله FD و همچنین رله دومسیره می‌توانند علاوه بر افزایش بهره طیفی، تأخیر انتقال اطلاعات را بین گرّه‌ها کاهش دهند، بنابراین بسیار مناسب ارسال داده‌های حساس به تأخیر هستند.

▪ ارائه یک مدل چندهدفی برای مسئله بهینه‌سازی و همچنین بررسی دقیق و اثبات روابط مربوط به آن یکی دیگر از نوآوری‌های مقاله است. ماهیت مسئله واقعاً چندهدفی است. با این حال در بیشتر مقاله‌ها و بررسی‌های گذشته، بهینه‌سازی این دسته از سیستم‌ها به صورت چندهدفی انجام نشده است. بنابراین در نظر گرفتن مسئله به صورت چندهدفی می‌تواند نکته‌های جالب و متفاوتی را نشان دهد.

در سال‌های اخیر و با پیچیده‌شدن سیستم‌های مخابراتی و نیازمندی‌های کاربران، بهینه‌سازی سیستم‌های مخابراتی به صورت چندهدفی نیز مورد توجه قرار گرفته است [۲۲، ۲۳]. در این روش بهینه‌سازی، به جای در نظر گرفتن یک تابع هدف، چند تابع هدف همزمان بهینه می‌شوند. بنابراین بهبود عملکرد در مقایسه با بهینه‌سازی تک‌هدفی دور از انتظار نیست [۲۴]. از این رو در مقاله‌هایی مانند [۱۸، ۲۱]، به علت وجود هدف‌های متفاوت در URLLC، مسئله به صورت چندهدفی طرح و حل شده است.

مخابرات FD و رله‌های FD به علت بهبود عملکرد بالقوه‌ای که دارند، در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۵]. استفاده از رله FD علاوه بر افزایش بهره طیفی، سبب کاهش زمان ارسال بین مبدأ و مقصد هم می‌شود. بنابراین بسیار مناسب کاربردهای حساس به تأخیر است. به عنوان مثال کاربران شبکه سلولی در [۲۶] نیازمند سرویس کم تأخیر هستند. جهت ارائه سرویس مناسب به کاربران لبه سلول، از رله FD استفاده شده است. از آنجا که پردازش‌های لازم برای کاهش تداخل خودی در این رله منجر به افزایش تأخیر می‌شود، رله با کمترین پردازش ممکن تداخل خودی را کاهش داده و باقیمانده تداخل در ایستگاه مرکزی پردازش شده و در صورت نیاز، جهت کاهش خطا، از این تداخل استفاده می‌شود. در [۲۷] نویسندگان قابلیت اطمینان را هنگام استفاده از بسته‌های با طول کوچک در رله‌های HD و FD محاسبه و مقایسه کرده‌اند. سپس مقدار آستانه برای انتخاب نوع رله بین HD و FD را مشخص کرده‌اند. همچنین عملکرد ایستگاه مرکزی به صورت FD جهت ارائه سرویس URLLC به کاربران در [۲۸] مورد توجه قرار گرفته است. مشابه رله‌های FD، رله‌های دومسیره نیز با کاهش بازه‌های زمانی مورد نیاز جهت جابجایی اطلاعات بین دو گره، سبب افزایش بهره طیفی و کاهش تأخیر می‌شوند [۲۹].

ظرفیت مؤثر تعریف جدیدی از ظرفیت است که تأخیر نگهداری اطلاعات در بافر را هم در نظر می‌گیرد. از این رو معیار مناسبی جهت تحلیل عملکرد کاربران حساس به تأخیر و تضمین کیفیت سرویس درخواستی ایشان هست. یکی از کاربردهای ارسال با تأخیر کم، ارتباط مخابراتی بین وسایل نقلیه است. از این رو در [۳۰] با تخصیص توان و پهنای باند و با در نظر گرفتن قید تأخیر، ظرفیت مؤثر بیشینه شده است. در این مقاله به علت سرعت نسبتاً زیاد وسایل نقلیه، تغییرات کانال سریع است و به همین علت فقط اطلاعات مقیاس بزرگ کانال برای تخصیص توان استفاده می‌شود. کاربرد دیگر ارسال با تأخیر کم، کاربرد صنعتی و ارتباط بین ماشین‌آلات صنعتی^{۱۳} است. در مقاله [۳۱] یک ارتباط صنعتی با تعدادی کانال محوشونده موازی در نظر گرفته شده است. ورود بسته‌های ارسالی به صورت پراکنده است و اطلاعات کانال فقط به صورت آماری در فرستنده وجود دارد. با این شرایط ظرفیت مؤثر و کیفیت سرویس بررسی شده و یک حد بالا برای احتمال خطای بسته محاسبه شده است. در [۳۲، ۳۳] نیز تخصیص منابع جهت بیشینه‌کردن ظرفیت مؤثر در شبکه دسترسی رادیویی

در سال‌های اخیر و با تأخیر کم و قابلیت اطمینان بالا بررسی شده است. در [۳۴]، عملکرد یک سیستم مخابراتی با رله تقویت و ارسال همگام از سال بسته‌هایی با طول کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با تخصیص توان، ظرفیت مؤثر سیستم بیشینه شده است. تخصیص توان مشابهی نیز جهت بیشینه کردن ظرفیت مؤثر یک شبکه چندکاربره فرو سو^{۱۵} هنگام ارسال با سال با بسته‌های با طول محدود در [۳۵] مورد توجه قرار گرفته است.

شبیه‌ترین کار به مقاله فعلی، مرجع [۳۶] است. در این مقاله دو گره با استفاده از یک رله HD دومسیره با یکدیگر اطلاعات رد و بدل می‌کنند. اگر چه دو گره اولویت خاصی بر یکدیگر ندارند، با این حال تنها عملکرد یکی از گره‌ها مورد نظر قرار گرفته و تخصیص توان مناسب جهت بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر فقط یک گره محاسبه شده است. از آنجا که عملکرد دو گره به واسطه رله میانی آنها وابسته به یکدیگر است، در نظر گرفتن عملکرد یک گره ممکن است سبب کاهش عملکرد گره دیگر شود. بنابراین در مقاله فعلی عملکرد هر دو گره با هم بهینه شده و از این رو با یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی روبرو هستیم. اگر چه در نظر گرفتن مدل مسئله به صورت چندهدفی حل مسئله را در حالت کلی پیچیده می‌کند، اما نقطه ضعف طرح شده مرجع [۳۶] را از بین برده و از این رو نتایج بدست‌آمده در مقاله حاضر، بسیار کلی‌تر از [۳۶] است و قابلیت استناد بیشتری دارد. علاوه بر این، در مقاله فعلی عملکرد رله به صورت FD نیز در نظر گرفته شده و با عملکرد رله HD مقایسه می‌شود. نکته‌ای که در [۳۶] و مراجع دیگر به آن پرداخته نشده است.

۳- مدل سیستم

در ادامه مدل سیستم مشارکتی شامل رله HD و FD دومسیره با طرح ارسال بسته‌های با طول کوچک توضیح داده خواهد شد. همچنین ظرفیت مؤثر به عنوان نرخ ورود اطلاعات به بافر فرستنده که تأخیر آماری توقف بسته‌ها را نیز تضمین می‌کند نیز توضیح داده خواهد شد.

۳-۱- مخابرات بسته‌های کوچک

فرض کنید فرستنده قصد ارسال s بیت اطلاعات برای گیرنده دارد. این بیت‌ها ابتدا در فرستنده کد شده و تبدیل به m سمبل می‌شود. سپس به صورت یک بسته m سمبلی برای گیرنده ارسال می‌شود. از آنجا که طول بسته ارسال محدود است، بسته در گیرنده با احتمال خطای ε دریافت می‌شود. همچنین نرخ ارسال به صورت

$$\frac{s}{m} \quad (1)$$

نوشته می‌شود [۱۲]. به عبارت دیگر در m بار استفاده از کانال مخابراتی، s بیت از فرستنده به گیرنده ارسال می‌شود. بدیهی است که کدهای مختلف عملکردهای متفاوتی دارند. بنابراین برای یک مقدار مشخص خطا برابر ε ، مقدار بیشینه نرخ در نسبت سیگنال به نویز^{۱۶} γ برابر r و به صورت

فرض کنید گره A قصد ارسال بسته کوچک x_A با طول m_A را برای گره B دارد و گره B نیز قصد ارسال بسته کوچک x_B با طول m_B را برای گره A دارد. هر دو گره بسته خود را هم‌زمان در یک بازه زمانی برای رله R ارسال می‌کنند. گره A بسته خود را با توان P_A و گره B بسته خود را با توان P_B ارسال می‌کند. برای رله دوم سیر به عملکرد HD، رله بسته‌های دریافتی را پس از نرمالیزه کردن توان (رله به بهره می‌کند. هر دو گره بسته ارسال خود را می‌دانند. بنابراین در صورتی که ضرایب کانال را داشته باشند، می‌توانند اثر بسته خود را از روی بسته دریافتی از رله به‌طور کامل حذف کنند. در این حالت

$$y_A = \sqrt{P_R} h_A \beta (\sqrt{P_B} h_B x_B + w_R) + w_A \quad (3)$$

بسته دریافتی در گره A را مشخص می‌کند. در رابطه (۳)، h_A و h_B به ترتیب ضریب کانال محوشونده تخت بین گره A و رله R و گره B و رله R را نشان می‌دهد. همچنین β بهره متغیر رله برای نرمالیزه کردن توان بسته دریافتی است و w_R و w_A نویز سفید گوسی با توان واحد، وارد شده در گره A و رله است. بسته دریافتی در گره B نیز به همین ترتیب نوشته می‌شود. با ساده کردن رابطه و با فرض اینکه توان x_A و x_B برابر یک است، سیگنال به نویز در گره A و B به‌صورت

$$\gamma_A = \frac{P_B P_R H_A H_B}{P_R H_A + P_A H_A + P_B H_B + 1} \quad (4)$$

$$\gamma_B = \frac{P_A P_R H_A H_B}{P_R H_B + P_B H_B + P_A H_A + 1} \quad (5)$$

محاسبه می‌شود. $H_A = |h_A|^2$ بهره توانی کانال بین گره A تا رله و $H_B = |h_B|^2$ بهره توانی کانال بین گره B تا رله است.

