

## انتخاب رله آگاه به مهلت زمانی، صف و کانال در شبکه‌های رله‌ای میانگیردار\*

زهرا خانی سرفین

کارشناس ارشد علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
پست الکترونیکی: zahrakhanii@hotmail.com

جواد حاجی پور\*\*

استادیار گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
پست الکترونیکی: hajipour@tabrizu.ac.ir

شهریار لطفی

استاد گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
پست الکترونیکی: shahriar\_lotfi@tabrizu.ac.ir

### چکیده

مشخص می‌شود؛ در غیر این صورت، پیوند دارای بیشترین وزن، انتخاب شده و براساس آن رله مناسب انتخاب و عملکرد آن مشخص می‌شود. نتایج حاصل از مقایسه راهکار پیشنهادی با راهکارهای مرجع نشان می‌دهد که راهکار پیشنهادی می‌تواند علاوه بر کاهش تعداد بسته‌های حساس به تاخیر حذف شده، منجر به بهبود میزان سرویس‌دهی بسته‌های حساس به تاخیر و غیرحساس به تاخیر شود.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه‌های رله‌ای، رله‌های میانگیردار، انتخاب رله، کانال بی‌سیم، حساسیت به تاخیر

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، شبکه‌های ارتباطات بی‌سیم<sup>۲</sup> رشد چشم‌گیری را تجربه کرده است و پیشرفت قابل توجهی در زمینه اتصال همه‌جایی و همه‌زمانی<sup>۳</sup> به شبکه جهانی اینترنت رخ داده است. امروزه، دستگاه‌های تلفن همراه،

یکی از راهکارهای مناسب برای مقابله با کیفیت پایین پیوندهای<sup>۱</sup> بین‌گره‌ها در شبکه‌های بی‌سیم، استفاده از یک یا چند گرهِ واسط به نام رله بین مبدا و مقصد است. یکی از مسائل مهمی که در این زمینه وجود دارد، انتخاب رله مناسب به منظور انتقال قابل اطمینان، تأخیر کم و کاهش احتمال قطعی در شبکه است. در این مقاله، یک راهکار جدید انتخاب رله در شبکه‌های رله‌ای میانگیردار ارائه شده است که در آن وزن پیوندها براساس شرایط کانال‌ها و طول صف‌های میانگیرهای مبدا و رله‌ها تعیین شده و همچنین آستانه‌ای برای مهلت زمانی بسته‌های حساس به تاخیر در نظر گرفته می‌شود. اگر مبدا یا یکی از رله‌ها بسته داده حساس به تاخیر با مهلت زمانی کمتر از آستانه داشته باشد، براساس مهلت زمانی باقی‌مانده آن، رله مناسب به همراه عملکرد آن یعنی دریافت یا ارسال بسته داده

\*Buffer

1-Link

\*\* نویسنده مسئول

2-Wireless communication networks

3-Ubiquitous connection

در انتخاب پیوند مناسب برای ارسال می شود؛ زیرا ممکن است پیوند موجود از رله به گره مقصد کیفیت خوبی نداشته باشد و ارسال بسته روی این پیوند منجر به خرابی داده و عدم دریافت بسته توسط مقصد شود. در سال های اخیر برای بهبود شبکه های رله ای، رله های میانگیردار معرفی شده اند که هرکدام از این رله ها، مجهز به یک میانگیر با طول محدود یا نامحدود است. استفاده از میانگیر در رله ها انعطاف زیادی به وجود می آورد؛ در این حالت، یک رله پس از دریافت بسته داده از مبدا، در صورت ضعیف بودن پیوند خود به مقصد، می تواند بسته داده را در میانگیر خود ذخیره کند تا در شرایط مناسب به مقصد ارسال کند [۴]. استفاده از رله های میانگیردار باعث بهبود عملکرد انتقال داده در شبکه های رله ای می شود و نه تنها گذردهی بلکه تاخیر آنها به انتها را نیز بهبود می دهد [۵-۷].

یکی از مسائل مهم برای بهبود خدمات در ساختار چندرله ای، انتخاب رله مناسب به منظور انتقال قابل اطمینان داده، تأخیر کم و کاهش احتمال قطعی ارتباط است. در این زمینه، راهکارهای زیادی در سال های اخیر ارائه شده است [۸-۲۵] که در ادامه، به صورت خلاصه مهمترین آنها مرور خواهد شد و پس از آن، انگیزه و نوآوری این مقاله شرح داده خواهد شد.

دسته ای از راهکارهای ارائه شده فقط آگاه به شرایط کانال هستند، یعنی برای انتخاب رله جهت دریافت بسته داده از مبدا یا ارسال بسته داده به مقصد، فقط براساس شرایط کانال تصمیم گیری می کنند. از جمله در [۹]، طرح انتخاب پیوند در یک شبکه ساده متشکل از یک گره مبدا، یک گره مقصد و یک رله مجهز به میانگیر، با در نظر گرفتن شرایط کانال ارائه شده است. در این مقاله، بسته به این که پیوند مبدا به رله یا پیوند رله به مقصد نسبت سیگنال به نوفه ( $SNR$ ) بزرگتری داشته باشد، آن پیوند انتخاب شده و در نتیجه، مبدا یا رله برای ارسال بسته اقدام می کند. در [۱۰]، سیستمی چندرله ای با در نظر گرفتن امکان ارسال مستقیم از مبدا به مقصد در نظر گرفته شده

تبلت ها<sup>۴</sup> و دستگاه های الکترونیکی مختلفی که به اینترنت دسترسی دارند، در اختیار همه قرار دارند و برای کاربردهای مختلف استفاده می شوند. افزایش تعداد مشترکین دستگاه های بی سیم<sup>۵</sup> شخصی منجر به افزایش تقاضا و رشد سریع ترافیک داده شده است که چالش های زیادی در مورد تامین گذردهی<sup>۶</sup> مورد نیاز و تاخیر قابل تحمل را به همراه داشته است [۱]. با توجه به این روند، سیستم های ارتباطی بی سیم برای حفظ کیفیت خدمات باید تمهیداتی داشته باشند؛ اما تبادل بسته های داده<sup>۷</sup> در شبکه های بی سیم، چالش های مربوط به خود را دارد. از جمله این چالش ها این است که با افزایش فاصله گیرنده از فرستنده، توان دریافتی در گیرنده به صورت سریع کاهش می یابد که می تواند به مشکلاتی مثل قطعی<sup>۸</sup> ارتباط، تخلیه باتری و غیره منجر شود. علاوه بر این، وجود موانع بین فرستنده و گیرنده می تواند باعث دریافت ضعیف سیگنال ها یا عدم دریافت آنها شود. همچنین تغییرات در محیط و حرکت گره ها باعث تغییر توان سیگنال دریافتی در گیرنده می شود. این چالش ها و موانع باعث می شوند که همیشه امکان ارسال مستقیم داده بین فرستنده و گیرنده وجود نداشته باشد.

یکی از راهکارهای مناسب برای حل مشکلات ذکر شده، استفاده از یک یا چند گره واسط به نام رله<sup>۹</sup> بین مبدا و مقصد است. گره های رله، بسته ها را از مبدا دریافت و به مقصد ارسال می کنند. استفاده از رله ها بین مبدا و مقصد باعث ایجاد مسیری های اضافی و مستقل بین مبدا و مقصد شده و منجر به بهبود انتقال بسته ها می شود که نتیجه آن، افزایش نرخ انتقال بسته ها است [۲-۷]. در شبکه های رله ای معمولی، گره رله بسته ها را در یک بازه زمانی از مبدا دریافت و بلافاصله در بازه زمانی بعدی به مقصد ارسال می کند [۲،۳]. این روش، باعث ایجاد محدودیت هایی

4-Tablet  
5-Wireless  
6-Throughput  
7-Data packets  
8-Outage  
9-Relay

صورت خالی بودن میانگیر در رله انتخاب شده برای ارسال یا پر بودن میانگیر در رله انتخاب شده برای دریافت، از روش BRS استفاده می‌شود و در غیر این صورت، روش MMRS برای انتخاب پیوند استفاده می‌شود. در [۱۴]، با در نظر گرفتن پیوند مستقیم بین مبدا و مقصد راهکاری ارائه شده است که در آن، براساس پر یا خالی بودن میانگیر رله‌ها، واجد شرایط بودن آنها از نظر ارسال یا دریافت بسته، در نظر گرفته شده و پیوند انتخاب شده، از میان پیوندهای واجد شرایط با بالاترین SNR در نظر گرفته می‌شود. همچنین، ارسال بسته تصدیق توسط گره دریافت‌کننده نیز برای تصمیم‌گیری در مورد حذف کپی بسته ارسال شده از میانگیر فرستنده در نظر گرفته شده است. در [۱۵]، هم با بهره‌گیری از مزایای هر دو روش MMRS و MLRS، طرح انتخاب رله ترکیبی ارائه شده است که برای انتخاب پیوند ارسال از مبدا به رله‌ها در بازه زمانی فرد، پر بودن میانگیر رله‌ها و برای انتخاب پیوند ارسال از رله‌ها به مقصد در بازه زمانی زوج، خالی بودن میانگیر رله‌ها را بررسی کرده و لحاظ می‌کند. در [۱۶]، علاوه بر در نظر گرفتن شرایط کانال و پر یا خالی بودن میانگیر رله‌ها، از یک عدد تصادفی نیز به عنوان آستانه‌ای برای بررسی بهره پیوندها و انتخاب آنها استفاده شده است. در [۱۷]، روش انتخاب رله بیشترین وزن (MWRS)<sup>۱۵</sup> ارائه شده است که برای پیوندها، وزنی براساس ظرفیت میانگیر و اندازه صف بسته‌ها در رله‌ها در نظر گرفته شده و پیوندی با بیشترین وزن که از لحاظ وضعیت کانال مشکلی نداشته باشد، انتخاب می‌شود. در [۱۸]، اگر SNR پیوندها از مقدار آستانه‌ای بالاتر باشد، آن پیوندها واجد شرایط در نظر گرفته می‌شوند و سپس براساس آن، رله‌ای که بیشترین فضای خالی میانگیر را دارد، برای دریافت بسته در نیمه اول بازه زمانی انتخاب می‌شود و رله‌ای که کمترین فضای خالی را دارد، برای ارسال بسته در نیمه دوم بازه زمانی انتخاب می‌شود. در [۱۹]، الگوریتم انتخاب پیوند بیشینه آگاه به تاخیر (DAML)<sup>۱۶</sup> ارائه شده است که اولویت

