

## بهبود مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه در شبکه‌های توری بی‌سیم با به‌کارگیری منطق فازی

پریسا رفیعی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ قاسم میرجلیلی<sup>۲</sup>، استاد؛ محسن حیدریان<sup>۳</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد - یزد - ایران - p.rafiie@stu.yazd.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد - یزد - ایران - mirjalily@yazd.ac.ir

۳- دانشکده فناوری اطلاعات و مهندسی کامپیوتر - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران - heydarian@azaruniv.ac.ir

**چکیده:** کدگذاری شبکه، رویکردی مؤثر جهت بهبود عملکرد شبکه‌های بی‌سیم است. از این رو، نسل جدیدی از پروتکل‌های مسیریابی، تحت عنوان پروتکل‌های مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه، در فرآیند کشف مسیر خود، موقعیت‌های کدگذاری موجود را شناسایی نموده و سعی در استقرار مسیریابی با موقعیت‌های کدگذاری مناسب می‌نمایند. بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در این نوع مسیریابی، تنها سعی بر حداکثر نمودن تعداد موقعیت‌های کدگذاری در مسیر ارسال داده دارند. این در حالی است که افزایش موقعیت‌های کدگذاری به تنهایی، ممکن است بهینگی و گذردهی مسیرهای شبکه را کاهش دهد زیرا گاهی اوقات با در نظر گرفتن عامل موقعیت‌های کدگذاری به تنهایی و عدم توجه به کیفیت پیوندهای مسیر، کیفیت مسیرهای کشف شده کمتر می‌شود. در این مقاله، به منظور برطرف نمودن نقاط ضعف پژوهش‌های مرتبط انجام شده، یک پروتکل جدید مسیریابی آگاه به کدگذاری بر اساس منطق فازی ارائه شده است. به نحوی که تأخیر پیوندهای هر مسیر در کنار وضعیت گره‌های هر مسیر، با به‌کارگیری منطق فازی ارزیابی می‌شوند و ارزش کلی مسیرهای مختلف، مشخص می‌شود. در نهایت مسیریابی که از نظر کیفیت پیوندها و گره‌های مسیر، دارای وضعیت بهتری هستند برای ارسال داده‌ها انتخاب می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پروتکل پیشنهادی، نسبت به روش‌های پیشین، عملکرد بهتری از نظر گذردهی، نسبت تحویل بسته و تأخیر انتها به انتها دارد.

**واژه‌های کلیدی:** کدگذاری شبکه، مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه، منطق فازی، شبکه‌های توری بی‌سیم.

## Improving Network Coding-aware Routing in Wireless Mesh Networks Using Fuzzy Logic

Parisa Rafiee, M.Sc. student<sup>1</sup>; Ghasem Mirjalily, Professor<sup>2</sup>; Mohsen Heydarian, Assistant professor<sup>3</sup>

1- Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, Email: p.rafiie@stu.yazd.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, Email: mirjalily@yazd.ac.ir

3- Department of Information Technology and Computer Engineering, Azarbijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, Email: heydarian@azaruniv.ac.ir

**Abstract:** Network coding is an effective approach for improving the performance of wireless networks, such that a new generation of routing protocols, known as network coding-aware protocols, recognize coding opportunities during their route discovery process, and try to establish routes containing appropriate coding opportunities. Most of the research works being done around this type of routing, only try to maximize the number of coding opportunities along data transmission route. However, merely considering coding opportunities, may decrease the optimality and the throughput of routes, since sometimes, by considering only the number of coding opportunities without paying attention to the quality of links along routes, the quality of detected routes will be decreased. In this paper, in order to resolve the deficiencies of previously related works, a new network coding-aware routing protocol based on fuzzy logic is proposed, such that the delay of links besides the status of all nodes along different paths are evaluated through utilizing fuzzy logic, and the overall value of all paths are determined. Finally, paths with better status in terms of the quality of links and nodes, are selected for data transmission. Simulation results demonstrate that the proposed protocol has better performance than previous approaches, in terms of throughput, packet delivery ratio, and delay.

**Keywords:** Network Coding, Coding-aware Routing, Fuzzy Logic, Wireless Mesh Network.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۱

نام نویسنده مسئول: قاسم میرجلیلی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - یزد - صفاتیه - بلوار دانشگاه - دانشگاه یزد - دانشکده مهندسی برق.

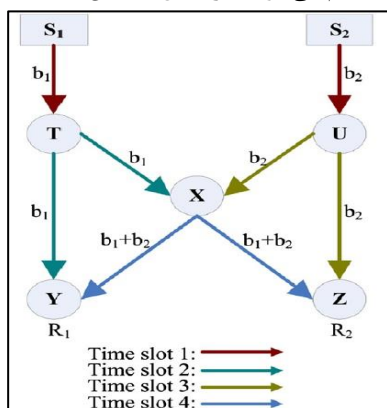
۱- مقدمه

کدگذاری شبکه تکنیک مؤثری است که می‌تواند به منظور بهبود گذردهی<sup>۱</sup> شبکه [۱]، بهبود مقاومت<sup>۲</sup> شبکه در برابر تغییرات احتمالی [۲] و نیز کاهش مصرف انرژی [۳] به کار گرفته شود. در رویکرد کدگذاری شبکه، گره‌های شبکه در صورت داشتن موقعیت و قابلیت کدگذاری، به جای ارسال بسته‌های داده به صورت خام<sup>۳</sup> (کدگذاری نشده)، آن‌ها را با عملیات ریاضی مناسب، با یکدیگر کدگذاری (ترکیب) نموده و بسته‌ی حاصل از ترکیب دو یا چند بسته را ارسال می‌نمایند. به این ترتیب، با به کارگیری تکنیک کدگذاری شبکه، با انجام یک ارسال، تعداد بسته بیشتری ارسال خواهد شد و گذردهی شبکه بهبود می‌یابد [۴]. در این رویکرد، بر اساس اینکه بسته‌های مورد کدگذاری، متعلق به یک جریان داده و یا جریان‌های داده‌ی مختلف باشند، به ترتیب نوع کدگذاری استفاده‌شده، درون جریانی [۵] و یا میان جریانی [۶، ۵] نامیده می‌شود. عملیات ترکیب بسته‌ها در کدگذاری شبکه، می‌تواند با اعمال عمل منطقی XOR [۶] و یا کدگذاری خطی تصادفی<sup>۴</sup> (RLNC) [۷] صورت پذیرد. کدگذاری شبکه می‌تواند در هر دو سناریوی وجود نشست چندپخششی<sup>۵</sup> [۸] و یا وجود چند نشست تک‌پخششی<sup>۶</sup> [۱۱، ۱۰] به کار گرفته شود و عملکرد شبکه را بهبود بخشد.