در رله دومسیره با عملکرد FD، رله بسته‌های دریافتی را پس از نرمالیزه کردن توان، در همان بازه زمانی برای هر دو گره با توان P_R بازارسال می‌کند و گره‌ها نیز بسته ارسالی رله را در همان بازه زمانی اول دریافت می‌کنند. مشخص است که هر دو گره و رله به علت ارسال و دریافت هم‌زمان، علاوه بر نویز، تداخل خودی نیز دارند. مجدداً گره‌ها بسته ارسالی خود را می‌دانند و می‌توانند آن را حذف کنند. بنابراین، بسته دریافتی در گره A برابر

$$y_A = \sqrt{P_R} h_A \beta (\sqrt{P_B} h_B x_B + \sqrt{P_R} \omega_R x_R + w_R) + \sqrt{P_A} \omega_A x_A + w_A \quad (6)$$

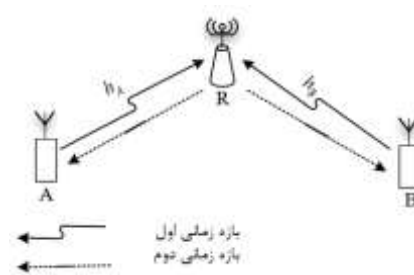
خواهد بود. بسته دریافتی گره B نیز به‌طور مشابه قابل نوشتن است. پارامترهای تکراری دقیقاً مشابه حالت HD هستند. بسته دریافتی رله بعد از نرمالیزه کردن توان و یا همان بسته ارسالی رله است. اما رله را نشان می‌دهند. یا به عبارت دیگر، $\sqrt{P_A} \omega_A x_A$ تداخل خودی باقیمانده در گره A و $\sqrt{P_R} \omega_R x_R$ تداخل خودی باقیمانده در رله است. اگر $\omega_A = \omega_R = 0$ باشد، تداخل خودی به‌طور کامل حذف شده است. در مقابل اگر $\omega_A = \omega_R = 1$ شود، هیچ‌گونه حذف تداخلی در گره A و رله نداریم و احتمالاً رله FD در این حالت عملکرد مناسبی ندارد.

$$r = \log_2(1 + \gamma) - \frac{\gamma(\gamma + 2)}{\sqrt{(\gamma + 1)^2 m}} Q^{-1}(\varepsilon) \log_2 e \quad (2)$$

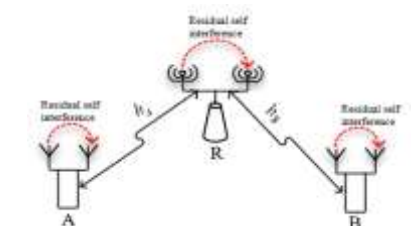
تعریف می‌شود [۳۷، ۱۲]. در این رابطه $Q^{-1}(\cdot)$ معکوس تابع Q (inverse Q-function) و e عدد نپر است [۳۷، ۱۲]. نرخ گذردهی r در رابطه (۲)، بیشینه تعداد بیت‌هایی را نشان می‌دهد که در m بار استفاده از کانال مخابراتی در واحد زمان و واحد پهنای باند، قابل ارسال از فرستنده به گیرنده با خطای کمتر یا مساوی ε است. به این ترتیب واحد r به صورت بیت بر تعداد دفعات استفاده از کانال 17 (bits/c.u.) بیان می‌شود. در رابطه (۲) در صورتی که m به بینهایت و ε به صفر میل کند، r به رابطه معروف ظرفیت شانون میل می‌کند [۱۲]. بنابراین گاهی r را ظرفیت کانال با تعداد دفعات ارسال محدود در نظر می‌گیرند [۱۲]. دقت شود که مطابق رابطه (۲)، r تابعی از m ، ε است؛ اما به علت کوتاه کردن نوشتار، در ادامه به‌صورت r نوشته می‌شود.

۳-۲- رله دومسیره

فرض کنید که دو گره A و B قصد ارسال بسته برای یکدیگر را دارند و این ارسال داده از طریق رله R انجام می‌شود. در ضمن مسیر مستقیم بین گره‌های A و B وجود ندارد. در حالت معمول، در بازه زمانی اول، گره A بسته خود را برای رله R ارسال می‌کند. در بازه زمانی دوم، رله بسته را برای گره B بازارسال می‌کند. به همین ترتیب در دو بازه زمانی بعدی یعنی بازه زمانی سوم و چهارم، گره B برای گره A یک بسته ارسال می‌کند. مشخص است که برای اشتراک‌گذاری دو بسته بین دو گره، به ۴ بازه زمانی احتیاج است. این روش ارسال از نظر بهره طیفی و همچنین تأخیر ارسال مقرون به صرفه نیست. اما در رله دوطرفه HD و FD که عملکرد آنها در شکل ۱ الف و ب نمایش داده شده است، برای ارسال بسته‌ها از گره A به B و بالعکس، به ترتیب ۲ بازه زمانی و ۱ بازه زمانی احتیاج است.



شکل ۱: الف)



شکل ۱: ب)

شکل ۱: رله تمام دوطرفه دومسیره

محاسبه می‌شود. دقت شود که $\log(\cdot)$ تابع لگاریتم طبیعی را نشان می‌دهد.

۳-۴- کانال مخابراتی

کانال مخابراتی بین گره‌ها و رله، به‌صورت محوشونده تخت ریلی در نظر گرفته شده است. ضریب کانال بین گره A و B با رله R به ترتیب برابر $h_A = h_{0,A}d_A^{-\alpha/2}$ و $h_B = h_{0,B}d_B^{-\alpha/2}$ است. $h_{0,B}$ و $h_{0,A}$ ضرایب ناهمبسته گوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس واحد هستند. همچنین d_A و d_B فاصله گره A و گره B تا رله را مشخص می‌کنند و $d_A + d_B = 1$ است. α نیز نمای افت مسیر است.

۳-۵- جدول پارامترها

جهت سهولت بیشتر، متغیرهای اصلی مقاله در جدول ۱ آورده شده است. در ادامه جهت خلاصه‌نویسی بعضی از رابطه‌ها و همچنین در جدول ۱، اندیس i نمایشگر یکی از گره‌های A یا B است یعنی $i \in \{A, B\}$ می‌شود. همچنین $\bar{i}$ مکمل i در مجموعه $\{A, B\}$ است. یعنی اگر $i = A$ شود، $\bar{i} = B$ خواهد بود.

جدول ۱: پارامترهای اصلی مورد استفاده در این مقاله

متغیر	توضیح
m	طول بسته کوچک
ε	احتمال خطای بسته کوچک دریافتی
P	توان ارسالی گره A و B
P_R	توان ارسالی رله R
P_{tot}	کل توان در دسترس قابل تقسیم بین گره‌ها و رله
Ω	ضریب توانی کاهش تداخل خودی در گره‌ها و رله
r_i	نرخ گذردهی گره i
H_i	بهره توانی کانال بین گره i تا رله R
γ_i	نسبت توان سیگنال به توان نویز (تداخل) در گره i
θ_i	پارامتر کیفیت سرویس (تأخیر) گره i
$R_{E,i}$	ظرفیت مؤثر گره i

۴- بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر رله دومسیره

در این بخش تخصیص توان مناسب بین گره‌های A و B و رله R به‌نحوی انجام می‌شود که ظرفیت مؤثر گره A و گره B هنگام ارسال بسته با طول محدود و کوچک بیشینه شود. فرض بر این است که کل توان در دسترس یعنی P_{tot} بین گره‌ها و رله به‌صورت بهینه تقسیم می‌شود. بنابراین، $P_R + 2P = P_{tot}$ است. در ادامه در دو بخش مجزا، مسئله را برای رله دومسیره HD و رله دومسیره FD طرح و حل می‌کنیم.

شرایط دو گره A و B متفاوت است و لزوماً نرخ گذردهی و کیفیت سرویس درخواستی آنها نیز برابر نیست. از این رو در حالت کلی، مسئله بهینه‌سازی را به‌صورت چندهدفی در نظر گرفته و حل می‌کنیم. در مسئله بهینه‌سازی چندهدفی، به جای یک تابع هدف، دو یا چند تابع

بنابراین مدیریت تداخل در رله FD از اهمیت به سزایی برخوردار است. توضیح یک نکته در اینجا اهمیت دارد و آن اینکه چرا فرض می‌کنیم هر گره قادر است بسته ارسالی خود را که از طریق رله بازار سال شده حذف کند اما قادر به حذف کامل تداخل خودی نیست؟ توجیه آن این است که تداخل خودی با توان بالا به گیرنده وارد می‌شود. به علت اثرات نامشخص و غیرخطی بخش‌های مختلف فرستنده و گیرنده، امکان حذف کامل آن در گیرنده وجود ندارد. اما در مقابل، بسته بازار سال شده هر گره به خودش با توان کمی وارد گیرنده می‌شود. پس از فرآیند حذف تداخل، بخش باقیمانده بسیار ناچیز و در حد توان نویز است. بنابراین، به عنوان بخش تداخلی مجزا در نظر گرفته نمی‌شود. با ساده‌کردن رابطه (۶)، سیگنال به نویز و تداخل^{۱۸} در گره A و B به‌صورت

$$\gamma_A = \frac{P_B P_R H_A H_B}{P_R^2 H_A \Omega_R + P_R H_A + (P_A \Omega_A + 1)(P_A H_A + P_B H_B + P_R \Omega_R + 1)} \quad (7)$$

$$\gamma_B = \frac{P_A P_R H_A H_B}{P_R^2 H_B \Omega_R + P_R H_B + (P_B \Omega_B + 1)(P_A H_A + P_B H_B + P_R \Omega_R + 1)} \quad (8)$$

ظاهر می‌شود. از آنجا که تداخل باقیمانده قابل تخمین نیست، در رابطه (۷) و (۸) از میانگین ضریب تداخل توانی باقیمانده به‌صورت $\Omega_B = \mathbb{E}\{\omega_B^2\}$ و $\Omega_A = \mathbb{E}\{\omega_A^2\}$ ، $\Omega_R = \mathbb{E}\{\omega_R^2\}$ ادامه جهت ساده‌سازی و بدون از دست رفتن کلیت مسأله، فرض‌های زیر انجام شده است.

$$\begin{aligned} m_A &= m_B = m \\ P_A &= P_B = P \\ \Omega_A &= \Omega_B = \Omega_R = \Omega \end{aligned}$$

۳-۳- ظرفیت مؤثر

ظرفیت مؤثر برابر نرخ ورود بسته‌ها به بافر یک سیستم مخابراتی، که قابل عبور از کانال مخابراتی است و کیفیت سرویس مشخص برای آن قابل تضمین است، تعریف می‌شود [۳۸، ۳۹]. منظور از کیفیت سرویس، تأخیر آماری بسته‌ها در بافر فرستنده است که به‌صورت

$$\mathbb{P}\{D > D_0\} \approx \epsilon e^{-\theta D_0} \quad (9)$$

تعریف می‌شود [۳۸-۴۰]. در این رابطه $\mathbb{P}\{\cdot\}$ احتمال وقوع پیشامد، D تأخیر بسته‌ها در بافر فرستنده، D_0 یک حد آستانه مشخص برای تأخیر، ϵ احتمال خالی نبودن بافر فرستنده (با احتمال خطای بسته ε اشتباه نشود) و θ پارامتر کیفیت سرویس است. هرچقدر θ بزرگ‌تر انتخاب شود، احتمال تأخیر کمتر می‌شود و کیفیت سرویس سخت‌گیرانه‌تر خواهد بود. در مقابل برای مقادیر کوچک θ ، احتمال تأخیر بیشتر است و کیفیت سرویس زیاد سخت‌گیرانه نیست. پس از مشخص شدن مقدار کیفیت درخواستی هر کاربر با استفاده از پارامتر θ ، ظرفیت مؤثر R_E به‌صورت

$$R_E = -\frac{1}{m\theta} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-m\theta} (1 - \varepsilon) + \varepsilon \right\} \right] \quad (10)$$

یعنی m ، دو برابر طول بسته ارسالی است. حالا نشان می‌دهیم که مسئله بهینه‌سازی (۱۱) مقعر است. برای این کار ابتدا قضیه ۲ و قضیه ۳ را اثبات کرده و در نهایت با قضیه ۴ تقعر مسئله (۱۱) را نشان می‌دهیم.