است که در هر بازه زمانی، رله‌ای که میانگیر خالی نداشته و پیوند آن به مقصد، بالاترین SNR را داشته باشد، انتخاب می‌شود. اگر چنین شرایطی برقرار نباشد، بهترین پیوند از میان پیوند مستقیم و پیوندهای مبدا به رله‌های با میانگیر غیر پر انتخاب شده و متناظر با آن، مبدا به مقصد یا به یک رله ارسال می‌کند. در [۱۱]، روش‌های انتخاب بهترین رله (BSR)<sup>۱۱</sup> و انتخاب رله بیشینه-بیشینه (MMRS)<sup>۱۲</sup> ارائه شده‌اند. در روش BRS، رله‌ای که دارای بالاترین SNR در پیوندهای مبدا به رله و رله به مقصد است، انتخاب شده و بسته را در بازه زمانی فرد از مبدا دریافت و در میانگیر خود ذخیره کرده و بلافاصله در بازه زمانی زوج به مقصد ارسال می‌کند. روش MMRS برای رفع مشکلات روش BRS ارائه شده است که در آن می‌توان براساس بهترین کانال از مبدا به رله‌ها و بهترین کانال از رله‌ها به مقصد، به ترتیب رله‌ای را برای دریافت بسته داده از مبدا در بازه زمانی فرد و رله‌ای دیگر را برای ارسال بسته به مقصد در بازه زمانی زوج انتخاب کرد. در [۱۲]، روش انتخاب رله پیوند بیشینه قوی‌ترین پیوند را در بین تمام پیوندهای مبدا به خود و خود به مقصد دارد، انتخاب می‌شود و بسته به نوع پیوند و داشتن بسته در میانگیر، بسته‌ای را دریافت یا ارسال می‌کند یا در آن بازه زمانی بسته‌ای ارسال نمی‌شود. در [۱۳]، برای بهبود روش‌های MMRS و MLRS، طرح انتخاب رله با کاهش تاخیر ارائه شده است که در کنار در نظر گرفتن SNR پیوندها به عنوان معیار انتخاب رله، اولویت به پیوندهای رله به مقصد داده شده است.

دسته دیگری از راهکارها، معمولاً هم شرایط کانال و هم وضعیت صف بسته‌ها در میانگیرهای رله‌ها را برای تصمیم‌گیری در انتخاب پیوند در نظر گرفته‌اند. به عنوان نمونه، در [۱۱]، برای بهبود دو روش MMRS و BRS، طرح انتخاب رله ترکیبی (HRS)<sup>۱۴</sup> ارائه شده است که در آن، در

11-Best Relay Selection  
12-Max-Max Relay Selection  
13-Max Link Relay Selection  
14-Hybrid Relay Selection

15-Max Weight Relay Selection  
16-Delay-Aware Max Link

انجام می‌شود. در [۲۵]، راهکاری برای بهبود سه روش MMRs، MLRS و MWRS به نام طرح انتخاب رله بیشترین بهره (MGRS<sup>۱۹</sup>) ارائه شده است که در آن، واجد شرایط بودن پیوندها، هم براساس بالا بودن SNR و هم پر یا خالی بودن میانگیر رله‌های مربوطه در نظر گرفته می‌شود. سپس، براساس میزان اهمیت بالا بودن SNR و میزان اهمیت مناسب بودن وضعیت صف در میانگیر رله‌ها، با وزندهی مناسب به آنها، پارامتری کلی به اسم سود کانال برای هر پیوند تعریف شده است. از میان پیوندهای مبدا به رله‌ها، پیوندی که بالاترین سود کانال را داشته باشد، برای ارسال بسته از مبدا در نیمه اول بازه زمانی انتخاب می‌شود و از میان پیوندهای رله به مقصد، پیوندی که بالاترین سود کانال را داشته باشد، برای ارسال بسته از رله مربوطه در نیمه دوم بازه زمانی انتخاب می‌شود. جدول (۱)، به صورت خلاصه، مقایسه‌ای از راهکارهای ذکر شده در بالا را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه راهکارهای پیشین

مرجع	وجود پیوند مستقیم بین مبدا و مقصد	اولویت متفاوت برای ارسال از مبدا یا رله‌ها	در نظر گرفتن شرایط کانال‌ها (SNR)	در نظر گرفتن پر یا خالی بودن میانگیرها	در نظر گرفتن طول صف‌ها
[۹]	خیر	خیر	بلی	خیر	خیر
[۱۰]	بلی	بلی	بلی	بلی	خیر
[۱۱]	خیر	خیر	بلی	بلی	خیر
[۱۲]	خیر	خیر	بلی	خیر	خیر
[۱۳]	خیر	بلی	بلی	خیر	خیر
[۱۴]	بلی	خیر	بلی	بلی	خیر
[۱۵]	خیر	خیر	بلی	بلی	خیر
[۱۶]	خیر	خیر	بلی	بلی	خیر
[۱۷]	خیر	خیر	بلی	بلی	بلی
[۱۸]	خیر	خیر	بلی	بلی	بلی
[۱۹]	خیر	بلی	بلی	بلی	بلی
[۲۰]	خیر	خیر	بلی	بلی	بلی
[۲۱]	خیر	خیر	خیر	بلی	بلی
[۲۲]	خیر	بلی	بلی	بلی	بلی
[۲۳]	خیر	خیر	بلی	بلی	بلی
[۲۴]	خیر	خیر	بلی	بلی	بلی
[۲۵]	خیر	خیر	بلی	بلی	بلی

را به ارسال به وسیله رله با بیشترین بسته در میانگیر و دارای وضعیت کانال خوب می‌دهد و در صورت عدم وجود چنین رله‌ای، از میان رله‌های با کمترین بسته در میانگیر، یکی به صورت تصادفی برای دریافت بسته از مبدا انتخاب می‌شود. همچنین، در این مقاله برای کاهش احتمال قطعی در شبکه، راهکار دیگری به نام انتخاب رله آگاه به تاخیر و تنوع (DDARS<sup>۱۷</sup>) ارائه شده است که اولویت را به ارسال از مبدا به رله دارای کمترین بسته در میانگیر می‌دهد. در [۲۰]، راهکار انتخاب رله متعادل ارائه شده است که سعی دارد پیوندها به گونه‌ای انتخاب شوند که در اثر ارسال بسته‌ها، نرخ ورود و خروج بسته‌ها به/از میانگیر رله‌ها را در تعادل نگه داشته شده و اندازه صف بسته‌ها در میانگیر رله‌ها به اندازه نصف ظرفیت میانگیر آن‌ها باشد. در [۲۱]، راهکار انتخاب رله مبتنی بر آستانه میانگیر (BTRS<sup>۱۸</sup>) ارائه شده است که براساس اندازه صف بسته‌ها در میانگیر رله‌ها و یک مقدار آستانه، وزنی برای پیوندها در نظر گرفته شده و پیوند با بیشترین وزن، برای ارسال بسته روی آن انتخاب می‌شود. در [۲۲]، راهکاری برای بهبود روش MWRS که در مقاله [۱۷] مطرح شده بود، ارائه شده است تا اگر چندین پیوند وزن یکسان داشته باشند، اولویت به پیوند با بهترین وضعیت کانال یا پیوندهای رله‌ها به مقصد داده شود. در [۲۳]، تحرک رله‌ها در نظر گرفته شده است و براساس SNR پیوندها، رله‌ها به دو نوع قابل اطمینان یا غیرقابل اطمینان تقسیم شده‌اند و رله با قابلیت اطمینان که وزن بالایی براساس وضعیت صف در میانگیرش دارد، برای ارسال یا دریافت بسته انتخاب می‌شود. در [۲۴]، یک روش انتخاب رله مشابه با روش MWRS ارائه شده است با این تفاوت که از میان پیوندهای با SNR بالاتر از آستانه مورد نیاز برای آشکارسازی بیت‌ها، اولویت به انتخاب براساس وضعیت میانگیر رله‌ها داده شده است. علاوه بر این، در صورتی که هم پیوند مناسبی از مبدا به رله‌ها وجود داشته باشد و هم پیوند مناسبی از رله‌ها به مقصد، انتخاب پیوند به صورت تصادفی

17-Delay-and-Diversity-Aware Relay Selection  
18-Buffer-Threshold based Relay Selection

سیگنال به نوفه و شرایط میانگیرها و نیز با در نظر گرفتن آستانه تاخیر برای بسته‌های حساس به تاخیر، راهکاری ارائه خواهیم داد به گونه‌ای که علاوه بر سرویس‌دهی بسته‌های حساس به تاخیر قبل از اتمام مهلت زمانی، بتوان در شرایط مناسب بسته‌های غیرحساس به تاخیر را نیز سرویس‌دهی کرد.

ساختار ادامه مقاله به این صورت است: در بخش دوم، مدل سیستم مورد مطالعه در این مقاله ارائه و مسئله مورد نظر به صورت دقیق بیان می‌شود. در بخش سوم، راهکار پیشنهادی برای انتخاب رله، ارائه شده و جزئیات آن شرح داده می‌شود. بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف برای اطمینان از اثر بخش بودن راهکار ارائه شده را توضیح می‌دهد و در بخش پنجم، نتیجه‌گیری به صورت خلاصه آورده می‌شود.