شبکه‌ی توری بی‌سیم<sup>۷</sup> (WMN)، یک شبکه‌ی چند گامی<sup>۸</sup> است که دارای محدوده‌ی پوشش وسیع، ظرفیت بالا و سرعت دسترسی زیاد است. یکی از چالش‌های جدی در شبکه‌ی توری بی‌سیم، طراحی پروتکل‌های مسیریابی است. گسترش کم‌هزینه و پایداری شبکه‌های WMN، این شبکه‌ها را به فناوری امیدبخشی برای کاربردهای متعدد تبدیل کرده است [۹]. ویژگی‌های این شبکه‌ها و نیاز جدی آن‌ها به گذردهی بالا موجب می‌شود که این نوع شبکه برای به کارگیری انواع تکنیک‌های کدگذاری، شبکه‌ای مناسب ارزیابی شود.

به منظور درک بهتر روند عملکرد کدگذاری شبکه، شبکه‌ی مطابق شکل ۱ را در نظر بگیرید. در این شبکه اگر هر یک از گره‌های مبدأ  $S_1$  و  $S_2$ ، بخواهد هر دو بسته  $b_1$  و  $b_2$  را به هر دو گره مقصد  $R_1$  و  $R_2$  به صورت فراگیر ارسال نماید؛ با توجه به توپولوژی شبکه، گره  $T$  در محدوده‌ی ارسال گره  $S_1$  است اما در محدوده‌ی ارسال گره  $S_2$  نیست. همچنین، گره  $U$  در محدوده‌ی ارسال گره  $S_2$  است اما در محدوده‌ی ارسال گره  $S_1$  نیست. بنابراین، برای آنکه هر دو بسته  $b_1$  و  $b_2$  در هر دو گره  $Y$  و  $Z$  دریافت شوند، بسته‌های  $b_1$  و  $b_2$  باید از گره‌های میانی یعنی  $T$ ،  $U$  و  $X$  عبور کنند. با فرض اینکه محور زمان به برش‌های زمانی<sup>۹</sup> تقسیم‌بندی شده باشد و در فرآیند دسترسی به رسانه‌ی انتقال<sup>۱۰</sup>، گره  $T$  زودتر از گره  $U$  و در برش زمانی دوم، رسانه انتقال را به دست گیرد؛ در صورت عدم به کارگیری کدگذاری شبکه، برش‌های زمانی موردنیاز برای تکمیل این ارسال به این صورت خواهد بود. **در برش زمانی ۱:**  $S_1$  بسته  $b_1$  را به  $T$  ارسال نموده و  $S_2$  بسته  $b_2$  را به  $U$  ارسال می‌کند. **در برش زمانی ۲:** گره  $T$  بسته  $b_1$  را به هر دو گره  $X$  و  $Y$  ارسال می‌کند. **در برش زمانی ۳:** گره  $U$  بسته  $b_2$

را به هر دو گره  $X$  و  $Z$  ارسال می‌کند. **در برش زمانی ۴:** گره  $X$  بسته‌ی  $b_1$  را به هر دو گره  $Y$  و  $Z$  ارسال می‌کند. **در برش زمانی ۵:** گره  $X$  بسته‌ی  $b_2$  را به هر دو گره  $Y$  و  $Z$  ارسال می‌کند. حال اگر در همین سناریو، کدگذاری شبکه به کار برده شود، برش‌های زمانی به این صورت موردنیاز خواهند بود. **در برش زمانی ۱:**  $S_1$  بسته  $b_1$  را به  $T$  ارسال نموده و  $S_2$  بسته  $b_2$  را به  $U$  ارسال می‌کند. **در برش زمانی ۲:** گره  $T$  بسته‌ی  $b_1$  را به هر دو گره  $X$  و  $Y$  ارسال می‌کند. **در برش زمانی ۳:** گره  $U$  بسته‌ی  $b_2$  را به هر دو گره  $X$  و  $Z$  ارسال می‌کند. **در برش زمانی ۴:** گره  $X$  با به کارگیری کدگذاری شبکه و اعمال XOR بر روی بسته‌های  $b_1$  و  $b_2$ ، بسته‌ی جدید  $b_3 (= b_1 \oplus b_2)$  را تولید می‌کند و سپس بسته‌ی جدید تولید شده را به طور هم‌زمان به  $Z$  و  $Y$  پخش فراگیر می‌کند. با توجه به این که گره  $Y$  ( $Z$ ) قبلاً از طریق استراق سمع<sup>۱۱</sup> بسته‌های خام ارسال شده توسط گره  $T$  ( $U$ )، بسته‌ی اصلی  $b_1$  ( $b_2$ ) را دریافت کرده است. لذا اکنون با دریافت بسته‌ی حاصل از کدگذاری ( $b_3$ ) و کدگشایی آن با استفاده از بسته‌های خام، بسته‌ی  $b_2$  در گره  $Y$  و بسته‌ی  $b_1$  در گره  $Z$  قابل بازیابی خواهد بود که این امر پخش فراگیر را کامل می‌کند. روند زمان‌بندی و عملیاتی که به طور هم‌زمان در برش‌های زمانی، بر روی پیوندهای مختلف انجام می‌شوند، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: تشریح عملکرد کدگذاری شبکه بی‌سیم [۱۰]

مشاهده می‌شود که با به کارگیری توأم پخش فراگیر و تکنیک کدگذاری شبکه در گره  $X$ ، انتقال بسته‌ها از مبدأ به مقصد در ۴ برش زمانی به پایان می‌رسد. اما در صورت عدم به کارگیری کدگذاری شبکه در گره  $X$ ، مجموعاً نیاز به ۵ برش زمانی برای تکمیل فرآیند انتقال و تحویل بسته‌ها خواهد بود. بنابراین در سناریوی شکل ۱، با به کارگیری کدگذاری شبکه، در یک برش زمانی صرفه‌جویی خواهد شد که این برش زمانی می‌تواند برای ارسال داده‌های دیگری در شبکه مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که در تکنیک کدگذاری شبکه، همیشه نمی‌توان در همه‌ی گره‌های شبکه و در هر شرایطی، بسته‌های داده را با یکدیگر کدگذاری نمود. چراکه ممکن است در صورت کدگذاری دو یا چند بسته با یکدیگر، امکان کدگشایی آن بسته‌ها وجود نداشته باشد. در این صورت، اعمال کدگذاری موجب می‌شود که بسته‌های داده‌ی اصلی، از بسته‌های کدگذاری شده قابل استخراج نباشند. به منظور اعمال