قضیه ۲: سیگنال به نویز نسبت به توان رله مقعر است و تنها یک نقطه بیشینه دارد. یعنی

$$\frac{\partial^2 \gamma_i}{\partial P_R^2} < 0, i \in \{A, B\}$$

است.

اثبات: جهت سهولت نوشتار، قضیه را برای گره A اثبات می‌کنیم. روابط به‌صورت ساده برای گره B نیز قابل نوشتن و اثبات هست. با استفاده از رابطه (۴)، مشتق مرتبه دوم γ_A نسبت به P_R برابر

$$\frac{\partial^2 \gamma_A}{\partial P_R^2} = -\frac{4H_A H_B (H_A P_{tot} + 1)(H_A P_{tot} + H_B P_{tot} + 2)}{(H_A(P_{tot} + P_R) + H_B(P_{tot} - P_R) + 2)^3} \quad (13)$$

می‌شود. چون $P_R < P_{tot}$ است، مخرج رابطه (۱۳) همیشه مثبت است. بنابراین مشتق دوم در رابطه (۱۳) همیشه منفی است و γ_A نسبت به P_R مقعر است. حالا به سراغ مشتق مرتبه اول به‌صورت

$$\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = \frac{H_A H_B (P_{tot} - 2P_R)}{H_A(P_{tot} + P_R) + H_B(P_{tot} - P_R) + 2} - \frac{H_A H_B P_R (H_A - H_B)(P_{tot} - P_R)}{(H_A(P_{tot} + P_R) + H_B(P_{tot} - P_R) + 2)^2} \quad (14)$$

می‌رویم. در صورتی که رابطه را برابر صفر قرار دهیم، به یک معادله درجه دو می‌رسیم که دو ریشه دارد. این دو ریشه حتماً حقیقی هستند. با محاسبه ریشه‌ها و همچنین محاسبه مشتق مرتبه دوم در هر دو ریشه، یکی از ریشه‌ها جواب قابل قبول خواهد بود زیرا در ریشه دیگر مشتق مرتبه دوم مثبت می‌شود که خلاف اثبات ما برای مشتق مرتبه دوم ذیل رابطه (۱۳) است. P_R^{*A} در رابطه (۱۵) توان بهینه رله است که به ازای آن مشتق مرتبه اول صفر شده و γ_A بیشینه می‌شود.

$$P_R^{*A} = \frac{H_A P_{tot} + H_B P_{tot} + 2 - \sqrt{2(H_A P_{tot} + 1)(H_A P_{tot} + H_B P_{tot} + 2)}}{H_A - H_B} \quad (15)$$

است. به همین ترتیب P_R^{*B} نیز قابل محاسبه است. ■

قضیه ۳: $R_{E,A}$ نسبت r_A نسبت به r_B اکیداً صعودی و مقعر است. یعنی

$$\frac{\partial R_{E,i}}{\partial r_i} > 0, \frac{\partial^2 R_{E,i}}{\partial r_i^2} < 0, i \in \{A, B\}$$

است.

اثبات: ابتدا مشتق مرتبه اول و دوم را مطابق رابطه (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌کنیم. در رابطه (۱۶) چون $\varepsilon_i \leq 0.5$ و تابع نمای همیشه مثبت است، بنابراین صورت و مخرج رابطه مثبت است. پس مشتق مرتبه اول مثبت و ظرفیت مؤثر نسبت به نرخ گذردهی اکیداً صعودی است. به همین دلیل مشابه مشتق مرتبه دوم نیز منفی است. بنابراین ظرفیت مؤثر نسبت به نرخ گذردهی مقعر است.

هدف داریم که باید بهینه شوند. این توابع معمولاً با یکدیگر همسو نبوده و همه آنها در یک نقطه بهینه نمی‌شوند. به همین دلیل در مسئله‌های بهینه‌سازی چندهدفی، به جای یک جواب بهینه مشخص، یک دسته جواب بهینه به نام جواب‌های بهینه پرتو^{۱۹} داریم [۲۳]. در کمینه‌سازی چندهدفی (بیشینه‌سازی چندهدفی)، نقطه‌ای بهینه پرتو است که هیچ نقطه دیگری در فضای تحقق طراحی^{۲۰} یافت نشود که مقدار همه توابع هدف در آن نقطه کمتر یا مساوی (بیشتر یا مساوی) مقدار توابع هدف در نقطه بهینه پرتو شود و دست کم مقدار یکی از توابع هدف در این نقطه کوچکتر (بزرگتر) از مقدار همان تابع هدف در نقطه بهینه پرتو شود [۲۳]. در نهایت در صورت نیاز، کاربر خبره با توجه به اولویت توابع هدف، یک نقطه را به عنوان جواب پیشنهاد می‌دهد. حل مسئله‌های بهینه‌سازی چندهدفی تکنیک‌های مختلفی دارد. برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر [۲۳] را ببینید.

قبل از طرح و حل مسئله، قضیه ۱ را در نظر بگیرید. این قضیه در حل مسئله‌های مطرح‌شده مورد نیاز خواهد بود.

قضیه ۱: اگر $\gamma > 1$ ، $m > 100$ و $\varepsilon > 10^{-23}$ باشد، نرخ گذردهی r در رابطه (۲) نسبت به γ اکیداً صعودی و مقعر است.

$$\forall \{\gamma > 1, m > 100, \varepsilon > 10^{-23}\} \Rightarrow \left\{ \frac{\partial r}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial^2 r}{\partial \gamma^2} \leq 0 \right\}$$

اثبات: به مرجع [۳۴، ۳۶] مراجعه شود. ■

در بیشتر سیستم‌های مخابراتی در شرایط متداول، سیگنال به نویز بالا (حدود ۱۰ و بالاتر) مورد نظر است. بنابراین اغلب اوقات $\gamma > 1$ هست. شرط $m > 100$ نیز به هیچ عنوان محدودکننده نیست. زیرا ۱۰۰ بیت معادل ۱۲،۵ بایت است که مقدار زیادی برای ارسال حتی در ارسال بسته‌های با طول محدود و کوچک محسوب نمی‌شود. خطا $\varepsilon = 10^{-23}$ نیز بسیار کوچک است و تقریباً هیچ وقت مورد نیاز نیست. به همین سبب، شرایط قضیه ۱ سختگیرانه نیست و می‌توان قضیه ۱ را تقریباً همیشه درست فرض کرد.

۴-۱- مسئله بهینه‌سازی چندهدفی در رله دومسیره HD

مسئله بهینه‌سازی چندهدفی در سیستم مشارکتی با رله دو مسیره HD هنگام ارسال با بسته‌های با طول محدود و کوچک، جهت بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر گره‌ها، به‌صورت

$$\begin{cases} \max_{P_R} R_{E,A} \\ \max_{P_R} R_{E,B} \\ \text{s.t. } P_R < P_{tot} \end{cases} \quad (11)$$

است. در مسئله بهینه‌سازی (۱۱)، ظرفیت مؤثر گره‌ها مطابق رابطه (۱۰) به‌صورت

$$R_{E,i} = -\frac{1}{m\theta_i} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i \frac{m}{2} (1 - \varepsilon_i) + \varepsilon_i} \right\} \right], i \in \{A, B\} \quad (12)$$

نوشته می‌شود. ضریب $1/2$ در نظر گرفته شده قبل از r_i در رابطه (۱۲)، به این علت است که در رله HD تعداد دفعات استفاده از کانال مخابراتی

$$\frac{\partial R_{E,A}}{\partial P_R} = \frac{\partial R_{E,A}}{\partial r_A} \frac{\partial r_A}{\partial \gamma_A} \frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} \quad (20)$$

می‌نویسیم. در سمت راست تساوی (۲۰)، کسر اول طبق قضیه ۳ غیرصفر است. کسر دوم نیز با توجه به قضیه ۱ صفر نمی‌شود. اما کسر سوم طبق قضیه ۲ تنها در نقطه P_R^{*A} صفر می‌شود. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت مؤثر گره A نسبت به P_R مقعر است و تنها در نقطه P_R^{*A} به مقدار بیشینه خود می‌رسد. ■

چون توابع هدف مسئله چندهدفی (۱۱) مقعر هستند، روش جمع وزن‌دار^{۲۱} روش مناسبی برای حل آن است. روش جمع وزن‌دار بسیار ساده است و در مسئله چندهدفی مقعر (یا محدب)، شرط لازم و کافی جهت استخراج تمام نقاط بهینه پرتو است [۲۳]. در روش جمع وزن‌دار، تابع هدف اول مسئله بهینه‌سازی (۱۱) با ضریب w و تابع هدف دوم با ضریب $1-w$ با یکدیگر جمع می‌شوند و یک تابع هدف جدید درست می‌کنند. ضریب $0 \leq w \leq 1$ اولویت تابع هدف اول را نشان می‌دهد و به همین ترتیب $0 \leq 1-w \leq 1$ نیز مقدار اولویت تابع هدف دوم را نشان می‌دهد. به این ترتیب مسئله بهینه‌سازی (۱۱) به صورت

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \min_{P_R} J \\ \text{s.t. } P_R < P_{\text{tot}} \end{cases}, \\ & J = \frac{w}{m\theta_A} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_A m \frac{r_A}{2} (1-\varepsilon_A) + \varepsilon_A} \right\} \right] \\ & + \frac{1-w}{m\theta_B} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_B m \frac{r_B}{2} (1-\varepsilon_B) + \varepsilon_B} \right\} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

ساده می‌شود. دقت شود که تابع هدف اول و دوم مسئله (۱۱) با علامت منفی با یکدیگر جمع شده‌اند. بنابراین بیشینه‌سازی مسئله (۱۱) در مسئله (۲۱) به کمینه‌سازی تبدیل شده است.