## ۲- مدل سیستم

شکل (۱)، شمای کلی سیستم مورد مطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد که یک شبکه بی‌سیم با چند رله میانگیردار است. این شبکه، شامل یک گره مبدا، یک گره مقصد و  $n$  گره رله است که بین گره‌های مبدا و مقصد قرار گرفته‌اند و هیچ ارتباط مستقیمی بین مبدا و مقصد و بین خود رله‌ها با هم وجود ندارد. لذا مبدا برای انتقال یک بسته داده به مقصد، ابتدا آن را به یک رله ارسال می‌کند و رله آن بسته را در شرایط مناسب به مقصد ارسال می‌کند. فرض بر این است که زمان به بازه‌هایی با طول برابر تقسیم شده است. در هر بازه زمانی با یک احتمالی، یک بسته به وسیله یک برنامه کاربردی در مبدا تولید شده و در میانگیر مبدا قرار داده می‌شود. ظرفیت میانگیر گره مبدا بالا است که آن را نامحدود در نظر می‌گیریم و اندازه صف بسته‌ها در مبدا را با  $Q_0$  نشان می‌دهیم. بسته‌هایی که در مبدا تولید می‌شوند، ترکیبی از بسته‌های حساس به تاخیر و بسته‌های غیرحساس به تاخیر هستند. بسته‌هایی که حساس به تاخیر هستند، مهلت نسبی به اندازه  $D$  بازه

همان‌طور که از مطالب بالا روشن است، مقالات مختلف، مسئله انتخاب رله را اغلب با در نظر گرفتن شرایط کانال و وضعیت میانگیر گره‌ها مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. پیش‌فرض اصلی آن‌ها این است که بسته‌ها حساس به تاخیر نیستند و لذا هیچ‌کدام، سرویس‌دهی بسته‌های حساس به تاخیر را در نظر نگرفته‌اند. این در حالی است که بسته‌های داده ارسال شده به وسیله دستگاه‌های بی‌سیم، ممکن است حساس به تاخیر یا غیرحساس به تاخیر باشند. بسته‌های حساس به تاخیر از جمله مربوط به برنامه‌های کاربردی چندرسانه‌ای مثل تماس صوتی-تصویری هستند که استفاده از این برنامه‌ها در دستگاه‌های کاربران، در سال‌های اخیر افزایش یافته است. این نوع بسته‌ها، معمولاً دارای مهلت زمانی هستند و اگر تا پایان مهلت زمانی به مقصد ارسال نشوند، برای مقصد ارزشی نخواهند داشت؛ لذا تاخیر در شبکه، به یک عامل مهم در تامین کیفیت خدمات تبدیل شده است. اما بسته‌های غیرحساس به تاخیر، مربوط به برنامه‌هایی مثل ارسال ایمیل، بارگیری فایل و غیره هستند که دارای مهلت زمانی نیستند و می‌توان این بسته‌ها را با اولویت کمتری نسبت به بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی کرد.

در این مقاله قصد داریم مسئله انتخاب رله را در شبکه‌های دارای بسته‌های حساس به تاخیر و غیرحساس به تاخیر بررسی کرده و راهکاری مناسب ارائه دهیم به گونه‌ای که هم نیازمندی‌های بسته‌های حساس به تاخیر در نظر گرفته شود و هم بسته‌های غیرحساس به تاخیر، سرویس خوبی دریافت کنند. با توجه به اینکه شرایط کانال و تولید بسته‌ها در مبدا، به صورت تصادفی است و اطلاعی در مورد وضعیت آن‌ها در آینده در دسترس نیست، یافتن جواب بهینه این مسئله ممکن نیست و نمی‌توان از راهکارهای معمول برای حل آن استفاده کرد. لذا، هدف این مقاله ارائه یک راهکار ابتکاری برای انتخاب رله جهت سرویس‌دهی بسته‌های داده در شبکه‌های رله‌ای میانگیردار است. برای این کار، با در نظر گرفتن وزن پیوندها براساس نسبت

و نسبت سیگنال به نوفه بسته‌های دریافتی از رله  $i$  در مقصد برابر است با:

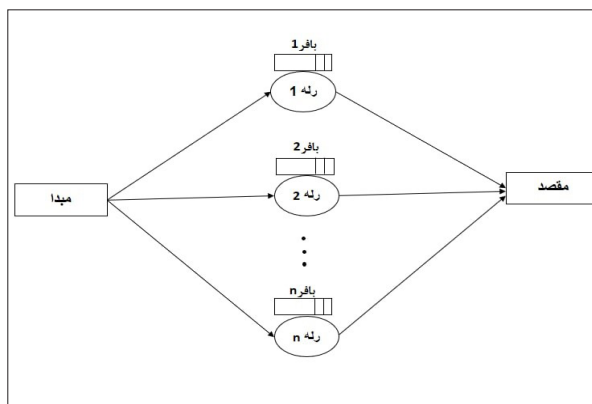
$$Y_{r_i d} = |g_{r_i d}|^2 \frac{P_{r_i}}{\delta_n^2} \quad (2)$$

در روابط بالا،  $P_s$  نشان‌دهنده توان ارسالی گره مبدا،  $P_{r_i}$  نشان‌دهنده توان ارسالی رله  $i$  و  $\delta_n^2$  بیانگر توان نوفه در مدارهای گیرنده رله‌ها و مقصد است. برای آن که بیت‌های دریافتی در یک گیرنده قابل آشکارسازی و تشخیص باشند، بایستی نسبت سیگنال به نوفه در آن گیرنده از آستانه‌ای،  $\gamma^{\text{th}}$ ، بیشتر باشد.

اگر شرایط ارسال بسته در یک بازه زمانی مهیا نباشد، در شبکه قطعی رخ خواهد داد. این اتفاق به طور مثال، زمانی می‌افتد که گره انتخاب شده برای ارسال، بسته‌ای در میانگیر خود نداشته باشد یا رله دریافت‌کننده، در میانگیر خود فضای خالی نداشته باشد. مثال دیگر، حالتی است که نسبت سیگنال به نوفه در گیرنده کمتر از  $\gamma^{\text{th}}$  باشد. به مدت زمانی که به طور متوسط طول می‌کشد تا یک بسته داده از گره مبدا به گره مقصد انتقال داده شود، تاخیر انتها به انتها می‌گویند. برای بسته‌های حساس به تاخیر که دارای مهلت زمانی هستند، باید تاخیر انتها به انتها کمتر از مهلت زمانی بسته‌ها باشد تا در زمان مناسب به مقصد برسند. مسئله مورد مطالعه در این مقاله این است که در هر بازه زمانی، چگونه بایستی برای انتخاب رله‌ای جهت دریافت بسته از مبدا یا ارسال بسته به مقصد تصمیم‌گیری شود تا اهداف زیر برآورده شود:

۱. قطعی کمتری در شبکه رخ دهد.
  ۲. تعداد بسته‌های حساس به تاخیری که قبل از اتمام مهلت به مقصد می‌رسند، زیاد باشند.
  ۳. تعداد بسته‌های غیرحساس به تاخیر دریافتی در مقصد زیاد باشند.
- برای پاسخ دادن به مسئله فوق، راهکار ابتکاری جدیدی را در بخش بعد ارائه خواهیم داد.

زمانی دارند؛ به این معنی که این بسته‌ها از لحظه تولید،  $D$  بازه زمانی فرصت دارند به مقصد ارسال شوند و اگر تا پایان مهلت زمانی به مقصد ارسال نشوند، ارزشی نخواهند داشت و باید حذف شوند. هر رله، مجهز به یک میانگیر به ظرفیت محدود است؛ ظرفیت میانگیر رله  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  را با  $l_i$  و تعداد بسته‌های داده موجود در میانگیر رله  $i$  را با  $Q_i$  نشان می‌دهیم.



شکل (۱): شبکه بی‌سیم متشکل از یک گره مبدا، یک گره مقصد و چند گره رله مجهز به میانگیر

یک کانال بی‌سیم در سیستم وجود دارد که در هر بازه زمانی فقط به وسیله یکی از گره‌های مبدا یا رله می‌تواند استفاده شود تا یک بسته داده را انتقال دهد. اگر پیوند مبدا به رله  $i$  انتخاب شود تا از کانال استفاده کند، مبدا مجاز است از کانال استفاده کرده و بسته‌ای را به رله  $i$  ارسال کند و اگر پیوند رله  $i$  به مقصد انتخاب شود تا از کانال استفاده کند، رله  $i$  مجاز است تا بسته‌ای را به مقصد ارسال کند. فرض بر این است که بهره کانال در طول یک بازه زمانی ثابت است اما به طور مستقل از یک بازه به بازه دیگر تغییر می‌کند. برای نشان دادن بهره کانال پیوند مبدا به رله  $i$  و بهره کانال پیوند رله  $i$  به مقصد در بازه زمانی کنونی، به ترتیب از  $g_{sr_i}$  و  $g_{r_i d}$  استفاده می‌کنیم. نسبت سیگنال به نوفه بسته‌های دریافتی از مبدا در رله  $i$  برابر است با:

$$Y_{sr_i} = |g_{sr_i}|^2 \frac{P_s}{\delta_n^2} \quad (1)$$



بسته‌ای از مبدا دریافت یا بسته‌ای به مقصد ارسال کند که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

### محاسبه وزن هر پیوند

برای انتخاب رله مناسب برای ارسال یا دریافت بسته، در شرایط خاص براساس وزن پیوندها تصمیم گرفته خواهد شد. لذا در این جا، نحوه تعیین وزن هر پیوند توضیح داده می‌شود. وزن پیوند مبدا به رله  $i$  با  $W_{sr_i}$  و وزن پیوند رله  $i$  به مقصد با  $W_{r_id}$  نشان داده خواهد شد. در ابتدای هر بازه زمانی، حالت‌های زیر بررسی می‌شود و پیوندهای دارای وزن صفر، از لیست پیوندها حذف می‌شوند:

● حالت اول: اگر  $Q_i = L_i$  باشد، به این معنی است که میانگیر رله  $i$  پر شده است؛ بنابراین وزن پیوند مبدا به رله  $i$  صفر در نظر گرفته می‌شود، یعنی  $W_{sr_i} = 0$ .