- طراحی مکانیزم مسیریابی در شبکه که به صورت «توزیع شده» عمل کند.
  - فراهم نمودن امکان غلبه بر عدم قطعیت های احتمالی و تغییرات جزئی شبکه. که در واقع، این عدم قطعیت ها برای پارامترهای اعمال شده به ورودی سیستم فازی بر طرف می شوند.
  - فراهم نمودن امکان بیان متغیرهای مؤثر در تصمیم گیری، به صورت «متغیر زبانی». این امر موجب می شود که بتوان دانش انسانی خود را در روند مسیریابی به کار گرفته و برای بهینه سازی مسیریابی از آن بهره برده شود.
  - طراحی سیستمی که هر سه عامل «قابلیت کدگذاری»، «بار کاری گره» و «کیفیت پیوند متصل» در آن توأم دخیل شوند و میان آن ها مصالحه های کارآمد صورت پذیرد.
- به طور کلی، عمده مواردی که در این پژوهش به آن پرداخته شده عبارتند از:

- ۱- طراحی یک سیستم فازی برای محاسبه «مقدار مطلوبیت» هر گره شبکه، بر اساس پارامترهای ورودی سیستم فازی.
- ۲- طراحی یک معیار مسیریابی که بتواند از خروجی سیستم فازی بهره جوید و بهترین مسیر، شامل گره هایی با مقدار مطلوبیت بالا را برای ارسال داده انتخاب کند.
- ۳- تحلیل شرایط کدگذاری پژوهش قبلی (IGCC) و رفع محدودیت های آن به منظور فراهم آوردن موقعیت های کدگذاری بیشتر.

## ۲- پژوهش های مرتبط

مسئله مسیریابی در شبکه های بی سیم، توجه تحقیقاتی بسیاری به خود جلب نموده است. به نحوی که انواع مختلفی از مسیریابی توسط محققان مطرح شده است. نویسندگان در مرجع [۱۳]، مسیریابی شبکه های حسگر را بر اساس معیارهای مبتنی بر کیفیت خدمات و کارآمدی انرژی بهبود بخشیده اند. در مرجع [۱۴]، نویسندگان از روش انتخاب ارسال کننده حریر صانه بهره برده و مسیریابی مبتنی بر موقعیت گره ها را در شبکه های حسگر بصری بهبود بخشیده اند.

کدگذاری شبکه اولین بار توسط اهلسود و همکارانش در شبکه ی پروانه ای مطرح شد و به عنوان رویکردی که قادر به دستیابی به ظرفیت چندپخش شبکه های بی سیم (بر اساس قضیه جریان بیشینه-برش کمینه) است، شناخته شد [۱۵]. از آنجا که مسئله تأخیر در دریافت بسته های مورد کدگذاری در تصمیم گیری کدگذاری مؤثر است، مراجع [۱۶] و [۱۷] با بررسی های آماری، مناسب بودن اعمال کدگذاری در شرایط مختلف را تحلیل و بررسی نموده اند. در مرجع [۱۸] مسئله ی به کارگیری کدگذاری شبکه در استاندارد IEEE802.11 رسیدگی شده است. به من در مرجع [۶] روش COPE به عنوان اولین معماری عملی به کارگیری کدگذاری شبکه ارائه شده است. با این حال، به دلیل استفاده

صحیح کدگذاری شبکه، نیاز است موقعیت گره ها و جریان های شبکه به نحوی باشد که بتوان اطمینان حاصل کرد که در صورت اعمال کدگذاری بین دو یا چند بسته، بسته های خام موجود در بسته ی کدگذاری شده، توسط گره های بعد، قابل استخراج باشند. به مجموعه ی گره ها و جریان هایی که نحوه ی قرارگیری آن ها، امکان اعمال کدگذاری را فراهم می نماید، «ساختار کدگذاری» گفته می شود. این ساختارها بر اساس شرایط کدگذاری، مشخص می شوند. در مرجع [۶] تعدادی ساختار کدگذاری معرفی شده است، از جمله: ساختار زنجیره ای، ساختار چرخه ای، ساختار صلیبی و ساختار نوع X. ساختار معرفی شده در شکل ۱ (شامل گره های U، T، X، Z و Y و جریان های عبور از آن ها) که گره X را قادر به انجام کدگذاری می نماید، به عنوان ساختار نوع X شناخته می شود.

در حالت کلی، اگر معیار مسیریابی، آگاه به کدگذاری نباشد حداکثر بهره ی ممکن از کدگذاری شبکه حاصل نمی شود. به عنوان مثال، اگر از معیاری مانند تعداد ارسال های مورد انتظار<sup>۱۲</sup> (ETX) [۱۱] برای مسیریابی استفاده شود و هر زمان که امکان کدگذاری در شبکه ایجاد شد، بسته های داده با یکدیگر کدگذاری شوند، در این صورت حداکثر بهره ی ممکن از کدگذاری شبکه حاصل نمی شود؛ چرا که در ایجاد مسیرهای ارسال داده، سعی در افزایش تعداد موقعیت های کدگذاری نمی شود. این امر منجر به ظهور نسل جدیدی از پروتکل های مسیریابی، تحت عنوان «مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه» شد تا بتوان در حین یافتن مسیر ارسال داده، موقعیت های کدگذاری را نیز فراهم نمود. در این نوع مسیریابی، معیار مسیریابی نسبت به موقعیت های کدگذاری موجود در مسیر ارسال داده آگاه است و سعی می شود مسیری شامل موقعیت کدگذاری برای ارسال داده انتخاب شود.

در مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه، به منظور فراهم نمودن موقعیت کدگذاری، نیاز است مسیر ارسال داده ها نزدیک به هم واقع شوند تا امکان استراق سمع بسته های خام برای گره های کدگشا مهیا گردد. این امر منجر به ایجاد تداخل در ارسال بسته های ارسالی از گره های مختلف می گردد. از این رو، مدنظر قرار دادن کیفیت پیوندهای مسیر ارسال در این نوع مسیریابی نیز، حائز اهمیت است [۱۲]. از طرفی، بسیاری از پژوهش های انجام شده ی قبلی، بدون در نظر گرفتن شرایط مختلف پیوندهای شبکه، تنها سعی در حداکثر نمودن تعداد موقعیت های کدگذاری می نمایند. در صورتی که در نظر گرفتن کیفیت پیوندهای موجود در مسیرهای مختلف، به طور قابل توجهی بر گذردهی شبکه، تأخیر انتها به انتها و نسبت تحویل بسته اثرگذار است. در این پژوهش، با ارائه ی پروتکل مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه بر اساس منطق فازی<sup>۱۳</sup> (FCAR) سعی شده تا نقاط ضعف پژوهش های قبلی بر طرف شود و در انتخاب مسیر ارسال داده ها، علاوه بر مدنظر قرار دادن قابلیت کدگذاری گره های مسیر، دیگر عوامل مؤثر بر بهبود عملکرد شبکه (از جمله کیفیت پیوندها) نیز در نظر گرفته شود. در واقع، اهداف به کارگیری منطق فازی در این پژوهش، عبارتند از:

بهره‌گیری نمود و نهایتاً مسیری شامل بهترین گره‌ها را برای ارسال داده انتخاب نمود.

### ۳- مدل سیستم

در روش پیشنهادی، یک شبکه‌ی توری بی سیم چند گامی که در آن، موقعیت گره‌های شبکه، ثابت بوده و از نشست‌های چندگانه‌ی تک‌پخشی پشتیبانی می‌کند، در نظر گرفته شده است. کلیه‌ی ار سال‌ها در چنین شبکه‌ای در حالت تک کاناله صورت می‌پذیرد. توپولوژی این شبکه به صورت گراف  $G=(N,L)$  مدل می‌شود که در آن،  $N$  مجموعه گره‌های شبکه (رئوس گراف) و  $L$  مجموعه‌ی پیوندهای میان گره‌ها (یال‌های گراف) است؛ به این صورت که اگر دو گره از مجموعه‌ی  $N$  در محدوده‌ی ارسال یکدیگر قرار گیرند، میان آن‌ها پیوندی برقرار می‌گردد که آن پیوند در مجموعه‌ی یال‌های  $L$  قرار می‌گیرد. محدودیت نیمه دوسویه وجود داشته و یک گره قادر نیست به صورت هم‌زمان، دریافت و ارسال را انجام دهد. یعنی یال‌ها در هر انتقال به صورت یک‌طرفه استفاده می‌شوند.

فرض می‌شود که کلیه‌ی گره‌های شبکه، به کدگذاری‌هایی مجهز هستند که توانایی کدگذاری بسته‌ها را دارند و در صورت برقرار بودن شرایط کدگذاری، بسته‌های واجد شرایط کدگذاری را با یکدیگر XOR نموده و بسته‌ی حاصل از کدگذاری را در طی یک ارسال، به همسایه‌های گام بعد، پخش فراگیر می‌کند. عمل کدگذاری به صورت میان‌جریانی صورت می‌پذیرد. شنود فرصت‌طلبانه نیز، توسط هر گره شبکه، به منظور شنود بسته‌های موردنیاز کدگشایی صورت می‌پذیرد؛ به این معنا که هر گره قادر است ارسال‌های همسایه‌های تک‌گامه‌ی خود (همسایه‌هایی که در محدوده‌ی ارسال گره قرار دارند) را شنود کند. هر یک از گره‌ها می‌تواند هر بسته‌ای که به فرم کدگذاری شده دریافت می‌شود را، در صورت داشتن بسته (ها)ی موردنیاز، کدگشایی نماید. به این ترتیب، هر یک از گره‌های میانی تا حد امکان، سعی در کدگشایی بسته‌های کدگذاری شده می‌نمایند. هر گره دارای یک صف است که بسته‌های متمایز دریافت شده از جریان‌های ترافیکی متفاوت را جهت پیش‌رانی، در آن قرار می‌دهد. فرض می‌شود که پیوند میان گره‌ها دو جهته است. به این ترتیب، این امکان تعبیه شده تا بسته‌های RREP از همان مسیر طی شده توسط بسته‌های RREQ عبور کنند. از آنجاکه از استاندارد IEEE802.11b در روش پیشنهادی استفاده شده است، این فرض نیز قابل قبول است که پیوندهای متفاوت، دارای پهنای باندها و در نتیجه کیفیت‌های متفاوتی هستند.

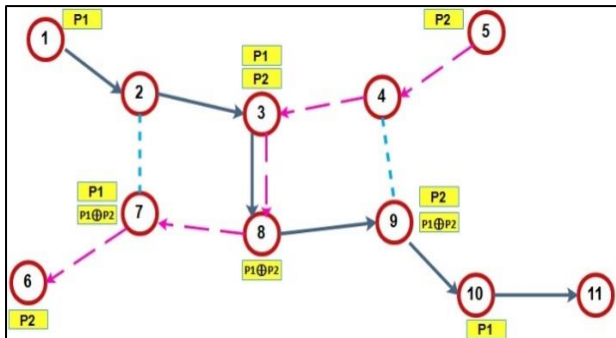
### ۴- مسیریابی آگاه به کدگذاری بر اساس منطق فازی

روش پیشنهادی این مقاله (FCAR)، با مدنظر قرار دادن کیفیت پیوندهای مسیر ارسال داده، در کنار مستعد سازی موقعیت‌های کدگذاری، عملکرد شبکه در رویکرد مسیریابی بهبود می‌بخشد. اساس عملکرد این پروتکل، بر مبنای پروتکل مسیریابی  $DSR^{20}$  [۲۷] بوده و