به علت میانگین آماری که در تعریف ظرفیت مؤثر وجود دارد، حل عددی مسئله (۲۱) زمانبر است. از این رو مسئله را ساده می‌کنیم تا حل آن سریعتر انجام شود. برای ساده‌سازی J در رابطه (۲۱) ابتدا به علت کوچک بودن احتمال خطا، ε_A و ε_B را صفر در نظر می‌گیریم و J را به صورت

$$\begin{aligned} J \approx & \frac{w}{m\theta_A} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_A m \frac{r_A}{2} (1-\varepsilon_A)} \right\} \right] \\ & + \frac{1-w}{m\theta_B} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_B m \frac{r_B}{2} (1-\varepsilon_B)} \right\} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

ساده می‌کنیم. سپس با استفاده از تقریب لگاریتم مجموع تابع نمایی مطابق (۲۳) [۴۱]،

$$\log \mathbb{E} \{ e^z \} \approx \max \{ z \} + C \quad (23)$$

J را باز هم به صورت

$$\frac{\partial R_{E,i}}{\partial r_i} = \frac{1}{2} \frac{\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i)} \right\}}{\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i) + \varepsilon_i} \right\}}, \quad i \in \{A, B\} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 R_{E,i}}{\partial r_i^2} = & \frac{\frac{-\theta_i m}{2} \mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i)} \right\} \left(\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i)} \right\} + \varepsilon_i \right)}{\frac{1}{2} \left(\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i) + \varepsilon_i} \right\} \right)^2} + \\ & \frac{\frac{\theta_i m}{2} \left(\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i)} \right\} \right)^2}{\frac{1}{2} \left(\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i) + \varepsilon_i} \right\} \right)^2} = \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{-\theta_i m \varepsilon_i}{4} \frac{\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i)} \right\}}{\left(\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m \frac{r_i}{2} (1-\varepsilon_i) + \varepsilon_i} \right\} \right)^2}, \quad i \in \{A, B\}$$

■
قضیه ۴: در صورتی که قضیه ۱ برقرار باشد، ظرفیت مؤثر نسبت به توان رله مقعر است و تنها یک نقطه بیشینه دارد. یعنی

$$\frac{\partial^2 R_{E,i}}{\partial P_R^2} < 0, \quad i \in \{A, B\}$$

است.

اثبات: مجدداً قضیه را برای گره A اثبات می‌کنیم. اثبات برای گره B نیز به صورت مشابه انجام می‌شود. طبق قاعده زنجیره‌ای، مشتق مرتبه دوم $R_{E,A}$ نسبت به P_R برابر

$$\frac{\partial^2 R_{E,A}}{\partial P_R^2} = \frac{\partial^2 R_{E,A}}{\partial r_A^2} \left(\frac{\partial r_A}{\partial P_R} \right)^2 + \frac{\partial^2 r_A}{\partial P_R^2} \frac{\partial R_{E,A}}{\partial r_A} \quad (18)$$

می‌شود. در سمت راست رابطه (۱۸)، کسر اول طبق قضیه ۳ منفی است. کسر دوم نیز همیشه مثبت است. کسر چهارم نیز طبق قضیه ۳ مثبت است. اگر اثبات کنیم کسر سوم همیشه منفی است، منفی بودن رابطه (۱۸) اثبات می‌شود. پس کسر سوم را نیز با استفاده از قاعده زنجیره‌ای به صورت (۱۹) بازنویسی می‌کنیم.

$$\frac{\partial^2 r_A}{\partial P_R^2} = \frac{\partial^2 r_A}{\partial \gamma_A^2} \left(\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} \right)^2 + \frac{\partial^2 \gamma_A}{\partial P_R^2} \frac{\partial r_A}{\partial \gamma_A} \quad (19)$$

در سمت راست تساوی (۱۹)، طبق قضیه ۱، کسر اول منفی و کسر چهارم مثبت است. کسر دوم نیز مثبت و کسر سوم طبق قضیه ۲ منفی است. بنابراین رابطه (۱۹) منفی است و می‌توانیم بگوییم که ظرفیت مؤثر گره A نسبت به توان رله مقعر است. حالا مشتق مرتبه اول را به صورت

به‌عنوان نقطه شروع استفاده کرد. جوابی که از حل مسئله (۲۷) حاصل می‌شود را P_R^* می‌نامیم. مقدار سیگنال به نویز گره A و B را نیز به ازای P_R^* برابر γ_A^* و γ_B^* در نظر می‌گیریم.

جهت برقراری فرض قضیه ۱، باید $\gamma_A^* > 1$ و $\gamma_B^* > 1$ باشد. در حالت کلی‌تر می‌توان سطح آستانه مورد نظر را به‌جای مقدار واحد به صورت $\gamma_{T,B}^* > \gamma_{T,A}^*$ و $\gamma_{T,B}^* > \gamma_{T,A}^*$ در نظر گرفت و مقایسه را به‌صورت $\gamma_A^* > \gamma_{T,A}^*$ و $\gamma_B^* > \gamma_{T,B}^*$ انجام داد. این مقایسه ممکن است جهت برقراری فرض قضیه ۱ باشد و یا نیاز گره A و گره B به یک مقدار کمینه نرخ گذردهی را تأمین کند. حالا اگر در گره A شرط $\gamma_A^* > \gamma_{T,A}^*$ برقرار نباشد، گره A ارسال نکرده و رله نیز از توان P_R^{*B} جهت ارسال اطلاعات گره B استفاده می‌کند. به همین ترتیب اگر شرط $\gamma_B^* > \gamma_{T,B}^*$ برقرار نباشد، گره B ارسال نکرده و توان P_R^{*A} به رله اختصاص داده می‌شود.

در قضیه ۲ نشان دادیم که سیگنال به نویز نسبت به توان رله مقعر است و تنها یک نقطه بیشینه دارد. بنابراین معادله $\gamma_A = \gamma_{T,A}$ حتماً دو ریشه برابر $P_{T,A}^1$ و $P_{T,A}^2$ ($P_{T,A}^2 > P_{T,A}^1$) و همچنین معادله $\gamma_B = \gamma_{T,B}$ حتماً دو ریشه برابر $P_{T,B}^1$ و $P_{T,B}^2$ ($P_{T,B}^2 > P_{T,B}^1$) دارد. بنابراین اگر $P_R^* < P_{T,A}^1$ یا $P_R^* > P_{T,A}^2$ شود، گره A ارسال نمی‌کند. به همین ترتیب اگر $P_R^* < P_{T,B}^1$ یا $P_R^* > P_{T,B}^2$ شود، گره B ارسال نخواهد داشت. در رابطه (۲۸) $P_{T,i}^1$ و $P_{T,i}^2$ به ازای $i \in \{A, B\}$ محاسبه شده است. همچنین مقدار σ_1 در رابطه (۲۹) آورده شده است. در رابطه (۲۸) و (۲۹)، $\bar{I}$ مکمل i در مجموعه $\{A, B\}$ است.

$$P_{T,i}^1 = \frac{(H_{\bar{i}} - H_i)\gamma_{T,i} + H_A H_B \gamma_{T,i} - \sigma_1}{2H_A H_B} \quad (28)$$

$$P_{T,i}^2 = \frac{(H_{\bar{i}} - H_i)\gamma_{T,i} + H_A H_B \gamma_{T,i} + \sigma_1}{2H_A H_B}$$

$$\sigma_1 = \left[H_A^2 H_B^2 P_{tot}^2 - 6H_i^2 H_{\bar{i}} P_{tot} \gamma_{T,i} - 2H_i H_{\bar{i}}^2 P_{tot} \gamma_{T,i} + (H_A \gamma_{T,i})^2 + (H_B \gamma_{T,i})^2 - 2H_A H_B \gamma_{T,i}^2 - 8H_A H_B \gamma_{T,i} \right] \quad (29)$$

۲-۴- مسئله بهینه‌سازی چندهدفی در رله دومسیره FD

جهت بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر گره‌ها هنگام ارسال با بسته‌های با طول محدود و کوچک، در یک سیستم مشارکتی با رله دو مسیره FD از مسئله بهینه‌سازی

$$\begin{cases} \max_{P_R} R_{E,A} \\ \max_{P_R} R_{E,B} \\ \text{s.t. } P_R < P_{tot} \end{cases} \quad (30)$$

استفاده می‌شود. در این رابطه ظرفیت مؤثر گره A و B به‌صورت

$$R_{E,i} = -\frac{1}{m\theta_i} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_i m r_i} (1 - \varepsilon_i) + \varepsilon_i \right\} \right], i \in \{A, B\} \quad (31)$$

است. در حالت رله FD، سیگنال به تداخل و نویز نسبت به توان رله مقعر نیست؛ یعنی مشتق مرتبه دوم γ_i ، $i \in \{A, B\}$ نسبت به P_R همیشه منفی نیست. همچنین ظرفیت مؤثر نیز نسبت به توان رله مقعر

$$\begin{aligned} J &\approx \frac{w}{m\theta_A} \left[\max \left\{ -\theta_A \frac{m}{2} r_A \right\} + C + \log(1 - \varepsilon_A) \right] \\ &+ \frac{1-w}{m\theta_B} \left[\max \left\{ -\theta_B \frac{m}{2} r_B \right\} + C + \log(1 - \varepsilon_B) \right] \\ &= \left[\max \left\{ -\frac{w}{2} r_A \right\} + \frac{w}{m\theta_A} C + \frac{w}{m\theta_A} \log(1 - \varepsilon_A) \right] \\ &+ \left[\max \left\{ -\frac{1-w}{2} r_B \right\} + \frac{1-w}{m\theta_B} C + \frac{1-w}{m\theta_B} \log(1 - \varepsilon_B) \right] \end{aligned} \quad (24)$$

ساده می‌کنیم. در رابطه (۲۳) $z \in \mathcal{Z}$ یک متغیر تصادفی با مقادیر مختلف است و $\max\{z\}$ بزرگترین مقدار متغیر تصادفی در مجموعه $\mathcal{Z}$ را مشخص می‌کند. C در رابطه (۲۳) یک مقدار ثابت است و به متغیر تصادفی z وابسته نیست. این مقدار ثابت در رابطه (۲۴) نیز ظاهر شده است. حالا J را در مسئله بهینه‌سازی (۲۱) قرار می‌دهیم و مسئله ساده‌شده را به‌صورت

$$\begin{cases} \min_{P_R} \left\{ \max \left\{ -\frac{w}{2} r_A \right\} + \max \left\{ -\frac{1-w}{2} r_B \right\} + C' \right\} \\ \text{s.t. } P_R < P_{tot} \end{cases} \quad (25)$$

می‌نویسیم. C' نشان‌دهنده پارامترهای ثابت است که تأثیری در بهینه‌سازی ندارند.