● حالت دوم: اگر  $Q_i = 0$  باشد، به این معنی است که میانگیر رله  $i$  خالی است؛ بنابراین وزن پیوند رله  $i$  به مقصد صفر در نظر گرفته می‌شود، یعنی  $W_{r_id} = 0$ .

● حالت سوم: اگر  $Q_i = 0$  باشد، به این معنی است که مبدا هیچ بسته‌ای برای ارسال ندارد. بنابراین وزن تمام پیوندهای مبدا به رله‌ها صفر در نظر گرفته می‌شوند، یعنی  $W_{sr_i} = 0, i \in \{1, \dots, n\}$

اگر موارد بالا صدق نکند، وزن پیوندها براساس [۵]، از طریق روابط زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$W_{sr_i} = (Q_s - Q_i)R_{sr_i}, i \in \{1, \dots, n\} \quad (۳)$$

$$W_{r_id} = Q_i R_{r_id}, i \in \{1, \dots, n\} \quad (۴)$$

که در اینجا  $R_{sr_i}$  و  $R_{r_id}$  از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$R_{sr_i} = \log_2(1 + Y_{sr_i}) \quad (۵)$$

$$R_{r_id} = \log_2(1 + Y_{r_id}) \quad (۶)$$

علت استفاده از روابط (۳) و (۴) برای وزن‌دهی این است که هم شرایط کانال و هم طول صف بسته‌ها در میانگیرهای رله‌ها، در تصمیم‌گیری برای انتخاب رله لحاظ شود. در نتیجه اگر کیفیت یک پیوند یعنی SNR در سمت

### ۳- راهکار انتخاب رله آگاه از مهلت زمانی، صف و کانال

همان‌گونه که در قسمت‌های قبل ذکر شده است، در گذشته، راهکارهای مختلفی در زمینه انتخاب رله مناسب در شبکه‌های رله ارائه شده‌اند، اما در هیچ کدام از روش‌های ارائه شده، سرویس‌دهی بسته‌های حساس به تاخیر قبل از اتمام مهلت زمانی آن‌ها در نظر گرفته نشده است. در این مقاله، راهکار جدیدی با نام راهکار انتخاب رله آگاه از مهلت زمانی، صف و کانال (DQCARS<sup>20</sup>) ارائه شده است که مهلت باقی‌مانده بسته‌های حساس به تاخیر را در نظر گرفته و براساس آن و نیز میزان صف بسته‌ها در میانگیرهای گره‌های رله و مبدا و وضعیت کانال‌ها، اقدام به انتخاب رله و تعیین عملکرد آن می‌کند.

مراحل انتخاب رله و ارسال بسته‌ها شامل محاسبه وزن پیوندها، بررسی میانگیرهای گره‌های مبدا و رله از نظر داشتن بسته‌های دارای مهلت زمانی، انتخاب بسته دارای کمترین مهلت زمانی، انتخاب پیوند مناسب و ارسال بسته روی آن و همچنین به روز رسانی اطلاعات وضعیت شبکه است که در ادامه به شرح هر کدام از آنها می‌پردازیم.

#### مقداردهی پارامترهای ورودی در ابتدای هر بازه زمانی

در ابتدای هر بازه زمانی، تعداد بسته‌های میانگیر مبدا ( $Q_i$ ) و تعداد بسته‌های میانگیر رله‌ها ( $Q_i, i \in \{1, \dots, n\}$ ) و مهلت باقی‌مانده بسته‌های حساس به تاخیر که در میانگیرهای گره مبدا و گره‌های رله قرار دارند، تعیین می‌شود. سپس رله‌ها با ارسال سیگنال‌های کنترلی، از وضعیت پیوندهای مبدا به خود و پیوندهای خود به مقصد آگاه شده و آن را به مبدا اعلام می‌کنند. همچنین رله‌ها، اندازه صف بسته‌های موجود در میانگیر خود را به مبدا اعلام می‌کنند. به این خاطر در ابتدای هر بازه زمانی، مبدا اطلاعات کاملی از وضعیت پیوندها و میانگیرهای رله‌ها دارد و براساس این اطلاعات، تصمیم می‌گیرد کدام رله

اگر میانگیرهای مبدا یا رله‌ها، بسته حساس به تاخیر داشته باشند و مهلت زمانی باقی‌مانده این بسته‌ها کمتر از  $D_p$  باشد، اولویت به بسته‌های حساس به تاخیر داده می‌شود و باید بسته‌ای که کمترین مهلت زمانی باقی‌مانده را دارد، سرویس‌دهی شود. هدف از این کار، سرویس‌دهی به موقع بسته‌های دارای مهلت زمانی و کاهش تعداد بسته‌های حذف شده دارای مهلت زمانی است. اگر بسته موردنظر، در میانگیر مبدا باشد، در این حالت براساس وزن پیوندها تصمیم گرفته خواهد شد و رله‌ای که پیوند آن بزرگترین وزن را داشته باشد، برای دریافت آن بسته انتخاب خواهد شد. اگر بسته موردنظر، در میانگیر یک رله باشد، آن رله برای ارسال آن بسته به مقصد انتخاب خواهد شد.

#### به روز رسانی اطلاعات وضعیت شبکه

در انتهای هر بازه زمانی، میانگیرهای مبدا و رله‌ها بررسی می‌شود و اگر مبدا یا رله، بسته حساس به تاخیر داشت، یک واحد از مهلت زمانی باقی‌مانده آن بسته کم می‌شود. با توجه به این که بسته‌ها برای ارسال از مبدا به مقصد به دو بازه زمانی نیاز دارند، اگر مهلت زمانی باقی‌مانده بسته حساس به تاخیر موجود در مبدا کمتر از دو باشد، فرصت لازم برای سرویس‌دهی را نخواهد داشت و باید حذف شود. همچنین، بسته موجود در میانگیر رله‌ها نیز یک بازه زمانی نیاز دارند تا به مقصد ارسال شوند و اگر مهلت زمانی باقی‌مانده بسته حساس به تاخیر موجود در رله‌ای کمتر از یک باشد، فرصت لازم برای سرویس‌دهی را نخواهد داشت و باید حذف شود.

شکل (۲) مراحل کلی روش DQCARS را نشان می‌دهد که نحوه انتخاب رله و ارسال بسته‌های داده را پس از تعیین مقادیر پارامترهای ورودی کلی و شروع به کار سیستم مشخص می‌کند. منظور از پارامترهای ورودی کلی، مواردی مثل تعداد رله‌ها، ظرفیت میانگیرهای آن‌ها، آستانه  $D_p$  برای مهلت زمانی، آستانه  $\gamma^{th}$  برای SNR و موارد دیگری است که در قسمت مدل سیستم ذکر شدند.

گیرنده آن پیوند بالاتر باشد، وزن آن بیشتر در نظر گرفته می‌شود تا شانس انتخاب آن پیوند بیشتر باشد، چرا که ارسال بسته از طریق چنین پیوندی با احتمال خطای کمتری مواجه می‌شود. همچنین با استفاده از  $Q_p - Q_s$  در وزن‌دهی پیوندهای مبدا به رله‌ها، علاوه بر در نظر گرفتن اثر تعداد بسته‌های موجود در میانگیر رله‌ها، طول صف میانگیر مبدا نیز در نظر گرفته می‌شود. هدف، این است که پیوندهای مبدا به رله‌ای که طول صف میانگیر در آن رله‌ها کم است، وزن بیشتری داشته باشند و اگر طول صف میانگیر مبدا زیاد باشد، وزن پیوندهای مبدا به رله افزایش یافته تا مبدا شانس بیشتری برای ارسال بسته به رله‌ها داشته باشد. همچنین در رابطه (۴)، از  $Q_p$  برای محاسبه وزن پیوندهای رله به مقصد استفاده شده است تا شانس ارسال رله‌ای که طول صف آن زیاد است، بالاتر رود.

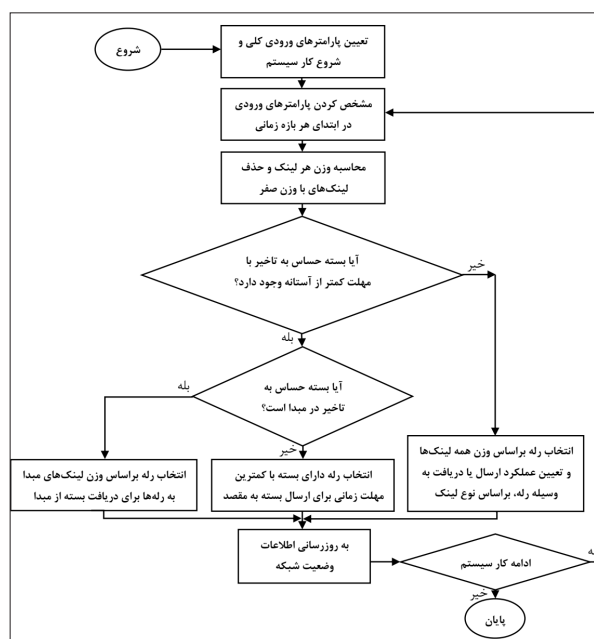
#### انتخاب رله مناسب و تعیین عملکرد آن

در ابتدای هر بازه زمانی، میانگیر گره‌های مبدا و رله‌ها از نظر داشتن بسته‌های حساس به تاخیر و بسته‌های غیرحساس به تاخیر بررسی می‌شوند. آستانه‌ای برای مهلت زمانی بسته‌ها به اندازه  $D_p$  در نظر گرفته شده که از آن برای تصمیم‌گیری در اولویت دادن به بسته‌های حساس به تاخیر استفاده می‌شود. اگر میانگیرهای گره مبدا یا رله‌ها، بسته حساس به تاخیر نداشته باشند و یا مهلت زمانی باقی‌مانده بسته‌ها بزرگتر از  $D_p$  باشد، اولویت ارسال بسته‌های حساس به تاخیر و غیرحساس به تاخیر برابر در نظر گرفته می‌شود و از میان همه پیوندها (چه پیوندهای مبدا به رله‌ها و چه پیوندهای رله‌ها به مقصد)، پیوندی که بیشترین وزن را دارد انتخاب می‌شود که بر اساس آن، رله مناسب و عملکرد آن یعنی دریافت یا ارسال بسته تعیین می‌شود. به عبارت دیگر، اگر پیوند انتخاب شده، پیوند مبدا به رله  $X$  باشد، اولین بسته از میانگیر مبدا به رله  $X$  ارسال می‌شود؛ اگر پیوند انتخاب شده از رله  $X$  به مقصد باشد، اولین بسته از میانگیر رله منتخب به مقصد ارسال می‌شود.