از معیار ETX در این رویکرد و عدم آگاهی این معیار مسیریابی به یافتن و ایجاد موقعیت‌های کدگذاری از یک‌سو، و محدود نمودن ساختار کدگذاری به دو گام از سوی دیگر، این مکانیزم حداکثر بازده ممکن را برای شبکه فراهم نمی‌نماید؛ چراکه در این معماری، هر گره فقط منتظر موقعیت کدگذاری می‌ماند و هر زمان که موقعیت کدگذاری فراهم شود، عمل کدگذاری انجام می‌پذیرد. به عبارتی، در فرآیند مسیریابی، تلاشی برای ایجاد موقعیت کدگذاری انجام نمی‌شود. در مرجع [۱۹] با به‌کارگیری آنتن جهت‌دار و بهره‌گیری از پخش فراگیر مبتنی بر کدگذاری شبکه، مصرف انرژی در شبکه‌های موردی متحرک<sup>۱۴</sup> (MANET) کاهش یافته است. در مرجع [۲۰] پروتکل مسیریابی جریان محور و آگاه به کدگذاری بر اساس مجموعه‌ی همبند غالب<sup>۱۵</sup> (CFCR) به منظور افزایش موقعیت‌های کدگذاری، پیشنهاد شده است. بر اساس پروتکل CFAR، گره‌های غالب، انتخاب مناسبی برای همگرا نمودن جریان‌های داده هستند. در مرجع [۲۱] به منظور برطرف نمودن معایب پیش‌تر ذکر شده‌ی COPE، رویکرد مسیریابی آگاه به کدگذاری توزیع شده<sup>۱۶</sup> (DCAR) پیشنهاد شده است. در این رویکرد به منظور برطرف نمودن محدودیت دو گامی بودن ساختار کدگذاری COPE، مجموعه شرایط کدگذاری جدیدی ارائه شده که قادر است ساختار کدگذاری را از چند گام دورتر کشف کند. به منظور بهبود شرایط کدگذاری پیشنهاد شده در مرجع [۲۱] و حصول اطمینان از کدگشایی موفق بسته‌ها، در مرجع [۲۲] شرایط کدگذاری جدیدی پیشنهاد شده است. علاوه بر آن، یک معیار مسیریابی نیز جهت انتخاب مسیر مناسب پیشنهاد شده است. به منظور اصلاح شرایط کدگذاری مرجع [۲۲] جهت کشف موقعیت‌های کدگذاری بیشتر برای کدگذاری بسته‌ی از قبل کدگذاری شده، مجموعه شرایط کدگذاری عمومی بهبود یافته<sup>۱۷</sup> (IGCC) در مرجع [۲۳] پیشنهاد شده است. علاوه بر آن، یک معیار مسیریابی آگاه به کدگذاری و بارکاری گره‌ها<sup>۱۸</sup> (CLARM) پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی این مرجع، مسیریابی کدگذاری شبکه<sup>۱۹</sup> (NCRT) نام گرفته است. با توجه به نقش مؤثر گوش سپاری در فراهم آوردن موقعیت‌ها کدگذاری، در مرجع [۲۴]، تکنیک گوش‌سپاری مجازی به عنوان یک رویکرد مناسب جهت ایجاد موقعیت‌های کدگذاری بیشتر پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۵]، برای ارسال داده‌ها در هر سناریوی تک‌پخشی، چند مسیر به صورت موازی تشکیل می‌شوند تا موقعیت‌های کدگذاری بیشتری برای شبکه فراهم شود. در مرجع [۲۶]، به منظور فراهم آوردن گذردهی بالا در شبکه‌هایی با توپولوژی و جریان‌های متغیر با زمان، یک مکانیزم مسیریابی فشار بازگشتی طراحی شده است. این رویکرد، جریان‌های شبکه را به سمت گره‌هایی که قابلیت کدگذاری بیشتری دارند هدایت می‌نماید.

حال آنکه تنها با حداکثر نمودن موقعیت‌های کدگذاری شبکه، گذردهی شبکه به حداکثر میزان ممکن دست نمی‌یابد؛ با برسی‌های انجام شده، این نتیجه حاصل شد که با در نظر گرفتن کلیه عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه با استفاده از سیستم فازی، می‌توان از دانش انسانی

چراکه گره گام بعد دریافت‌کننده‌ی بسته‌ی حاصل از کدگذاری در هر دو جریان، گره ۸ است.



شکل ۲: شبکه‌ی طراحی‌شده برای تشریح ضعف IGCC

اما اگر گره ۳، بسته‌های P1 و P2 را با یکدیگر کدگذاری نماید، جهت تحویل بسته‌های P1 و P2 از گره ۳ به گره ۸ یک ارسال کمتر موردنیاز است و مشکلی برای کدگذاری داده‌ها وجود ندارد، چراکه گره‌های ۷ و ۹ به ترتیب، در محدوده‌ی ارسال گره‌های ۲ و ۴ قرار دارند و بسته‌های خام موردنیاز کدگذاری را دریافت می‌نمایند.

همچنین در صورت کدگذاری این دو بسته، گره ۸ نیز جهت تحویل بسته‌ی P1 به گره ۹ و نیز تحویل P2 به گره ۷ به‌جای دو ارسال، به یک ارسال (ارسال بسته‌ی  $P_1 \oplus P_2$  به هر دو گره) نیاز خواهد داشت و در مجموع، دو ارسال ذخیره می‌شود. نهایتاً گره ۷ (۹) با توجه به بسته‌ی خام دریافت‌شده از گره ۲ (۴) قادر است بسته‌ی P2 (P1) را استخراج نموده و آن را به گره ۶ (۱۰ و ۱۱) تحویل دهد. اما اگر از شرایط کدگذاری IGCC در این سناریو استفاده شود، بسته‌های P1 و P2 در گره ۳ با یکدیگر کدگذاری نمی‌شوند و موقعیت کدگذاری از دست می‌رود.

در پروتکل FCAR، به‌منظور شناسایی و بهره‌گیری از موقعیت‌های کدگذاری بیشتر، شرایط کدگذاری IGCC اصلاح شده و مورداستفاده قرار گرفته است. به بیان بهتر، دو شرط فوق‌الذکر که منجر به از دست دادن تعدادی از موقعیت‌های کدگذاری می‌شود، از مجموعه‌ی شرایط، حذف شده و مابقی ۴ شرط، به‌عنوان مجموعه‌ی شرایط کدگذاری در نظر گرفته شده است. مجموعه‌ی این ۴ شرط در ادامه توصیف شده است و نمادهای مورداستفاده در تشریح آن‌ها در جدول ۱ تفصیل شده است. به‌منظور تسهیل بررسی امکان کدگذاری دو بسته با یکدیگر، یکی از بسته‌های مورد کدگذاری (که اخیراً توسط گره کدگذار دریافت شده) به‌عنوان «بسته‌ی اخیراً دریافت‌شده»، و بسته‌ی دیگر، تحت عنوان «بسته‌ی پیش‌تر قرارگرفته در صف» اشاره خواهد شد.