مسئله بهینه‌سازی (۲۵) یک مسئله بهینه‌سازی کمینه - بیشینه^{۳۳} است [۲۳]. بنابراین می‌توانیم از روش حل این نوع مسئله در اینجا هم استفاده کنیم. ابتدا دو متغیر کمکی τ_A و τ_B تعریف می‌کنیم و مسئله (۲۵) را به

$$\begin{cases} \min_{P_R} \tau_A + \tau_B \\ \text{s.t. } \tau_A \geq -\frac{w}{2} r_A \\ \text{s.t. } \tau_B \geq -\frac{1-w}{2} r_B \\ \text{s.t. } P_R < P_{tot} \end{cases} \quad (26)$$

تبدیل می‌کنیم. برای ساده‌سازی بیشتر، با استفاده از متغیر کمکی $\tau = \tau_A + \tau_B$ ، مسئله بهینه‌سازی را به شکل

$$\begin{cases} \min_{P_R} \tau \\ \text{s.t. } \tau \geq -\frac{w}{2} r_A - \frac{1-w}{2} r_B \\ \text{s.t. } P_R < P_{tot} \end{cases} \quad (27)$$

بازنویسی می‌کنیم. مسئله بهینه‌سازی (۲۷) میانگین آماری ندارد. بنابراین حل آن به‌مراتب ساده‌تر از حل مسئله بهینه‌سازی (۲۱) است. برای افزودن سرعت همگرایی در حل عددی مسئله نیز می‌توان از

$$P_R = wP_R^{*A} + (1-w)P_R^{*B}$$

برای مسئله بهینه‌سازی نامقعر (۳۰)، روش جمع وزن‌دار شرط کافی برای رسیدن به نقاط بهینه پرتو است. به این معنی که در صورت استفاده از این روش، جواب‌های محاسبه شده حتماً بهینه پرتو هستند. اما این روش شرط لازم برای محاسبه نقاط بهینه نیست. با این حال به علت سادگی روش جمع وزن‌دار، در این مسئله هم از این تکنیک استفاده شده است. در صورتی که از روش‌های دیگر که هم شرط لازم و هم شرط کافی برای رسیدن به نقاط بهینه پرتو در مسئله نامقعر هستند استفاده شود، دیگر امکان مقایسه نتایج مسئله HD با FD وجود ندارد. از آنجا که می‌خواهیم نتایج بدست‌آمده در حالت HD و FD را باهم مقایسه کنیم، بنابراین برای حل مسئله (۳۰) هم از روش جمع وزن‌دار استفاده خواهیم کرد (در مقاله‌های دیگری هم مانند [۱۸] از این روش برای حل مسئله نامحدب استفاده شده است). به این ترتیب با ترکیب وزن‌دار دو تابع هدف، مسئله بهینه‌سازی چندهدفی به صورت

$$\begin{cases} \min_{P_R} J \\ \text{s.t. } P_R < P_{tot} \end{cases}, \quad (34)$$

$$J = \frac{w}{m\theta_A} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_A m r_A} (1 - \varepsilon_A) + \varepsilon_A \right\} \right] + \frac{1-w}{m\theta_B} \log \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-\theta_B m r_B} (1 - \varepsilon_B) + \varepsilon_B \right\} \right]$$

ساده می‌شود. مشابه روابط (۲۲) تا (۲۶)، مسئله (۳۴) نیز به صورت مسئله بهینه‌سازی کمینه - بیشینه

$$\begin{cases} \min_{P_R} \tau \\ \text{s.t. } \tau \geq -\frac{w}{2} r_A - \frac{1-w}{2} r_B \\ \text{s.t. } P_R < P_{tot} \end{cases} \quad (35)$$

ساده می‌شود. مجدداً w و $1-w$ به ترتیب میزان اهمیت ظرفیت مؤثر گره A و گره B را نشان می‌دهند و $r_i, i \in \{A, B\}$ نرخ گذردهی گره i در رله FD است.

۵- شبیه‌سازی، نتایج عددی و مقایسه

شبیه‌سازی و نتایج عددی به همراه مقایسه عملکرد در حالت‌های مختلف در این بخش آورده شده است. در ادامه پارامترهای اصلی به صورت $\varepsilon_A = \varepsilon_B = 10^{-4}$ ، $\alpha = 4$ ، $\beta = 1$ ، $m = 100$ ، $\gamma_{T,A} = \gamma_{T,B} = 1$ و $d_A + d_B = 1$ ، $d_A = 0.5$ و $\theta_A = \theta_B = 10^{-3}$ است. در صورت هرگونه تغییر این پارامترها، مقدار جدید آن ذکر خواهد شد. در شکل ۲ ظرفیت مؤثر گره A بر حسب توان رله HD به ازای سه مقدار $d_A = 0.1$ ، $d_A = 0.3$ و $d_A = 0.8$ رسم شده است. در این شکل P_R^{*A} که به ازای آن $R_{E,A}$ بیشینه می‌شود نیز مشخص شده است. طبق قضیه ۴ ظرفیت مؤثر هر گره تنها به ازای یک مقدار از توان رله بیشینه می‌شود. در ضمن وقتی d_A افزایش می‌یابد، رله به گره B نزدیک می‌شود و بسته گره B با مقدار توان کم هم به رله می‌رسد. از طرف دیگر چون رله از گره A دور شده است، باید توان بیشتری را صرف ارسال بسته برای گره A کند. بنابراین هر چقدر رله R از گره A

نیست و مشتق مرتبه دوم $R_{E,i}$ ، $i \in \{A, B\}$ نسبت به P_R همیشه منفی نمی‌شود. بنابراین قضایای ۲ و ۴ در حالت کلی برای رله FD برقرار نیست. اما می‌توان نشان داد که سیگنال به تداخل و نویز و همچنین ظرفیت مؤثر نسبت به P_R فقط یک نقطه بیشینه دارند. بنابراین می‌توانیم قضیه ۵ را در نظر بگیریم.

قضیه ۵: سیگنال به تداخل و نویز و ظرفیت مؤثر نسبت به توان رله تنها یک نقطه بیشینه دارد.

اثبات: جهت سادگی اثبات را برای گره A انجام می‌دهیم. روابط به سادگی برای گره B نیز نوشته و اثبات می‌شود. γ_A برای رله FD در رابطه (۷) نوشته شده است. چون مقدار γ_A همیشه مثبت است و به ازای $P_R = 0$ و $P_{tot} = 0$ صفر می‌شود، بنابراین حتماً یک نقطه بیشینه را دارد. سپس با محاسبه مشتق مرتبه اول نسبت به P_R ، به معادله درجه دو رسیده و دو مقدار برای P_R به صورت

$$P_{R_1}, P_{R_2} = \frac{(H_A P_{tot} + H_B P_{tot} + 2)(\Omega P_{tot} + 2)}{(H_A - H_B)(\Omega P_{tot} + 2) + 2\Omega(H_A P_{tot} + 1)} \pm \frac{2\sqrt{(H_A P_{tot} + 1)(\Omega P_{tot} + 1)(\Omega P_{tot} + 2)(H_A P_{tot} + H_B P_{tot} + 2)}}{(H_A - H_B)(\Omega P_{tot} + 2) + 2\Omega(H_A P_{tot} + 1)} \quad (32)$$

محاسبه می‌شود. دقت شود که علامت کسر دوم برای P_{R_1} مثبت و برای P_{R_2} منفی است. ابتدا فرض می‌کنیم P_{R_1} جواب مورد نظر است و $P_{R_1} \geq 0$ است. پس از ضرب طرفین تساوی در مخرج کسرها و رسیدن به یک عبارت جبری، آن را تعیین علامت می‌کنیم. پس از ساده سازی نتیجه می‌شود که $H_A \leq 0$ می‌شود که صحیح نیست. بنابراین، γ_A فقط یک نقطه بیشینه به صورت

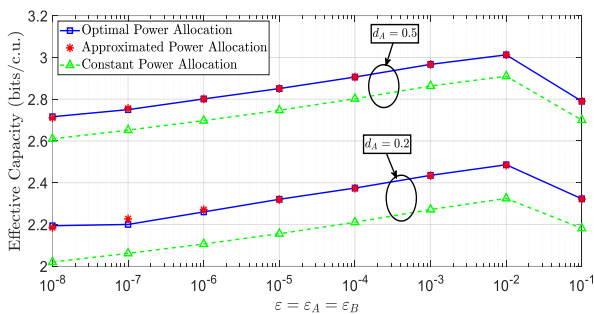
$$P_R^{*A} = \frac{(H_A P_{tot} + H_B P_{tot} + 2)(\Omega P_{tot} + 2)}{(H_A - H_B)(\Omega P_{tot} + 2) + 2\Omega(H_A P_{tot} + 1)} - \frac{2\sqrt{(H_A P_{tot} + 1)(\Omega P_{tot} + 1)(\Omega P_{tot} + 2)(H_A P_{tot} + H_B P_{tot} + 2)}}{(H_A - H_B)(\Omega P_{tot} + 2) + 2\Omega(H_A P_{tot} + 1)} \quad (33)$$

دارد. سپس مشابه روابط قضیه ۴ و البته با در نظر گرفتن مفروضات قضیه ۱، می‌توان نشان داد که $R_{E,A}$ نیز دقیقاً در نقطه P_R^{*A} بیشینه می‌شود. ■

علی‌رغم مقعر نبودن ظرفیت مؤثر نسبت به توان رله، اهمیت قضیه ۵ در این است که نشان می‌دهد ظرفیت مؤثر تنها یک نقطه بیشینه دارد. بنابراین هنگام حل عددی مسئله و در صورت همگراشدن الگوریتم حل، جواب محاسبه شده حتماً جواب بیشینه است. از طرف دیگر می‌توان نشان داد که وقتی حذف تداخل خودی به خوبی انجام می‌شود و $\Omega \rightarrow 0$ میل می‌کند، قضایای ۲ و ۴ برقرار هستند و ظرفیت مؤثر مقعر است. بنابراین جواب بهینه برای گره A و B، حتی در حالتی که Ω کوچک ولی لزوماً نزدیک به صفر نیست، نزدیک به P_R^{*A} و P_R^{*B} خواهد بود. بنابراین جهت افزایش سرعت محاسبات در بهینه‌سازی چندهدفی، از نقطه

$$P_R = wP_R^{*A} + (1-w)P_R^{*B}$$

به عنوان نقطه شروع استفاده خواهد شد.

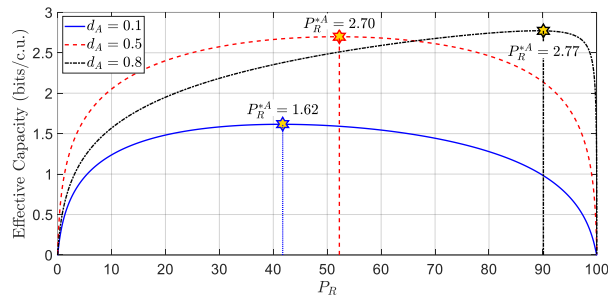


شکل ۴: جمع وزن‌دار ظرفیت مؤثر بر حسب احتمال خطای بیت با

تخصیص توان بهینه، تقریبی و تخصیص توان مساوی در رله HD

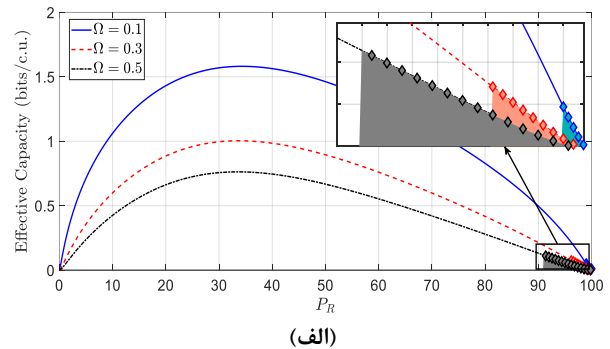
در شکل ۴ جمع وزن‌دار ظرفیت مؤثر دو گر A و B با وزن یکسان $w=0.5$ بر حسب احتمال خطای بیت $\varepsilon = \varepsilon_A = \varepsilon_B$ در رله HD رسم شده است. آنچه مشخص است اینکه ظرفیت مؤثر با تخصیص توان تقریبی و حل مسئله بهینه‌سازی (۲۷)، تطبیق بسیار خوبی با ظرفیت مؤثر با تخصیص توان بهینه و حل مسئله بهینه‌سازی (۲۱) دارد. از آنجا که حل مسئله بهینه‌سازی ساده شده به صورت (۲۷) سرعت اجرای بسیار بالاتری دارد، در ادامه نیز برای مقایسه‌های بیشتر از تخصیص توان تقریبی استفاده خواهد شد. سرعت اجرا در جدول ۲ مقایسه شده است. در شکل ۴ جمع وزن‌دار ظرفیت مؤثر دو گر با تخصیص توان مساوی $P_{tot}/3$ بین دو گر A و B و رله R نیز رسم شده است. مشخص است که ظرفیت مؤثر با تخصیص توان بهینه عملکرد به مراتب بهتری نسبت به تخصیص توان برابر بین گر‌ها و رله دارد. این عملکرد بهتر در شرایطی که رله در وسط گر‌ها قرار نگرفته است، بیشتر به چشم می‌آید.