مهلت پایین‌تر از آستانه بررسی شود و همین روند ادامه یابد. در صورتی هم که بسته با کمترین مهلت پایین‌تر از آستانه، در مبدا باشد، فقط نیاز به محاسبه وزن پیوندهای مبدا به رله‌ها خواهد بود تا براساس آنها، در مورد رله دریافت‌کننده تصمیم‌گیری شود. پس از انجام این بررسی‌ها، اگر وضعیت کانال هیچ پیوندی برای ارسال بسته حساس به تاخیر مساعد نباشد، لازم خواهد شد وزن پیوندهای بررسی نشده محاسبه شود. لذا در کل و در مجموع زمان کار شبکه، کم یا زیاد بودن پیچیدگی و محاسبات در راهکار DQCARS نسبت به راهکارهای گذشته، وابسته به شرایط و نسبت تعداد بسته‌های حساس به تاخیر به بسته‌های غیرحساس به تاخیر خواهد بود. با این وجود، حتی اگر در مجموع، راهکار DQCARS پیچیدگی و محاسبات بیشتری داشته باشد، استفاده از آن می‌تواند در شبکه‌های نسل جدید مفید و حتی ضروری باشد چرا که برنامه‌های کاربردی حساس به تاخیر مثل تماس‌های صوتی- تصویری، بازی‌های رایانه‌ای بیدرنگ و غیره در این شبکه‌ها رو به گسترش است و طراحان این شبکه‌ها برای تامین رضایت کاربران، لازم است کیفیت خدمات مناسبی برای این برنامه‌ها نیز فراهم کنند. براساس نتایج ارزیابی‌ها در بخش بعد، راهکار ارائه شده عملکرد مطلوبی برای سرویس‌دهی به بسته‌های حساس به تاخیر و غیر حساس به تاخیر نشان می‌دهد که این امر می‌تواند استفاده از آن را، حتی در صورت وجود محاسبات بیشتر، توجیه کند. مطلب بعدی این که، پیش‌فرض در مورد بسته‌های غیرحساس به تاخیر این است که تاخیر آنها هر اندازه هم زیاد باشد و حتی به سمت بی‌نهایت برود (یعنی سرویس‌دهی به آنها به سمت صفر برود)، مشکلی ندارد؛ اما در عمل، معمولاً انتظار می‌رود حتی اگر تعداد بسته‌های حساس به تاخیر خیلی بیشتر از بسته‌های غیرحساس به تاخیر باشد، سرویس‌دهی به بسته‌های غیرحساس به تاخیر به صفر نرسد. برای اطمینان از این، گر مبدا می‌تواند برای بسته‌های غیرحساس به تاخیر هم، برچسبی مشابه مهلت زمانی با مقادیری چند برابر بزرگ‌تر از مهلت زمانی بسته‌های

در اینجا ذکر چند مطلب لازم است. مطلب اول این که چون راهکار DQCARS، مهلت زمانی بسته‌های حساس به تاخیر را نیز در مبدا و رله‌ها بررسی می‌کند، از این لحاظ نسبت به راهکارهای گذشته که حداکثر، شرایط کانال و طول صف‌ها را در نظر می‌گیرند، پیچیدگی بیشتری دارد. ترتیب ذکر شده در بالا برای مراحل این راهکار، به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده بود تا نحوه تصمیم‌گیری آن به راحتی روشن شود اما در عمل می‌توان با پیاده‌سازی متفاوت ترتیب مراحل، پیچیدگی آن را کمتر کرد به‌گونه‌ای که حتی در بسیاری از بازه‌های زمانی، راهکار DQCARS محاسبات کمتری نسبت به راهکارهای دیگر داشته باشد. به این صورت که چون راهکار DQCARS اولویت را به بسته‌های حساس به تاخیر می‌دهد، می‌توان در ابتدا قبل از محاسبه وزن همه پیوندها، وجود بسته با مهلت پایین‌تر از آستانه را در گره‌ها بررسی کرد و در صورت وجود چنین بسته‌هایی، اگر بسته با کمترین مهلت در یک رله باشد و



شکل (۲): کارنمای کلی راهکار پیشنهادی DQCARS

وضعیت کانال آن رله برای ارسال مساعد باشد، وزن پیوندهای دیگر را محاسبه نکرد. اگر وضعیت کانال آن رله مساعد نبود، وضعیت کانال گره بعدی دارای بسته با کمترین

DQCARS، عملکرد آن را با دو راهکار مرجع که یا فقط شرایط کانال یا شرایط کانال و وضعیت صفها در میانگیرها را در نظر می‌گیرند، مقایسه کرده‌ایم. راهکار مرجع اول، الگوریتم ارائه شده در [۱۶] است که ما در ادامه با نام CARS<sup>۳۳</sup> به آن اشاره کرده‌ایم. الگوریتم CARS برحسب شرایط کانال و عدد تصادفی صفر یا یک، در مورد انتخاب رله برای دریافت یا ارسال بسته تصمیم می‌گیرد که در مورد آن در قسمت مقدمه توضیح داده شد؛ بنابراین، این راهکار در انتخاب رله به مهلت زمانی بسته‌ها اهمیتی نمی‌دهد و شرایط میانگیرها را نیز در نظر نمی‌گیرد. راهکار مرجع دوم که در ادامه با نام QCARS<sup>۲۴</sup> به آن اشاره کرده‌ایم، مبتنی بر [۱۷] است و براساس اندازه صف میانگیر رله‌ها، اندازه میانگیر مبدأ و شرایط کانال، وزن پیوندها را مشخص کرده و براساس وزن پیوندها در مورد انتخاب رله برای دریافت یا ارسال بسته تصمیم می‌گیرد.

شکل (۳)، اثر افزایش احتمال تولید بسته داده بر نتایج راهکار پیشنهادی و دو راهکار مرجع را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی در ۵۰ اجرای متفاوت این سه راهکار در ۱۰۰۰۰ بازه زمانی انجام شده و میانگین نتایج به دست آمده در شکل نشان داده شده است. چون در این شبیه‌سازی، احتمال حساس به تاخیر بودن یک بسته ۰/۵ است، احتمال تولید به صورت مساوی برای بسته‌های حساس به تاخیر و غیر حساس به تاخیر افزایش می‌یابد و در نتیجه، تعداد کل هر دو نوع بسته در مدت ۱۰۰۰۰ بازه زمانی، به صورت تقریباً یکسان زیاد می‌شود. در شکل (۳) - الف مشاهده می‌شود با افزایش احتمال تولید بسته در مبدأ، تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده در راهکار پیشنهادی DQCARS همواره در حال افزایش است. در راهکار مرجع QCARS، سرعت افزایش تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده در حالتی که احتمال تولید بسته‌ها کمتر از ۰/۳ است، تقریباً برابر با تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده

اصلی حساس به تاخیر اضافه کند. در این صورت، با گذشت زمان، در نهایت لحظه‌ای فرا خواهد رسید که مقدار این مهلت برای بسته‌های غیر حساس به تاخیر، کمتر از آستانه شده و آنها نیز در اولویت قرار گرفته، ارسال شوند و از این طریق، از توقف سرویس‌دهی به آنها جلوگیری خواهد شد.

#### ۴- ارزیابی و نتایج عملی

در این بخش، راهکار پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. به طور کلی آزمایش‌های مختلفی انجام شده و نتایج آن‌ها بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار پایتون و رایانه دارای دو هسته مرکزی با قدرت پردازش 1.7GHz در پردازنده CORE i3 و RAM با ظرفیت 12GB انجام شده است.

براساس مرجع [۲۰]، پارامترهای شبیه‌سازی، به غیر از مواردی که به طور صریح بیان شده باشند، به این صورت تنظیم شده است: تعداد رله‌ها ۴ و ظرفیت میانگیرهای آنها ۱۰ بسته در نظر گرفته شده است. توان ارسالی مبدأ و رله‌ها، ۰/۱ میلی‌وات و توان نوفه ۰,۰۰۰۰۰۱ میلی‌وات است. احتمال تولید بسته در مبدأ، ۰/۳، احتمال حساس به تاخیر بودن بسته تولید شده، ۰/۵ و مهلت زمانی بسته‌های تولید شده حساس به تاخیر ۷ بازه زمانی در نظر گرفته شده است. بهره کانال بی‌سیم با توزیع ریلی<sup>۲۱</sup> با مقیاس برابر با ۱ مقداردهی شده است که مقادیر بین ۰ و ۱ را شامل می‌شود و مقدار آستانه SNR برای آشکارسازی بیت‌ها، ۱۰ دسی‌بل<sup>۲۲</sup> است. مقدار آستانه مهلت زمانی ۴ در نظر گرفته شده است که این مقدار براساس نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف تعیین شده است.