هنگامی که یک گره، بسته‌ای را دریافت می‌نماید، دو شرط زیر را به‌منظور کدگذاری آن، با هر یک از بسته‌های داخل صف، بررسی می‌کند:

۱. به ازای هر یک از جریان‌های متعلق به بسته‌های خام موجود در «بسته‌ی اخیراً دریافت‌شده» (به ازای کلیه  $f_i \in$

به‌منظور بررسی لزوم کدگذاری بسته‌ها با یکدیگر، شرایط IGCC اصلاح شده و از آن بهره‌گیری شده است.

#### ۴-۱- شرایط کدگذاری

جهت بررسی امکان اعمال کدگذاری بر بسته‌های جریان‌های مختلف، نیاز به بررسی شرایط کدگذاری است. در واقع، شرایط کدگذاری بررسی می‌کند که آیا در صورت اعمال کدگذاری به دو یا چند بسته‌ی داده، امکان کدگذاری آن در گره‌های بعد وجود دارد یا خیر. اگر شرایط کدگذاری برقرار باشد، به این معناست که بسته‌ی حاصل از کدگذاری، پیش از رسیدن به مقصد و یا در لحظه‌ی رسیدن به مقصد، قابل کدگذاری خواهد بود. بدیهی است در صورت عدم برقرار بودن شرایط کدگذاری، بسته‌های داده با یکدیگر کدگذاری نخواهند شد؛ چراکه منجر به ایجاد بسته‌هایی غیرقابل کدگذاری و در نتیجه از دست رفتن اطلاعات می‌گردد.

در مرجع [۲۳] مجموعه شرایط کدگذاری IGCC پیشنهاد شده است. با توجه به این مجموعه شرایط، برای اینکه یک بسته‌ی «اخیراً دریافت‌شده» با یک بسته‌ی «پیشین قرارگرفته در صف گره» با یکدیگر کدگذاری شوند، می‌بایست ۶ شرط برقرار باشند. با بررسی دقیق این شرایط، دریافتیم که فضایی برای بهبود این شرایط وجود دارد، چراکه با توجه به نمادهای تعریف‌شده در جدول ۱، دو شرط اول برای کدگذاری دو بسته در IGCC عبارت‌اند از:

- ۱- گره گام بعد جریان‌های «بسته‌ی اخیراً دریافت‌شده» و «بسته‌ی پیشین قرارگرفته در صف» باید گره‌هایی متفاوت باشند، یعنی

$$NextHop(C, f_i) \neq NextHop(C, f_j)$$

- ۲- بسته‌ی حاصل از کدگذاری می‌بایست در گام بعد، توسط گره‌هایی متمایز دریافت شود. یعنی

$$NextHop(C, f_i) \neq NextHop(C, f_{nc}), \forall f_{nc} \in flow\_set_{NC}$$

به بیان دقیق‌تر، بر اساس IGCC، اگر در گره‌ای امکان کدگذاری بسته‌ها وجود داشته باشد، اما جریان‌های مربوط به بسته‌های مورد کدگذاری، گره گام بعد مشترکی داشته باشند، بسته‌های آن جریان‌ها با یکدیگر کدگذاری نمی‌شود. این امر، موجب از دست رفتن موقعیت‌های کدگذاری می‌شود. به‌منظور تشریح بهتر، شبکه‌ی طراحی‌شده‌ی شکل ۲ را در نظر بگیرید. فرض می‌شود که گره ۱ قصد ارسال بسته‌ی P1 به گره ۱۱ را دارد و برای این منظور، مسیر  $1 \leftarrow 2 \leftarrow 3 \leftarrow 4 \leftarrow 5 \leftarrow 6 \leftarrow 7 \leftarrow 8 \leftarrow 9 \leftarrow 10 \leftarrow 11$  را انتخاب نموده است؛ علاوه بر آن، گره دیگری مانند گره ۵، قصد دارد بسته‌ی P2 را به گره ۶ تحویل دهد و به این منظور از مسیر  $5 \leftarrow 4 \leftarrow 3 \leftarrow 2 \leftarrow 1$  استفاده کند. اگر از شرایط کدگذاری IGCC به‌منظور تشخیص موقعیت کدگذاری در این سناریو استفاده گردد، موقعیت کدگذاری موجود در گره ۳ تشخیص داده نمی‌شود و بسته‌های داده در گره ۳ با یکدیگر ترکیب نمی‌شوند؛

جدول ۱: نمادهای به کاررفته در معرفی شرایط کدگذاری

نماد	نام کامل	تعریف دقیق
$f_i$	The primary flow of latter received packet	جریان اصلی مربوط به «بسته‌ی داده‌ی اخیراً دریافت شده»
$f_{ot}$	the flow of one of other native packets, embedded in the latter received packet	جریان یکی از دیگر بسته‌های خام قرار گرفته در «بسته‌ی اخیراً دریافت شده». (اگر «بسته‌ی اخیراً دریافت شده»، حاصل از کدگذاری چند بسته‌ی خام باشد، جریان یکی از بسته‌های خام، به‌عنوان $f_i$ در نظر گرفته می‌شود و جریان مابقی بسته‌های خام به‌عنوان $f_{ot}$ در نظر گرفته می‌شود.)
$flow\_set_l$	Set of flows existing in the latter packet	مجموعه کلیه جریان‌های بسته‌های خام موجود در «بسته‌ی اخیراً دریافت شده».
$f_f$	The primary flow of former received packet	جریان اصلی مربوط به «بسته‌ی پیشین در صف گره قرار گرفته»
$f_{of}$	One of other flows of former received packet	جریان متعلق به دیگر بسته‌های خام موجود در «بسته‌ی داخل صف» (اگر «بسته‌ی پیشین قرار گرفته در صف»، حاصل از کدگذاری چند بسته‌ی خام باشد، جریان یکی از بسته‌های خام، به‌عنوان $f_f$ در نظر گرفته می‌شود و جریان مابقی بسته‌های خام به‌عنوان $f_{of}$ در نظر گرفته می‌شود.)
$flow\_set_f$	Set of flows existing in the former packet	مجموعه‌ی کلیه جریان‌های متناظر با بسته‌های خام موجود در «بسته‌ی قرار گرفته در صف»
$downstr_f^n$	Downstream node of node n in flow f	مجموعه‌ای از گره‌های جریان f که بسته‌های جریان f را پس از گره n دریافت می‌کنند. این مجموعه، تحت عنوان گره‌های پایین‌دست گره n در جریان f شناخته می‌شوند.
$Ntv\_trns_f^n$	Upstream native transmitter node(s)	مجموعه‌ای از گره‌های جریان f که بسته‌های این جریان را پیش از گره n به‌صورت خام دریافت نموده‌اند.
Neigh(n)	Neighbors of node n	مجموعه همسایه‌های گره n (گره‌هایی که در محدوده ارسال گره n قرار دارند و قادر به دریافت بسته‌های ارسال شده توسط گره n هستند)
$f_{nc}$	A flow of newly coded packet	هریک از جریان‌های بسته‌های خام موجود در «بسته‌ی به‌تازگی کدگذاری شده»
$flow\_set_{NC}$	Set of all flows existing in newly coded packets	مجموعه کلیه جریان‌های موجود در «بسته‌ی به‌تازگی کدگذاری شده»