در شکل ۴ جمع وزن‌دار ظرفیت مؤثر دو گر با وزن یکسان $w=0.5$ برای $d_A=0.2$ و دیگری برای $d_A=0.5$ رسم شده است. وزن یکسان $w=0.5$ به این معنی است که اهمیت دو گر A و B یکسان است و مسئله بهینه‌سازی چندهدفی سعی در بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر هر دو گر با اولویت یکسان دارد. وقتی رله بین دو گر قرار گرفته و $d_A=0.5$ است، جمع وزن‌دار ظرفیت مؤثر بیشتر از حالتی است که رله از گر B دور شده و $d_A=0.2$ است. در حالتی که رله از گر B دور شده است، تضعیف کانال رله تا گر B زیاده‌تر از تضعیف کانال رله تا گر A است. به این سبب بخشی از توان در دسترس برای جبران این تضعیف اضافی مصرف شده تا دو گر با اولویت یکسان از نظر تضعیف کانال مشابه هم شوند. سپس، توان باقیمانده طوری تقسیم می‌شود که جمع وزن‌دار ظرفیت مؤثر گر A و B بیشینه شود. به این دلیل عملکرد سیستم با اولویت یکسان بین گر‌ها، برای حالتی که رله وسط دو گر قرار می‌گیرد، بزرگتر است. همچنین در شکل ۴ ظرفیت مؤثر در یک مقدار مشخص احتمال خطای بسته ε به مقدار بیشینه خود می‌رسد. بنابراین بهتر است مقادیر m ، ε و θ متناسب با یکدیگر انتخاب شوند. مشابه شبیه‌سازی‌های شکل ۴، شبیه‌سازی‌های دیگری نیز برای جمع وزن‌دار

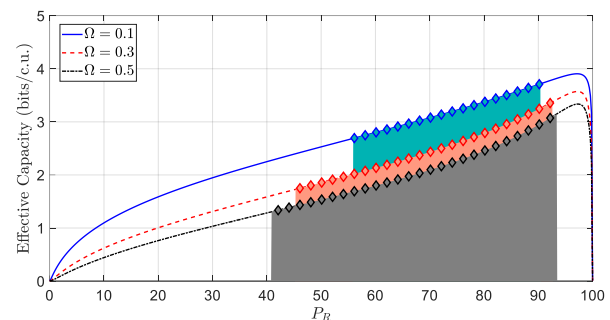


شکل ۵: ظرفیت مؤثر گر A بر حسب توان رله به ازای فاصله‌های

متفاوت گر A از رله HD



(الف)



(ب)

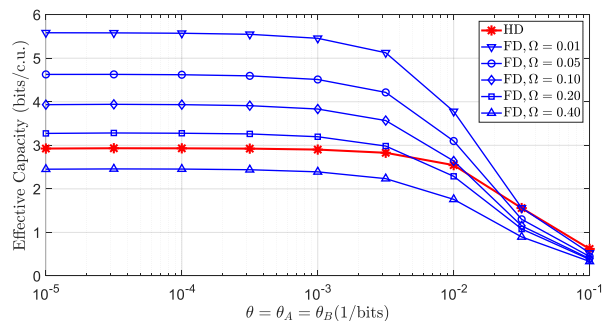
شکل ۶: ظرفیت مؤثر گر A بر حسب توان رله به ازای سه مقدار

 Ω در رله FD (الف) $d_A=0.1$ (ب) $d_A=0.9$

دور شده و به گر B نزدیک می‌شود، بهتر است توان بیشتری به رله اختصاص داده شود. این نکته نیز در شکل ۲ مشخص است.

در قضیه ۵ دیدیم که ظرفیت مؤثر در رله FD نسبت به توان رله لزوماً مقعر نیست. اما ظرفیت مؤثر همیشه در یک نقطه بیشینه می‌شود. در ضمن با کاهش میانگین ضریب تداخل توانی Ω ، نسبت سیگنال به نویز و تداخل رله FD به نسبت سیگنال به نویز HD میل می‌کند. در شکل ۳ ظرفیت مؤثر گر A بر حسب توان رله FD و سه مقدار $\Omega=0.1$ ، $\Omega=0.3$ و $\Omega=0.5$ رسم شده است. در شکل (الف) $d_A=0.1$ و در شکل (ب) $d_A=0.9$ است. در هر سه نمودار ظرفیت مؤثر فقط یک نقطه بیشینه دارد. اما ظرفیت مؤثر همیشه مقعر نیست و در شکل ۵ بخش‌هایی از نمودار که مشتق مرتبه دوم آن مثبت است، پررنگ شده است. در ضمن با کاهش Ω این بخش‌ها نیز کوچک می‌شود. از آنجا که ضریب تداخل توانی در شرایط واقعی کمتر از ۰.۱ است، بنابراین می‌توان ظرفیت مؤثر را در رله FD و شرایط عملی $\Omega \ll 1$ مقعر فرض کرد.

سرویس سخت‌گیرانه، حذف نسبتاً کامل تداخل خودی در رله FD یا استفاده از رله HD پیشنهاد می‌شود. با افزایش بیشتر θ ، در نهایت عملکرد رله FD در همه مقادیر θ بدتر از رله HD می‌شود. در این شرایط تداخل خودی چنان شدید است که حتی استفاده دو برابری رله HD از بازه‌های زمانی یا فرکانسی را جبران می‌کند.



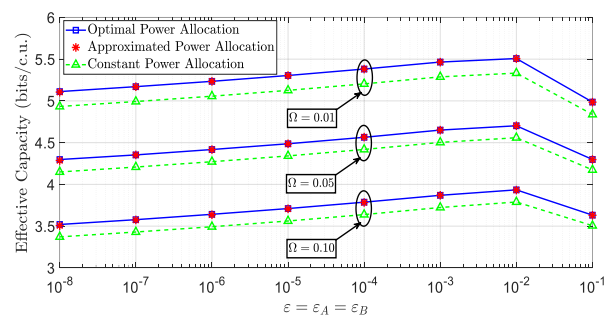
شکل ۶: مقایسه جمع وزن دار ظرفیت مؤثر در رله HD و رله FD به ازای مقادیر مختلف ضریب تداخل خودی

در مدل ارائه‌شده، اولویت گره A و گره B لزوماً یکسان نیست. بنابراین در تبدیل مسئله چندهدفی و درست کردن جمع وزن دار ظرفیت مؤثر گره‌ها، وزن w می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. در شکل ۷ جمع وزن دار ظرفیت مؤثر بر حسب w برای رله HD و رله FD با $\Omega = 0.1$ رسم شده است. جهت مقایسه بهتر، فاصله رله تا گره A برابر سه مقدار $d_A = 0.5$ ، $d_A = 0.3$ و $d_A = 0.7$ در نظر گرفته شده است. وقتی $d_A = 0.5$ و رله در وسط دو گره است، ضریب w تأثیر زیادی روی جمع وزن دار ظرفیت مؤثر ندارد. در شرایطی که رله وسط دو گره است، سیگنال به نویز (و تداخل) دو گره متقارن هستند و در حالت میانگین، جمع وزن دار ظرفیت مؤثر سیستم با همه مقادیر w یکسان است. اما وقتی رله در وسط دو گره قرار ندارد، اولویت گره‌ها و مقدار w روی جمع وزن دار ظرفیت مؤثر تأثیر نسبتاً زیادی دارد. در حالی که رله به گره A نزدیک و $d_A = 0.3$ است، با افزایش w (افزایش اولویت عملکرد گره A)، جمع وزن دار ظرفیت مؤثر کاهش می‌یابد. در این شرایط کانال رله تا گره B تضعیف‌یادتری نسبت به کانال رله تا گره A دارد. در مقادیر کم w ، توان به‌صورتی تقسیم می‌شود که شرایط بد کانال رله تا گره B جبران می‌شود و عملکرد نسبتاً خوبی حاصل می‌شود. اما وقتی w بزرگ شده و اولویت گره A افزایش می‌یابد، توان طوری تقسیم می‌شود که گره A به عملکرد مناسبی برسد و به همین دلیل به عملکرد گره B توجه زیادی نمی‌شود. در این حالت، شرایط نامناسب کانال رله تا گره B تأثیر خود را روی عملکرد کلی سیستم می‌گذارد و جمع وزن دار ظرفیت مؤثر کم می‌شود. وقتی هم که $d_A = 0.7$ می‌شود، شرایط کاملاً برعکس شده و با افزایش w جمع وزن دار ظرفیت نیز افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای داشتن عملکرد مناسب، وقتی اولویت عملکرد گره‌های مختلف یکسان نیست، جایابی دقیق رله در بین گره‌ها لازم بوده و تأثیر زیادی در عملکرد کلی سیستم دارد.

ظرفیت مؤثر بر حسب طول‌های مختلف بسته m نیز انجام شده که نتایج مشابهی دارد. جهت پرهیز از تکرار، این نمودارها در اینجا آورده نشده است.

شکل ۵ جمع وزن دار ظرفیت مؤثر با وزن یکسان $w = 0.5$ ، بر حسب احتمال خطای بیت $\varepsilon = \varepsilon_A = \varepsilon_B$ در رله FD بین دو گره A و B است ($d_A = d_B = 0.5$). این شبیه‌سازی برای سه حالت تقریباً بدون تداخل خودی با $\Omega = 0.01$ ، با مقدار متوسط تداخل خودی و $\Omega = 0.05$ و تداخل خودی نسبتاً زیاد با $\Omega = 0.1$ انجام شده است. جمع وزن دار ظرفیت مؤثر با حل بهینه مسئله (۳۴) و حل تقریبی مسئله (۳۵) منطبق بر هم هستند و این نشان‌دهنده دقت بالای مسئله بهینه‌سازی ساده‌شده است. حل مسئله بهینه‌سازی ساده‌شده سرعت اجرای بسیار بالاتری دارد. بنابراین در ادامه جهت مقایسه‌های بیشتر، از تخصیص توان تقریبی استفاده خواهد شد. مدت زمان اجرا جهت حل مسئله به‌صورت بهینه و ساده‌شده در جدول ۲ مقایسه شده است.

در شکل ۵ جمع وزن دار ظرفیت مؤثر دو گره با تخصیص توان مساوی $P_{tot}/3$ نیز رسم شده است. ظرفیت مؤثر با تخصیص توان بهینه، عملکرد به مراتب بهتری نسبت به تخصیص توان برابر بین گره‌ها و رله دارد. همچنین همان‌طور که انتظار می‌رفت، با کاهش ضریب توانی تداخل خودی Ω ، ظرفیت مؤثر افزایش خواهد داشت.