با توجه به این که براساس اطلاعات نویسندگان این مقاله، قبلاً هیچ پژوهشی، مسئله انتخاب رله میانگیردار را در شبکه‌های دارای بسته‌های حساس به تاخیر و غیر حساس به تاخیر بررسی نکرده است، برای بررسی کارآیی روش

23- Channel-Aware Relay Selection

24- Queue-, Channel- Aware Relay Selection

21-Rayleigh

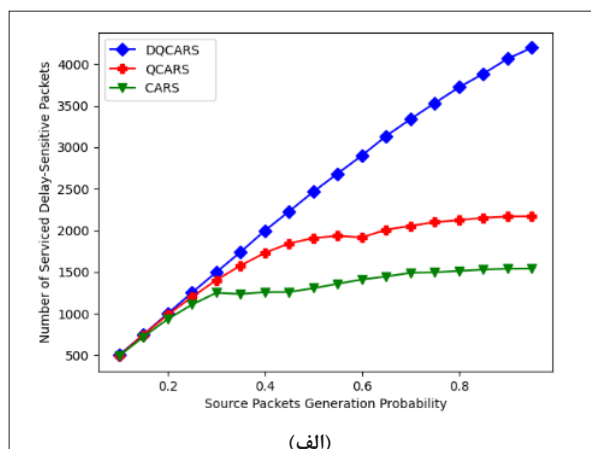
22-Decibel

بسته‌ها از  $0/3$  بیشتر است، تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده با سرعت کمتری افزایش می‌یابد. علت، این است که با افزایش احتمال تولید بسته داده، تعداد بسته‌های موجود در میانگیر رله‌ها افزایش می‌یابد و در روش QCARS، بسته‌ها به ترتیب ورود سرویس‌دهی می‌شوند و اولییتی برای بسته‌های حساس به تاخیر در نظر گرفته نمی‌شود. لذا تعداد بسته‌هایی که تا پایان مهلت زمانی‌شان سرویس‌دهی نشده‌اند، افزایش می‌یابد. در راهکار CARS نیز سرعت افزایش تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده در حالتی که احتمال تولید بسته‌ها کمتر از  $0/3$  است، به طور تقریبی برابر با تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده در راهکار پیشنهادی و راهکار QCARS است، اما در حالتی که احتمال تولید بسته‌ها از  $0/3$  بیشتر است، تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده تقریباً ثابت می‌ماند. علت، این است که این روش تنها بر اساس شرایط کانال، رله‌ای را برای ارسال یا دریافت بسته انتخاب می‌کند و طول صف میانگیر رله‌ها را در نظر نمی‌گیرد؛ لذا ممکن است بسته‌ها مدت زیادی در میانگیر رله منتظر بمانند و مهلت زمانی بسته‌ها تمام شده و حذف شوند.

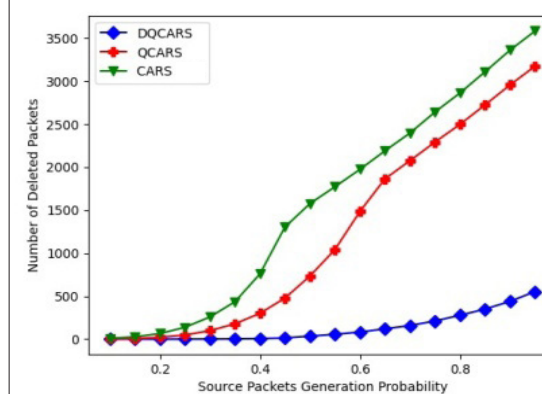
در شکل (۳) -ب، مشاهده می‌شود که با افزایش احتمال تولید بسته‌ها، تعداد بسته‌های حذف شده در راهکار QCARS و CARS به سرعت افزایش می‌یابد، در حالی که در راهکار پیشنهادی افزایش بسته‌های حذف شده به آرامی صورت می‌گیرد. علت این روند، آن است که در راهکار QCARS و CARS اولییتی برای بسته‌های حساس به تاخیر در نظر گرفته نمی‌شود و بسته‌ها به ترتیب ورود به میانگیر سرویس‌دهی می‌شوند که این امر باعث می‌شود بسته‌های حساس به تاخیر، مدت زیادی در صف باقی بمانند تا زمان سرویس‌دهی آن‌ها برسد؛ بنابراین با گذشت زمان، مهلت زمانی آن‌ها تمام شده و تعداد بسته‌های حذف شده نیز بیشتر می‌شود.

شکل (۳) -ج نیز مقایسه تعداد بسته‌های غیرحساس به

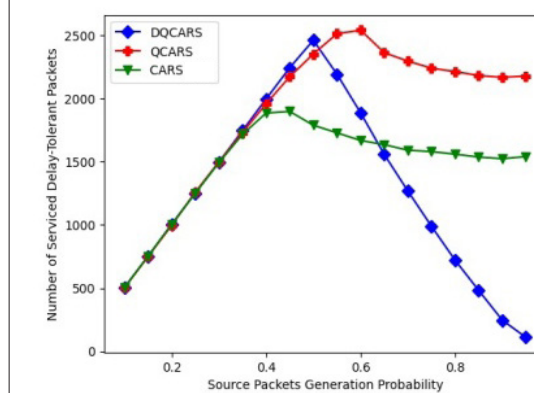
در راهکار پیشنهادی است؛ اما در حالتی که احتمال تولید



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۳): اثر افزایش احتمال تولید بسته داده در مبدا؛ میانگین ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی. (الف) تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده، (ب) تعداد بسته‌های حذف شده و (ج) تعداد بسته‌های غیرحساس به تاخیر سرویس‌دهی شده

نوع بسته به مقصد نمی‌رسند اما چون راهکار DQCARS اولویت را به بسته‌های حساس به تاخیر می‌دهد، بسته‌هایی که به مقصد نمی‌رسند بیشتر از نوع غیر حساس به تاخیر هستند. همان‌طور که در انتهای بخش سوم توضیح داده شد، اگر سرویس‌دهی بسته‌های غیر حساس به تاخیر هم مهم باشد، مبدا می‌تواند با برچسب زدن مهلتی زیادتیر برای آنها، از صفر شدن سرویس‌دهی به آنها جلوگیری کند.

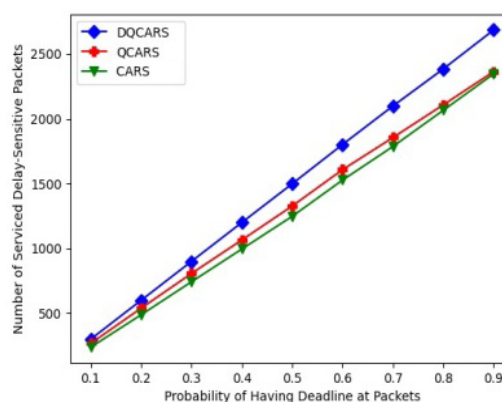
شکل (۴)، اثر افزایش احتمال حساس به تاخیر بودن بسته‌ها از ۰/۱ تا ۰/۹ را بر نتایج راهکار DQCARS و دو راهکار مرجع نشان داده و نحوه عملکرد آنها را موقعی که درصد تعداد بسته‌های حساس به تاخیر کم یا زیاد است، روشن می‌کند. به عنوان مثال، احتمال ۰/۱ در محور افقی، بیانگر آن است که به صورت متوسط، ۱۰ درصد از مجموع بسته‌های تولید شده در مبدا حساس به تاخیر و ۹۰ درصد بقیه، غیر حساس به تاخیر هستند، یعنی حالتی که تعداد بسته‌های حساس به تاخیر خیلی کمتر از بسته‌های غیر حساس به تاخیر است. در شکل (۴) - الف دیده می‌شود که با افزایش احتمال حساس به تاخیر بودن بسته‌ها، اگرچه تعداد بسته‌های سرویس‌دهی شده در هر سه روش افزایش می‌یابد، تعداد بسته‌های سرویس‌دهی شده حساس به تاخیر در روش DQCARS در مقایسه با روش QCARS و CARS بیشتر است. علت افزایش تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده در راهکار QCARS و CARS این است که با افزایش احتمال حساس به تاخیر بودن بسته‌ها، خود به خود تعداد بیشتری از بسته‌های تولید شده حساس به تاخیر هستند. بنابراین در این دو راهکار نیز تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده همواره در حال افزایش است. اما روش DQCARS در مقایسه با روش‌های QCARS و CARS عملکرد بهتری دارد، زیرا روش DQCARS در انتخاب رله و عملکرد آن، اولویت را به بسته‌های حساس به تاخیر می‌دهد و بسته‌ها قبل از اتمام مهلت زمانی، به مقصد ارسال می‌شوند؛ اما در روش QCARS و CARS بسته‌ها به ترتیب

تاخیر سرویس‌دهی شده را نشان می‌دهد. اگرچه با افزایش تولید بسته‌های داده در مبدا، هم تعداد بسته‌های حساس به تاخیر و هم تعداد بسته‌های غیر حساس به تاخیر تقریباً به صورت یکسان افزایش می‌یابد، در راهکار ارائه شده با اولویت دادن به سرویس‌دهی بسته‌های حساس به تاخیر، از نقطه‌ای به بعد، تعداد بسته‌های سرویس‌دهی شده غیر حساس به تاخیر کاهش می‌یابد. در راهکار QCARS در حالتی که احتمال تولید بسته داده در مبدا کمتر از ۰/۶ و در راهکار CARS در حالتی که احتمال تولید بسته داده در مبدا کمتر از ۰/۴ است، تعداد بسته‌های سرویس‌دهی شده غیر حساس به تاخیر افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد ولی میزان این کاهش نسبت به DQCARS کمتر است. علت این امر آن است که با افزایش احتمال تولید بسته‌های داده، تعداد بسته‌های حساس به تاخیر تولید شده نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، چون ظرفیت سیستم ثابت است و راهکار پیشنهادی DQCARS اولویت را به سرویس‌دهی بسته‌های حساس به تاخیر می‌دهد، تعداد بسته‌های سرویس‌دهی شده غیر حساس به تاخیر با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. اما در راهکارهای QCARS و CARS بسته‌ها به ترتیب ورود به میانگیر برای سرویس‌دهی انتخاب می‌شوند و اولی‌ترین به بسته‌های حساس به تاخیر داده نمی‌شود. علت کاهش تعداد بسته‌های سرویس‌دهی شده غیر حساس به تاخیر در این دو روش هم این است که ممکن است بسته‌ای که در اول صف قرار دارد، بسته حساس به تاخیر باشد اما مهلت لازم برای ارسال به مقصد را نداشته باشد و لذا قبل از ارسال، آن بسته حذف شده و در آن بازه زمانی بسته دیگری برای سرویس‌دهی انتخاب نشود. به طور خلاصه می‌توان گفت چون ظرفیت شبکه ثابت است، اگر تعداد بسته‌ها، چه حساس به تاخیر و چه غیر حساس به تاخیر، افزایش یابد به گونه‌ای که خارج از ظرفیت شبکه باشد، تعداد بسته‌هایی که در مبدا تولید می‌شوند ولی به مقصد نمی‌رسند زیاد خواهد شد. در راهکارهای QCARS و CARS، چون تفاوتی بین بسته‌ها در نظر گرفته نمی‌شود، تعداد زیادی از هر دو