#### ۴-۲- مسیریابی پایه

مکانیزم عملکرد پروتکل FCAR، مشابه پروتکل معروف DSR است. به این صورت که هر زمان گره‌ای از شبکه (گره مبدأ)، قصد ارسال داده به گره‌ای دیگر (گره مقصد) داشته باشد، یک بسته‌ی درخواست مسیریابی (RREQ) را با یک شماره شناسایی مشخص، تولید می‌نماید و آن را به کلیه همسایه‌های تک گامه‌ی خود پخش فراگیر می‌کند. هر گره به محض دریافت بسته‌ی RREQ، ابتدا بررسی می‌کند که آیا مقصد بسته‌ی RREQ خودش است یا خیر.

#### ❑ در صورتی که گره دریافت‌کننده‌ی بسته‌ی RREQ، گره

مقصد نباشد؛ اگر بسته‌ی RREQ ای با همان شماره شناسایی قبلاً توسط آن گره مشاهده شده باشد، به‌منظور جلوگیری از پخش

$(Flow\_set_L)$ ، حداقل یک گره مانند  $N_1$  موجود باشد به

نحوی که:

$$N_1 \in (Downstr_{f_f}^c \cup Neigh(Downstr_{f_f}^c)), N_1 \neq C,$$

$$N_1 \in Ntv\_trns_{f_f}^c$$

این شرط بیان می‌کند که هر یک از بسته‌های خام موجود در بسته‌ی اخیراً دریافت شده، حداقل توسط یکی از گره‌های پایین‌دست، به‌صورت خام دریافت شود.

۲. به ازای هر یک از (جریان‌های متناظر با هر یک از) بسته‌های

خام موجود در «بسته‌ی داخل صف» (به ازای کلیه

$(f_f \in Flow\_set_F)$ ، حداقل یک گره مانند  $N_2$  موجود باشد

به نحوی که:

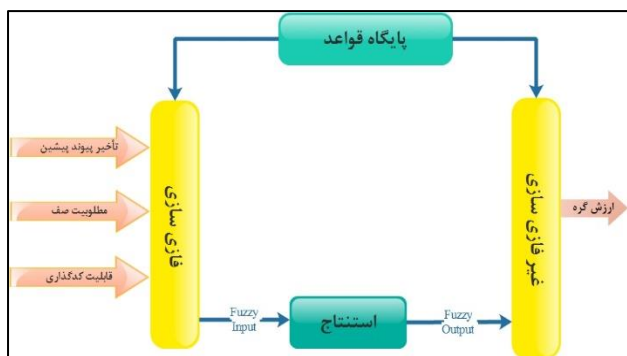
$$N_2 \in (Downstr_{f_i}^c \cup Neigh(Downstr_{f_i}^c)), N_2 \neq C,$$

$$N_2 \in Ntv\_trns_{f_i}^c$$

این شرط بیان می‌کند که هر یک از بسته‌های خام موجود در «بسته‌ی پیشین قرار گرفته در صف» حداقل توسط یکی از گره‌های پایین‌دست، به‌صورت خام دریافت شده باشد.

مجموع دو شرط ۱ و ۲، تضمین می‌کند که در صورت کدگذاری یک بسته از جریان  $f_i$  با یک بسته از جریان  $f_f$ ، کلیه بسته‌های خام موجود در بسته‌ی حاصل از کدگذاری، در لحظه‌ی رسیدن به گره مقصد یا پیش از آن، کدگشایی خواهند شد. به‌منظور ایجاد امکان کدگذاری بیش از دو بسته با یکدیگر، در صورت برقرار بودن دو شرط فوق‌الذکر برای یک «بسته‌ی اخیر» و یک «بسته‌ی پیشین»، پس از اعمال کدگذاری به دو بسته‌ی موردنظر، روند کدگذاری بسته‌ی حاصل، متوقف نخواهد شد و امکان اعمال کدگذاری بسته‌ی حاصل با دیگر بسته‌های داخل صف نیز بررسی می‌گردد.

به عبارت بهتر، پس از آنکه بسته‌ی اخیر دریافتی با یکی از بسته‌های پیشین داخل صف کدگذاری شد، بسته‌ی حاصل به‌عنوان «بسته‌ی اخیراً کدگذاری شده» در نظر گرفته می‌شود. اغلب، چنین بسته‌های می‌بایست به چند گره متمایز گام بعد گره کدگذار، تحویل داده شود. مجموعه گره‌هایی که علاوه بر گره گام بعد جریان اصلی بسته، می‌بایست بسته را دریافت نمایند، تحت عنوان «گیرنده‌های بسته‌ی اخیراً کدگذاری شده» شناخته می‌شوند. در این گام، سایر بسته‌هایی که امکان کدگذاری آن‌ها با «بسته‌ی اخیراً دریافت شده» بررسی نشده است، همچنان به‌عنوان «بسته‌ی پیشین داخل صف»، در نظر گرفته شده و با بررسی شرایط ذیل، امکان کدگذاری آن‌ها با «بسته‌ی اخیراً کدگذاری شده» بررسی می‌شود. جهت بررسی اعمال کدگذاری بیشتر با دیگر «بسته‌های پیشین داخل صف»، دو شرط ذیل نیز باید بررسی شود.