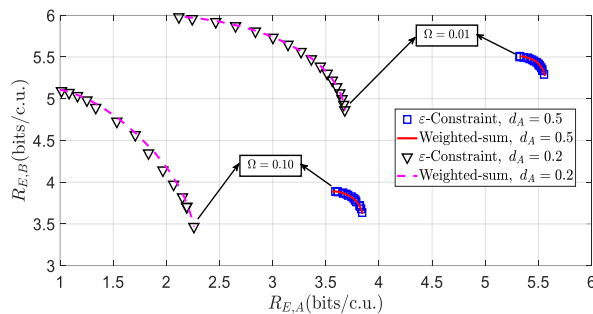
شکل ۵: جمع وزن دار ظرفیت مؤثر بر حسب احتمال خطای بیت با

تخصیص توان بهینه، تقریبی و تخصیص توان مساوی در رله FD

در شکل ۶ جمع وزن دار ظرفیت مؤثر در رله HD و رله FD مقایسه شده است. رله FD تداخل خودی دارد و این تداخل می‌تواند عملکرد کلی سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. همان‌طور که مشخص است، در مقادیر کم تداخل خودی مثلاً $\Omega = 0.01$ ، ظرفیت مؤثر رله FD تقریباً دو برابر ظرفیت مؤثر رله HD است. دلیل این امر این است که رله FD برای دریافت بسته‌ها و ارسال آنها به گره‌ها فقط از یک بازه زمانی یا فرکانسی استفاده می‌کند. اما رله HD برای انتقال همین بسته، از دو بازه زمانی یا فرکانسی استفاده می‌کند. وقتی که تداخل خودی به خوبی حذف می‌شود، عملکرد رله FD دو برابر رله HD می‌شود.

با افزایش ضریب تداخل خودی، عملکرد رله FD کاهش می‌یابد. حتی در مقادیر بزرگ θ ، معادل کیفیت سرویس سخت‌گیرانه و تأخیر بافر بسیار کم، رله HD عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، تداخل خودی اثر خود را در مقادیر بزرگ θ و کیفیت سرویس سخت‌گیرانه، بیشتر نشان می‌دهد. بنابراین، در صورت نیاز به کیفیت

استفاده شده و به همین دلیل در قید اضافه شده، $R_{E,B}$ با μ مقایسه می‌شود.

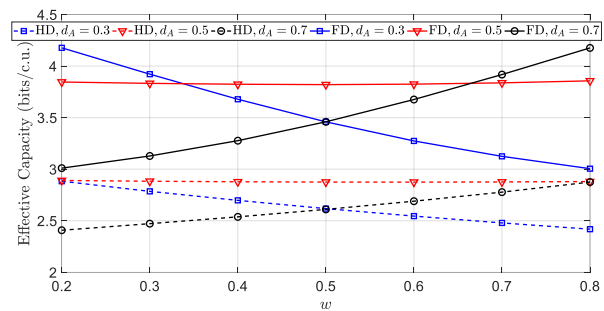


شکل ۸: مرز پرتو رله FD محاسبه‌شده با دو روش

در شکل ۸ مرز بهینه پرتو در رله FD، محاسبه‌شده با دو روش جمع وزن دار و ϵ -constraint رسم شده است. جهت بررسی دقیق‌تر، فاصله رله تا گره A یکبار $d_A = 0.5$ و یکبار هم $d_A = 0.2$ فرض شده است. همچنین شدت تداخل خودی دو مقدار کم $\Omega = 0.01$ و مقدار نسبتاً زیاد $\Omega = 0.10$ در نظر گرفته شده است. مشخص است که مرز پرتو محاسبه‌شده با هر دو روش تقریباً منطبق روی یکدیگر هستند. بنابراین حل مسئله بهینه‌سازی نامقعر (۳۰) با روش جمع وزن دار، عملکرد بسیار نزدیک به بهینه دارد.

در حالتی که رله در وسط دو گره و $d_A = 0.5$ است، عملکرد متقارن است و محدوده تغییرات دو گره یکسان هستند. همچنین بازه تغییرات خیلی زیاد نیست. اما در عوض وقتی رله به گره A نزدیک شده است، تقارن از بین رفته و بازه تغییرات نیز خیلی زیاد شده است. به عنوان مثال در شرایطی که $\Omega = 0.01$ است، ظرفیت مؤثر گره A از مقدار $R_{E,A} = 2.1$ (bits/c.u.) تا $R_{E,A} = 3.7$ (bits/c.u.) و ظرفیت مؤثر گره B از $R_{E,B} = 4.9$ (bits/c.u.) تا $R_{E,B} = 6.0$ (bits/c.u.) تغییر می‌کند. در شرایطی هم که $\Omega = 0.10$ است، ظرفیت مؤثر گره A از مقدار $R_{E,A} = 1.0$ (bits/c.u.) تا $R_{E,A} = 2.2$ (bits/c.u.) و ظرفیت مؤثر گره B از $R_{E,B} = 3.5$ (bits/c.u.) تا $R_{E,B} = 5.1$ (bits/c.u.) تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تخصیص توان مخصوصاً در حالتی که رله در وسط دو گره A و B قرار نگرفته است بسیار کارآمد است و می‌تواند عملکرد کلی سیستم را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.

در جدول ۲ مقایسه‌ای بین زمان اجرا و حل مسئله بهینه‌سازی در دو حالت بهینه و ساده‌شده برای رله HD و FD و برای ۳ مقدار متفاوت احتمال خطا $\epsilon = \epsilon_A = \epsilon_B$ انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها روی یک لپ تاپ خانگی با پردازنده ۸ هسته‌ای Intel(R) Core(TM) i7-3632QM CPU @ 2.20GHz با 6GB حافظه انجام شده است. در هر مقدار از احتمال خطا، ۱۰۰۰ نمونه کانال تصادفی ساخته شده و شبیه‌سازی برای رسیدن به مقدار گرادیان کمتر از ۰.۱ در هر نقطه انجام می‌شود. زمان حل بهینه و حل ساده‌شده ثبت می‌شود. سپس این کار ۱۰۰ بار تکرار شده و میانگین نتایج زمان اجرا در جدول ۲ آورده شده است. مشخص است که مدت زمان اجرا در حالت ساده شده به



شکل ۹: مقایسه جمع وزن دار ظرفیت مؤثر در رله HD و رله FD بر حسب وزن w و فاصله‌های مختلف رله بین دو گره A و B

در مقاله حاضر به جای استفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفی، مسئله به صورت بهینه‌سازی چندهدفی حل شده است. در مسئله تک‌هدفی، تابع هدف به صورت میانگین ظرفیت مؤثر دو گره تعریف می‌شود و بنابراین $R_E = 0.5(R_{E,A} + R_{E,B})$ بهینه می‌شود. حل این مسئله معادل حل مسئله به صورت چندهدفی با $w = 0.5$ است. بنابراین می‌توان گفت که مدلسازی مسئله به صورت چندهدفی و حل آن جامع‌تر از مدل متداول تک‌هدفی است و نتایج حاصل نیز باید بهتر باشد. این بهبود عملکرد در شکل ۷ و زمانی که رله در وسط دو گره A و B قرار ندارد، کاملاً مشخص است. به عنوان مثال وقتی رله به گره A نزدیک و $d_A = 0.3$ است، حل مسئله به صورت تک‌هدفی جوابی برابر $R_E = 3.46$ (bits/c.u.) در حالت FD ($R_E = 2.61$ (bits/c.u.)) اما در حل مسئله به صورت چندهدفی، در صورت انتخاب مناسب وزن w، مجموع وزن دار ظرفیت مؤثر می‌تواند تا حدود ۲۵ درصد در حالت FD (۱۵ درصد در حالت HD) بیشتر از میانگین ظرفیت مؤثر شود. امکان اولویت‌بندی عملکرد گره‌ها نکته دیگری است که در بهینه‌سازی چندهدفی وجود دارد و سبب بهبود عملکرد کلی سیستم می‌شود.

در بخش ۲-۴ گفتیم که در مسئله‌های چندهدفی نامقعر، روش جمع وزن دار تنها شرط کافی برای رسیدن به نقاط بهینه پرتو است. جهت بررسی عملکرد این روش، مرز پرتو محاسبه‌شده با روش جمع وزن دار و روش ϵ -constraint با هم در شکل ۸ رسم شده‌اند. روش ϵ -constraint شرط لازم و کافی برای رسیدن به همه نقاط بهینه پرتو در مسائل نامقعر است [۲۳]. این روش در حالتی که در مسئله بهینه‌سازی چندهدفی تنها دو تابع هدف داریم، بسیار ساده است. به این ترتیب که یکی از توابع هدف مثل $R_{E,B}$ در رابطه (۳۰) به قیدهای مسئله منتقل شده و مسئله بهینه‌سازی به صورت

$$\begin{cases} \max_{P_R} R_{E,A} \\ \text{s.t. } R_{E,B} > \mu \\ \text{s.t. } P_R < P_{tot} \end{cases} \quad (36)$$

بازنویسی می‌شود. در این مسئله با تغییر μ و حل مسئله، مرز پرتو محاسبه می‌شود (در روش ϵ -constraint وقتی یکی از توابع هدف به قیدهای مسئله اضافه می‌شود، این تابع با ϵ مقایسه می‌شود و دلیل نام‌گذاری این روش نیز همین است. اما در این مقاله ϵ در جای دیگری

میانگین آماری است، حل آن بسیار طولانی و زمانبر است. از این رو روش تقریبی برای محاسبه توان بهینه رله و گره‌ها بدست آوردیم. جواب حاصل از حل مسئله تقریبی، همخوانی بسیار خوبی با نتایج حل بهینه مسئله دارد. همچنین نشان دادیم که در نظر گرفتن بهینه‌سازی به صورت چندهدفی، نتایج بهتری در مقایسه با حل مسئله به صورت تک‌هدفی دارد. در حالت تک‌هدفی، ظرفیت مؤثر دو گره با وزن یکسان با هم جمع شده و بیشینه می‌شوند. اما در حالت چندهدفی، اولویت و وزن گره‌ها لزوماً برابر نیست. بنابراین، عملکرد کلی سیستم نیز مخصوصاً وقتی که رله در وسط دو گره قرار ندارد و یا اولویت دو گره یکسان نیست، بهتر از عملکرد سیستم در حالت تک‌هدفی است. در مقایسه عملکرد رله HD و FD، دیدیم که هنگام کاهش تداخل خودی به مقدار مناسب، عملکرد رله FD بهتر از HD است. با افزایش θ و نیاز سخت‌گیرانه گره‌ها به تأخیر کم، عملکرد هر دو رله HD و FD به طور طبیعی کاهش می‌یابد. اما در این شرایط رفته رفته عملکرد HD بهتر از FD می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که در شرایطی که کیفیت سرویس سخت‌گیرانه مد نظر است، حذف تداخل خودی در رله FD به مقدار زیاد یا استفاده از رله HD توصیه می‌شود.