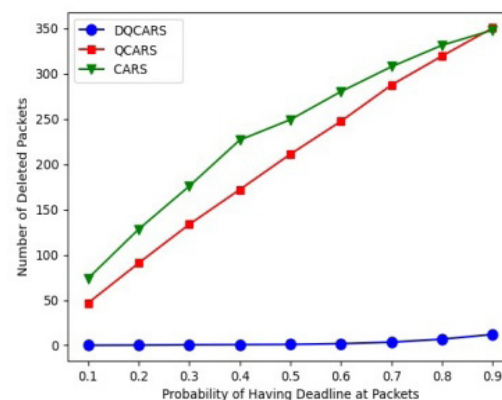
دلیل بسته‌ها مدت زیادی در صف منتظر می‌مانند. بنابراین مهلت زمانی بعضی از بسته‌های حساس به تاخیر تمام شده و حذف می‌شوند. بنابراین همان‌طور که در شکل (۴) - ب با بزرگنمایی فاصله‌ها و با جزئیات بیشتر نشان داده شده است، تعداد بسته‌های حذف‌شده در روش QCARS نسبت به روش DQCARS بیشتر است و با افزایش احتمال حساس به تاخیر بودن بسته‌ها نیز با شیب زیادی در حال افزایش است در حالی که در روش DQCARS، تعداد بسته‌های حذف‌شده تغییر زیادی نکرده و به طور تقریبی ثابت است. همچنین تعداد بسته‌های حذف‌شده در روش CARS نسبت به روش QCARS بیشتر است. دلیل آن این است که روش CARS برای انتخاب رله، طول صف میانگیر رله‌ها و طول صف میانگیر مبدا را در نظر نمی‌گیرد و احتمال دارد یک بسته حساس به تاخیر را به رله‌ای ارسال کند که صف آن طولانی است و بسته مدت زمان زیادی در میانگیر رله منتظر بماند و مهلت زمانی‌اش تمام شده و حذف شود. شکل (۴) - ج نشان می‌دهد که با افزایش احتمال حساس به تاخیر بودن بسته‌ها، هر سه روش عملکرد تقریباً یکسانی در سرویس‌دهی بسته‌های غیرحساس به تاخیر دارند. این مشاهده‌ها، برتری راهکار ارائه‌شده DQCARS را نشان می‌دهد که علاوه بر سرویس‌دهی به موقع بسته‌های حساس به تاخیر، بسته‌های غیرحساس به تاخیر را نیز به صورت مناسبی سرویس‌دهی می‌کند.

شکل (۵)، اثر افزایش تعداد رله‌ها را وقتی احتمال تولید بسته داده ۰/۳ است، نشان می‌دهد. شکل (۵) - الف نشان می‌دهد که در راهکار پیشنهادی در حالتی که تعداد رله‌ها از ۱ تا ۶ افزایش می‌یابد، تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده نیز زیاد می‌شود اما وقتی تعداد رله‌ها بیشتر از ۶ می‌شود، تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده ثابت می‌ماند. علت این است که وقتی تعداد رله‌ها ۶ است، به طور تقریبی تمام بسته‌های حساس به تاخیر تولیدشده، سرویس‌دهی می‌شوند و افزایش تعداد رله‌ها از ۶ به بعد تاثیری در تعداد سرویس‌دهی شده این

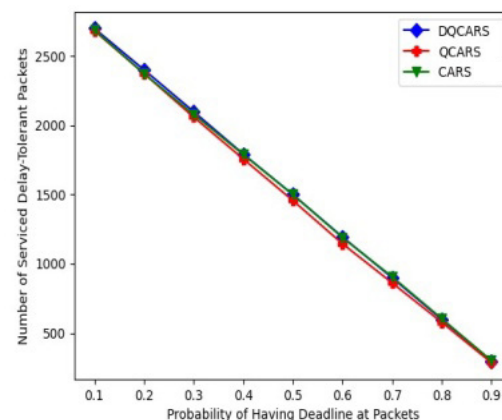
ورود به صف در میانگیر سرویس‌دهی می‌شوند و به همین



(الف)



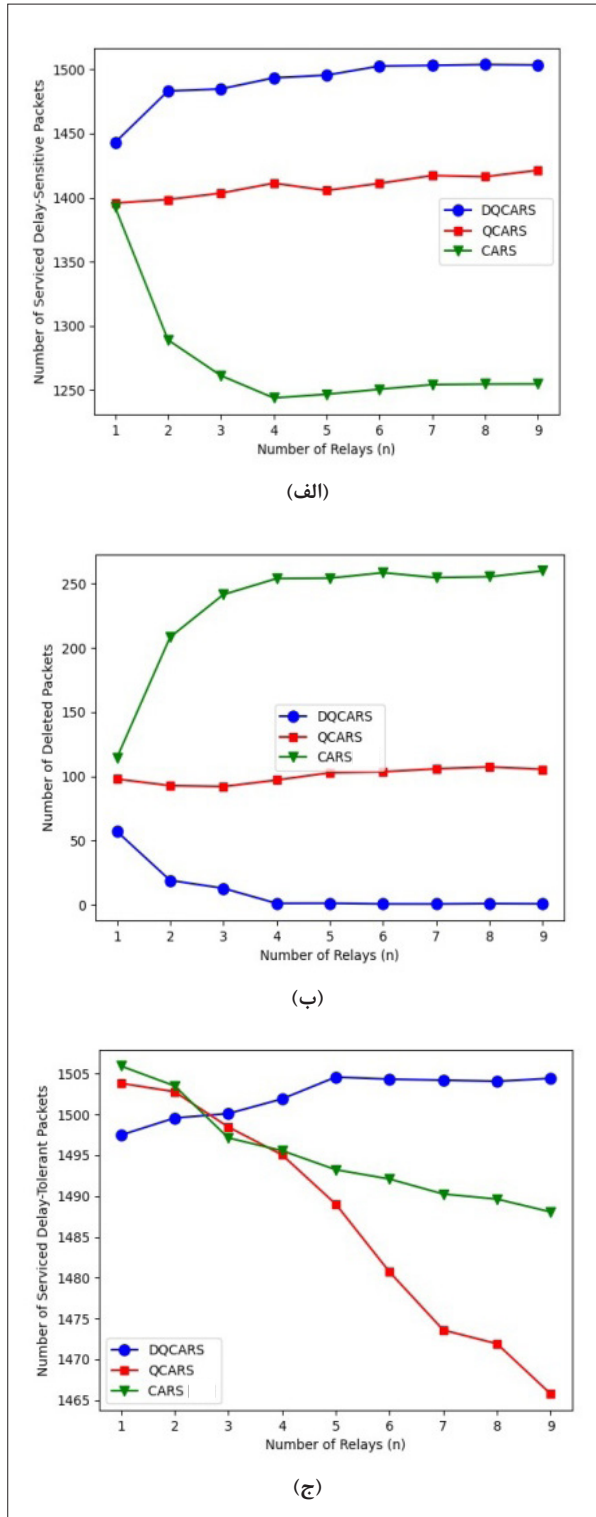
(ب)



(ج)

شکل (۴): اثر افزایش احتمال حساس به تاخیر بودن بسته‌های تولیدشده؛ میانگین ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی. (الف) تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده، (ب) تعداد بسته‌های حذف‌شده و (ج) تعداد بسته‌های غیرحساس به تاخیر سرویس‌دهی شده





شکل (۵): اثر افزایش تعداد رله‌ها، وقتی احتمال تولید بسته داده ۰,۳ است؛ میانگین ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی. (الف) تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده، (ب) تعداد بسته‌های حذف شده و (ج) تعداد بسته‌های غیرحساس به تاخیر سرویس‌دهی شده

بسته‌ها نخواهد داشت. همچنین شکل (۵)-ب نشان می‌دهد تعداد بسته‌های حذف‌شده در حالتی که تعداد رله‌ها از ۱ تا ۶ است، کاهش می‌یابد و در حالتی که تعداد رله‌ها از ۴ بیشتر است، تعداد بسته‌های حذف‌شده به صفر می‌رسد. علت این روند آن است که در حالتی که تعداد رله‌ها کم است، پیوندهای کمتری برای ارسال بسته‌ها موجود است و ممکن است پیوندهای موجود هم شرایط لازم برای سرویس‌دهی بسته‌ها را نداشته باشند. بنابراین، بسته‌ها مدت زیادی در میانگیر رله‌ها مانده و مهلت زمانی بسته‌های حساس به تاخیر تمام شده و حذف شوند. در راهکار QCARS اولویتی به بسته‌های حساس به تاخیر داده نمی‌شود و لذا، افزایش تعداد رله‌ها تأثیر چشم‌گیری در روند سرویس‌دهی بسته‌های حساس به تاخیر ندارد. به عبارت دقیق‌تر، با بررسی بیشتر نتایج شبیه‌سازی‌ها، مشخص شد که حدود ۱۵۰۰ بسته حساس به تاخیر تولید شده است که تقریباً ۱۴۰۰ بسته سرویس‌دهی شده و ۱۰۰ بسته حذف می‌شود. در نتیجه همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است، راهکار QCARS عملکرد بدتری نسبت به راهکار پیشنهادی دارد. همچنین راهکار CARS عملکرد بدتری نسبت به راهکار پیشنهادی و راهکار QCARS دارد؛ در حالتی که تعداد رله‌ها کمتر از ۴ است، تعداد بسته‌های حذف‌شده، افزایش و تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده، کاهش می‌یابد و در حالتی که تعداد رله‌ها ۴ تا ۹ است، تعداد بسته‌های حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده و تعداد بسته‌های حذف‌شده تقریباً ثابت می‌ماند. علت آن این است که راهکار CARS طول صف میانگیر رله‌ها را در انتخاب رله در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین، زمانی که تعداد رله‌ها زیاد است، ممکن است به خاطر مساعد بودن کانال، رله‌ای انتخاب شود که صف آن طولانی است و (چون در این روش اولویتی به بسته‌های حساس به تاخیر داده نمی‌شود) بسته مدت زیادی در میانگیر رله منتظر بماند و مهلت زمانی آن تمام شده و حذف شود.