مراجع

- [1] L. Zhang and Y.-C. Liang, "Average throughput analysis and optimization in cooperative IoT networks with short packet communication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 12, pp. 11549-11562, 2018.
- [2] D. Miller, "Blockchain and the internet of things in the industrial sector," *IT professional*, vol. 20, no. 3, pp. 15-18, 2018.
- [3] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, "The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0," *IEEE industrial electronics magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 17-27, 2017.
- [4] Z. Lv, "Virtual reality in the context of Internet of Things," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 13, pp. 9593-9602, 2020.
- [5] C. G. Coogan and B. He, "Brain-computer interface control in a virtual reality environment and applications for the internet of things," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 10840-10849, 2018.
- [6] G. J. Sutton et al., "Enabling technologies for ultra-reliable and low latency communications: From PHY and MAC layer perspectives," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2488-2524, 2019.
- [7] H. A. B. Salameh, S. Almajali, M. Ayyash, and H. Elgala, "Spectrum assignment in cognitive radio networks for internet-of-things delay-sensitive applications under jamming attacks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 1904-1913, 2018.
- [8] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, "6G wireless communications: Vision and potential techniques," *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, pp. 70-75, 2019.
- [9] M. Shirvanimoghaddam et al., "Short block-length codes for ultra-reliable low latency communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 2, pp. 130-137, 2018.
- [10] H. Chen et al., "Ultra-reliable low latency cellular networks: Use cases, challenges and approaches," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 12, pp. 119-125, 2018.
- [11] Y. Gu, H. Chen, Y. Li, L. Song, and B. Vucetic, "Short-packet two-way amplify-and-forward relaying," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 263-267, 2017.
- [12] G. Durisi, T. Koch, and P. Popovski, "Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with

مراتب کمتر از حالت حل بهینه است. این اختلاف با افزایش تعداد نمونه‌های کانال بیشتر هم می‌شود.

جدول ۲: مقایسه مدت زمان اجرا برحسب ثانیه در حل مسئله به صورت بهینه و ساده شده

نوع رله	HD		
	10^{-8}	10^{-5}	10^{-2}
حل بهینه (ثانیه)	1415	1356	1327
حل ساده شده (ثانیه)	564	561	561

نوع رله	FD		
	0.01	0.05	0.10
حل بهینه (ثانیه)	1935	1657	1622
حل ساده شده (ثانیه)	553	540	547

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیتی که از سال داده با تأخیر کم در مخابرات نسل پنجم دارد، این مقاله انتقال داده‌ها به صورت بسته‌های با طول کوچک و محدود بین دو گره را در نظر گرفته است. از سال داده با طول محدود، زمان ارسال کم و همچنین زمان کدگذاری اندکی دارد. بنابراین جهت انتقال اطلاعات حساس به تأخیر مناسب است. همچنین از رله دومسیره برای جابجایی اطلاعات بین دو گره استفاده می‌شود. رله می‌تواند HD یا FD باشد. در صورت استفاده از رله FD، مدت زمان جابجایی بسته‌ها بین دو گره باز هم کمتر می‌شود. در نهایت جهت بررسی عملکرد، مجموع وزن دار ظرفیت مؤثر دو گره در نظر گرفته شده است. ظرفیت مؤثر نرخ قابل انتقال از کانال با تضمین تأخیر آماری معطلی بسته‌ها در بافر فرستنده را نشان می‌دهد. در مدل ارائه شده، تخصیص توان بهینه جهت بیشینه کردن ظرفیت مؤثر دو گره، وقتی جابجایی بسته‌ها بین این دو گره با رله HD یا FD دومسیره انجام می‌شود، محاسبه شده و نشان داده شده که عملکرد حاصل بهتر از تخصیص توان یکسان بین گره‌ها است. از آنجا که اولویت عملکرد دو گره لزوماً یکسان نیست، بهینه‌سازی مسئله را به صورت چندهدفی در نظر گرفتیم. هنگام استفاده از رله HD، اثبات کردیم که مسئله بهینه‌سازی مقعر است و با روش جمع وزن دار، مسئله را حل کردیم. اما هنگام استفاده از رله FD، مسئله مقعر نیست؛ اما یک نقطه بهینه دارد. بنابراین در این شرایط نیز از روش جمع وزن دار برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده کردیم. چون مسئله بهینه‌سازی شامل

- relaying?," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 348-351, 2017.
- [28] K. Singh, S. Biswas, M.-L. Ku, and M. F. Flanagan, "Transceiver Design for Full-Duplex Ultra-Reliable Low-Latency Communications with Finite Blocklength," in *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2020: IEEE, pp. 1-6.
- [29] K.-G. Wu, F.-T. Chien, Y.-F. Lin, and M.-K. Chang, "SINR and Delay Analyses in Two-Way Full-Duplex SWIPT-Enabled Relaying Systems," *IEEE Transactions on Communications*, 2020.
- [30] C. Guo, L. Liang, and G. Y. Li, "Resource allocation for low-latency vehicular communications: An effective capacity perspective," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 4, pp. 905-917, 2019.
- [31] J. Choi, "An effective capacity-based approach to multi-channel low-latency wireless communications," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 3, pp. 2476-2486, 2018.
- [32] H. Ren *et al.*, "Power-and rate-adaptation improves the effective capacity of C-RAN for Nakagami- m fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 10841-10855, 2018.
- [33] J. Khan and L. Jacob, "Resource Allocation for CoMP Enabled URLLC in 5G C-RAN Architecture," *IEEE Systems Journal*, 2020.
- [34] Y. Hu, M. C. Gursoy, and A. Schmeink, "Optimal Power Allocation for Amplify and Forward Relaying with Finite Blocklength Codes and QoS Constraints," in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2018: IEEE, pp. 1-5.
- [35] Y. Hu, M. Ozmen, M. C. Gursoy, and A. Schmeink, "Optimal power allocation for QoS-constrained downlink networks with finite blocklength codes," in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2018: IEEE, pp. 1-6.
- [۳۶] محمد لاری، زهرا کشاورز گندمانی، الهه مداح، "بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر در رله‌های نیمه دوطرفه دومسیره با بسته‌های کوچک"، مجله پردازش سیگنال پیشرفته، دوره ۳، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۲۷-۲۳۸.
- [37] Y. Hu, Y. Zhu, M. C. Gursoy, and A. Schmeink, "SWIPT-enabled relaying in IoT networks operating with finite blocklength codes," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 1, pp. 74-88, 2018.
- [38] M. Lari, A. Mohammadi, A. Abdipour, and I. Lee, "Characterization of effective capacity in antenna selection MIMO systems," *Journal of communications and networks*, vol. 15, no. 5, pp. 476-485, 2013.
- [39] M. Lari, A. Mohammadi, A. Abdipour, and I. Lee, "Characterization of effective capacity in AF relay systems," *IEICE Electronics Express*, vol. 9, no. 7, pp. 679-684, 2012.
- [40] D. Qiao, M. C. Gursoy, and S. Velipasalar, "Throughput-Delay Tradeoffs with Finite Blocklength Coding over Multiple Coherence Blocks," *IEEE Transactions on Communications*, 2019.
- [41] A. Jeffrey and D. Zwillinger, *Table of integrals, series, and products*. Elsevier, 2007.
- short packets," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 9, pp. 1711-1726, 2016.
- [13] Y. Polyanskiy, H. V. Poor, and S. Verdú, "Channel coding rate in the finite blocklength regime," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 5, pp. 2307-2359, 2010.
- [14] D. Feng *et al.*, "Toward ultrareliable low-latency communications: Typical scenarios, possible solutions, and open issues," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 2, pp. 94-102, 2019.
- [15] X. Cheng, B. Yu, X. Cheng, and L. Yang, "Two-way full-duplex amplify-and-forward relaying," in *MILCOM 2013-2013 IEEE Military Communications Conference*, 2013: IEEE, pp. 1-6.
- [16] Z. Zhang, Z. Ma, Z. Ding, M. Xiao, and G. K. Karagiannis, "Full-duplex two-way and one-way relaying: average rate, outage probability, and tradeoffs," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 6, pp. 3920-3933, 2016.
- [17] H. Ji, S. Park, J. Yeo, Y. Kim, J. Lee, and B. Shim, "Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects," *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 124-130, 2018.
- [18] M. Darabi and L. Lampe, "Multi Objective Resource Allocation for Joint eMBB and URLLC Traffic with Different QoS Requirements," in *2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2019: IEEE, pp. 1-6.
- [19] R. Qi, X. Chi, L. Zhao, and W. Yang, "Martingales-Based ALOHA-Type Grant-Free Access Algorithms for Multi-Channel Networks With mMTC/URLLC Terminals Co-Existence," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 37608-37620, 2020.
- [20] A. A. Esswie and K. I. Pedersen, "Opportunistic spatial preemptive scheduling for URLLC and eMBB coexistence in multi-user 5G networks," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 38451-38463, 2018.
- [21] M. Haghighi, M. R. Mili, B. Makki, M. Nasiri-Kenari, and T. Svensson, "Joint sum rate and error probability optimization: Finite blocklength analysis," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 726-729, 2017.
- [22] E. Bjornson, E. A. Jorswieck, M. Debbah, and B. Ottersten, "Multiobjective signal processing optimization: The way to balance conflicting metrics in 5G systems," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 14-23, 2014.
- [23] J.-H. Cho, Y. Wang, R. Chen, K. S. Chan, and A. Swami, "A survey on modeling and optimizing multi-objective systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1867-1901, 2017.
- [۲۴] محمد لاری، سینا عصائیان، "معیار چند هدفی برای انتخاب آنتن در یک ایستگاه مرکزی Full-Duplex"، فصلنامه مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۵۰، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، صفحه ۱۳۶۵-۱۳۷۲.
- [25] M. Mohassel Feghi, M. Mirmohseni, and A. Abbasfar, "Power Allocation in the Energy Harvesting Full-Duplex Gaussian Relay Channels," *International Journal of Communication Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 1-29, 2017.
- [26] Y. Jiang *et al.*, "Toward URLLC: A Full Duplex Relay System with Self-Interference Utilization or Cancellation," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 1, pp. 74-81, 2021.
- [27] Y. Gu, H. Chen, Y. Li, and B. Vucetic, "Ultra-reliable short-packet communications: Half-duplex or full-duplex

زیر نویس‌ها

⁷ Device-to-Device (D2D)

⁸ Amplify and Forward (AF)

⁹ Self-interference

¹⁰ Effective capacity

¹¹ Multi-objective optimization

¹² Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC)

¹ Turbo codes

² Low Density Parity Check (LDPC) codes

³ Finite Block Length (FBL)

⁴ Half-Duplex (HD)

⁵ Two way

⁶ Full-Duplex (FD)

-
- | | |
|--|--|
| ¹³ Machine Type Communications (MTC) | ¹⁸ Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) |
| ¹⁴ Cloud Radio Access Network (C-RAN) | ¹⁹ Pareto |
| ¹⁵ Downlink | ²⁰ Feasible design space |
| ¹⁶ Signal to Noise Ratio (SNR) | ²¹ Weighted sum |
| ¹⁷ Bits per channel use | ²² min-max |