شدن مهلت زمانی نیز کاهش یافته و در عین حال، امکان سرویس‌دهی بسته‌های غیرحساس به تاخیر نیز فراهم شده است و در نتیجه هدف اصلی که بهبود کیفیت خدمات است با سرویس‌دهی به موقع بسته‌ها محقق می‌شود. با اجرای شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، عملکرد راهکار پیشنهادی با دو راهکار مرجع مقایسه شده و کارایی بالای راهکار پیشنهادی نشان داده شد. برای ادامه پژوهش در آینده، راهکار ارائه شده در شرایط وجود پیوند مستقیم بین مبدا و مقصد می‌تواند توسعه داده شود و متحرک بودن رله‌ها و محدودیت انرژی گره‌ها نیز در انتخاب پیوند می‌تواند لحاظ شود.

### مراجع

1. Kurose, J. F., Ross, K. W., Computer Networking: A Top-Down Approach. Addison Wesley, 2017.
2. Meulen, V. D., Edward, C., "Three-terminal Communication Channels", Advances in Applied Probability, Vol. 3, pp. 120-154, 1971.
3. Kramer, G., Gastpar, M., Gupta, P., "Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 51, pp. 3037-3063., 2005.
4. Zlatanov, N., Ikhlef, A., Islam, T., Schober, R., "Buffer-Aided Cooperative Communications: Opportunities and Challenges", IEEE Communications Magazine, Vol. 52, pp. 146-153, 2014.
5. Hajipour, J., Ruby, R., Mohamed, A. and Leung, V. C. M., "Buffer-Aided Relaying Improves Both Throughput and End-to-End Delay", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, pp. 1-17., 2015.
6. Hajipour, J., Leung, C., Niya, J. M., "Context-Aware Relay Selection in Buffer-Aided Wireless Relay Networks", IEEE Communications Letters, Vol. 20, pp. 2502-2505, 2016.
7. Nasir, H., Javaid, N., Raza, W., Imran, M., Naseer, N., "Outage Probability of Hybrid Decode-Amplify-Forward Relaying Protocol for Buffer-Aided Relays", IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1-6, 2019.
8. El-Rajab, M., Abou-Rjeily, C., Kfoury, R., "Buffer-Aided Relaying: A Survey on Relay Selection Policies", IET Communications, Vol. 14, pp. 3715-3734, 2021.
9. Zlatanov, N., Schober, R., Popovski, P., "Buffer-Aided Relaying with Adaptive Link Selection", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 31, pp. 1530-1542, 2012.

شکل (۵) نشان می‌دهد در راهکار DQCARS، تعداد بسته‌های غیر حساس به تاخیر سرویس‌دهی شده در حالتی که تعداد رله‌ها از ۱ تا ۵ زیاد می‌شود، افزایش یافته و درحالتی که تعداد رله‌ها از ۵ بیشتر است، تقریباً ثابت می‌ماند. علت، این است که با افزایش تعداد رله‌ها تا ۵، تعداد پیوندهای با شرایط مساعد برای ارسال بسته بیشتر شده و در نتیجه تعداد بسته‌های سرویس‌دهی شده افزایش می‌یابد؛ اما وقتی تعداد رله‌ها از ۵ بیشتر است، تقریباً تمام بسته‌های غیرحساس به تاخیر تولیدشده سرویس‌دهی می‌شوند و در نتیجه افزایش تعداد رله‌ها تاثیری در سرویس‌دهی بسته‌ها ندارد. با افزایش تعداد رله‌ها در دو راهکار QCARS و CARS، تعداد بسته‌های غیرحساس به تاخیر سرویس‌دهی شده کاهش می‌یابد. علت آن است که بسته‌ها در میانگیر رله‌های مختلف ذخیره می‌شوند و ممکن است پیوند رله‌ای که بسته را در میانگیر خود دارد، شرایط ارسال بسته را نداشته باشد و یا رله‌ای که برای ارسال بسته انتخاب شده، بسته حساس به تاخیر در ابتدای صف خود داشته باشد که مهلت کافی برای سرویس‌دهی را نداشته و حذف شود؛ در نتیجه، عملاً در آن بازه زمانی بسته‌ای ارسال نشود، چرا که رله دیگری برای ارسال یا دریافت بسته انتخاب نمی‌شود. در نتیجه این رخداد، فرصت کمتری برای سرویس‌دهی بسته‌های غیرحساس به تاخیر می‌ماند.

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک راهکار انتخاب رله با در نظر گرفتن شرایط کانال، وضعیت صف بسته‌ها در میانگیر مبدا و رله‌ها، و مهلت زمانی باقی‌مانده بسته‌های حساس به تاخیر ارائه شده است. در راهکار پیشنهادی، وقتی مهلت زمانی بسته‌های حساس به تاخیر کمتر از یک مقدار آستانه باشد، اولویت به سرویس‌دهی بسته‌های حساس به تاخیر داده می‌شود. بنابراین علاوه بر سرویس‌دهی به موقع بسته‌های حساس به تاخیر، تعداد بسته‌های حذف شده ناشی از رد

23. Gong, Y., Chen, G., Xie, T., "Using Buffers in Trust-Aware Relay Selection Networks with Spatially Random Relays", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 17, pp. 5818-5826, 2018.
24. Xu, P., Chen, G., Yang, Z., Lei, H., "Buffer-State-Based Probabilistic Relay Selection for Cooperative Networks with Delay Constraints", *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 9, pp. 1855-1859, 2020.
25. Ullah, S., Malik, M. H., Tuysuz, M. F., Hasnain, M., Aydin, M. E., "Max-Gain Relay Selection Scheme for Wireless Networks", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 24, pp. 183-191, 2021.
10. Ikki, S. S., Ahmed, M. H., "On the Performance of Cooperative-Diversity Networks with the Nth Best-Relay Selection Scheme", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 58, pp. 3062-3069, 2010.
11. Ikhlef, A., Michalopoulos, D. S., Schober, R., "Max-Max Relay Selection for Relays with Buffers", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 3, pp. 1124-1135, 2013.
12. Tian, Z., Chen, G., Gong, Y., Chen, Z., Chambers, J., "Buffer-Aided Max-Link Relay Selection in Amplify-and-Forward Cooperative Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, pp. 553-565, 2015.
13. Tian, Z., Gong, Y., Chen, G., Chambers, J. A., "Buffer-Aided Relay Selection with Reduced Packet Delay in Cooperative Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, pp. 2567-2575, 2016.
14. Charalambous, T., Nomikos, N., Krikidis, I., Vouyioukas, D., Johansson, M., "Modeling Buffer-Aided Relay Selection in Networks with Direct Transmission Capability", *IEEE Communications Letters*, Vol. 19, pp. 649-652, 2015.
15. Oiwa, M., Tosa, C., Sugiura, S., "Theoretical Analysis of Hybrid Buffer-Aided Cooperative Protocol Based on Max-Max and Max-Link Relay Selections", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, pp. 9236-9246, 2016.
16. Xu, P., Yang, Z., Ding, Z., Krikidis, I., Chen, Q., "A Novel Probabilistic Buffer-Aided Relay Selection Scheme in Cooperative Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 69, pp. 4548-4552, 2020.
17. Xu, P., Ding, Z., Krikidis, I., Dai, X., "Achieving Optimal Diversity Gain in Buffer-Aided Relay Networks with Small Buffer Size", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, pp. 8788-8794, 2015.
18. Lin, S. L., Liu, K. H., "Relay Selection for Cooperative Relaying Networks with Small Buffers", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, pp. 6562-6572, 2016.
19. Poulimeneas, D., Charalambous, T., Nomikos, N., Krikidis, I., Vouyioukas, D., Johansson, M., "Delay-and Diversity-Aware Buffer-Aided Relay Selection Policies in Cooperative Networks", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1-6, 2016.
20. Siddig, A. A. M., Salleh, M. F. M., "Balancing Buffer-Aided Relay Selection for Cooperative Relaying Systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, pp. 8276-8290, 2017.
21. Raza, W., Javaid, N., Nasir, H., Aurangzeb, K., Khan, Z. A., Haider, S. I., "BTRS: Buffer-Threshold Based Relay Selection Scheme for Cooperative Wireless Networks", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 23089.23099, 2018.
22. Raza, W., Javaid, N., Nasir, H., Alrajeh, N., Guizani, N., "Buffer-Aided Relay Selection with Equal-Weight Links in Cooperative Wireless Networks", *IEEE Communications Letters*, Vol. 22, pp. 133.136, 2018.