شکل ۳: شمای سیستم فازی پیشنهادی برای هر گره

### ۵-۱-۱- فازی سازی پارامترها

در سیستم فازی پیشنهادی، پارامترهای مؤثر در یافتن مسیری با کیفیت مناسب، به عنوان ورودی به سیستم فازی اعمال شده و مقدار ارزش فازی گره، به عنوان خروجی سیستم فازی، میزان مطلوبیت گره را تعیین می‌نماید. در این پژوهش از سیستم فازی ممدانی برای تصمیم‌گیری استفاده شده و برای فازی سازی و غیرفازی سازی از توابع عضویت مثلثی استفاده شده است. در ادامه، نحوه فازی سازی هر پارامتر، و محاسبه ارزش هر گره تشریح شده است.

### ۵-۱-۱- میزان تأخیر پیوند

عبارت است از مدت زمان سپری شده طی ارسال بسته از جانب گره ارسال‌کننده، تا دریافت پیام تصدیق لایه کنترل دسترسی به رسانه در همان گره. این معیار، برای پیوند میان گره موردنظر و گره‌ای که بسته RREP را به گره موردنظر ارسال می‌کند، در یک بازه زمانی، نمونه برداری شده و نسبتی از مجموع تأخیر ارسالها بر تعداد تراکنش مذکور است. در واقع، نسبت سیگنال به نویز، پهنای باند پیوند (که در استاندارد مورد استفاده بین ۱ تا ۱۱ مگابیت بر ثانیه برای پیوندهای مختلف، متفاوت است) و میزان تداخل ناشی از دیگر گره‌ها از جمله عواملی است که منجر به ایجاد این تأخیر می‌گردد و با منظور نمودن پارامتر تأخیر پیوند، در واقع کلیه این عوامل برای پیوند میان گره فعلی، و گره‌ای که بسته RREP از آن دریافت شده، پوشش داده شده است. در استاندارد IEEE802.11 حداکثر مقدار تأخیر قابل قبول لایه کنترل دسترسی به رسانه انتقال تعیین شده است. این پارامتر با استفاده از مقدار حداکثر، بر اساس رابطه (۱)، به مقداری بین ۰ تا ۱۰ نرمالیزه شده، و سپس در پنج سطح *very low*، *low*، *medium*، *high* و *very high* به شرح شکل ۴، فازی سازی می‌شود. در رابطه مذکور،  $DL(n)$  نشان‌دهنده مقدار تأخیر نرمالیزه شده پیوند موردنظر،  $d_{pl}$  نشان‌دهنده متوسط تأخیر پیوند موردنظر در بازه‌های زمانی اخیر، و  $md$  حداکثر تأخیر قابل قبول است.

$$DL(n) = \frac{d_{pl}}{md} \times 10 \quad (1)$$

سیل آسای بسته‌ها و نیز ایجاد مسیرهای تکراری، بسته‌ی RREQ دور انداخته شده و پیشرانی نمی‌شود. در غیر این صورت، آن بسته‌ی RREQ به گره‌های گام بعد، پخش فراگیر می‌شود.

### ۴- در صورتی که گره دریافت‌کننده بسته‌ی RREQ، گره

مقصد باشد؛ یک بسته‌ی RREP متناظر با آن بسته تولید نموده، مقدار فیلد معیار مسیریابی را در بسته‌ی RREP به مقدار صفر، مقداردهی اولیه نموده و بسته را در جهت عکس مسیر طی شده توسط RREQ، به سمت گره مبدأ ارسال می‌نماید.

هنگامی که بسته‌ی RREP از گره مقصد، به سمت گره مبدأ شروع به حرکت می‌کند، هر گره میانی با دریافت این بسته:

- اطلاعات موردنیاز جهت شناسایی موقعیت‌های کدگذاری را به بسته ضمیمه می‌کند. با توجه به شرایط کدگذاری تعریف شده، کافی است هر گره، آدرس گره‌های همسایه‌ی خود را در بسته‌ی RREP بنویسد. در این صورت، هر گره با دریافت بسته‌ی RREP، آدرس گره‌های پایین‌دست خود را در کنار آدرس همسایه‌های آن دریافت نموده و می‌تواند برای کدگذاری بسته‌ها تصمیم‌گیری نماید.
- با استفاده از سیستم فازی تعبیه شده در گره، میزان مطلوب بودن خود را از نظر تأخیر پیوند متصل، مطلوبیت صف و قابلیت کدگذاری محاسبه نموده و با مقدار قبلی درج شده در فیلد معیار مسیریابی بسته‌ی RREP جمع می‌نماید.

### ۵- سیستم فازی پیشنهادی

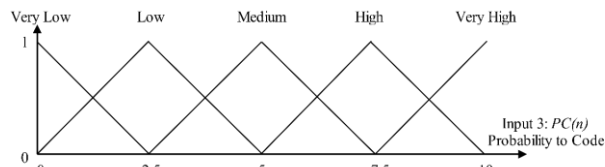
هدف بهره‌گیری از سیستم فازی، انتخاب مناسب‌ترین مسیر ارسال داده است. به کارگیری منطق فازی، انعطاف بیشتری جهت به کارگیری دانش انسانی در انتخاب مسیر مناسب ایجاد می‌نماید. شمایی از سیستم فازی پیشنهادی در شکل ۳ قابل ملاحظه است. هدف، انتخاب گره‌ها و پیوندهای مناسب است. بنابراین، از آنجاکه مسیریابی آگاه به کدگذاری است، می‌بایست «قابلیت کدگذاری گره‌ها» حتماً در نظر گرفته شود. همچنین به منظور پرهیز از ازدحام در گره‌های با قابلیت کدگذاری بالا، بارکاری گره نیز باید لحاظ شود. از طرفی، کیفیت پیوندها نیز با در نظر گرفتن تأخیر آن‌ها لحاظ می‌شود.

بنابراین، «میزان تأخیر پیوند میان گره موردنظر و گره گام قبل ارسال‌کننده بسته‌ی RREP»، «میزان مطلوب بودن وضعیت صف گره» و «قابلیت کدگذاری گره» به عنوان ورودی‌های مؤثر بر انتخاب مسیر مناسب، به سیستم فازی تحویل داده می‌شوند. در سیستم پیشنهادی، هر یک از پارامترهای فوق‌الذکر، فازی سازی شده و با توجه به پایگاه قواعد تعریف شده برای سیستم، وضعیت کلی گره مورد استنتاج قرار گرفته و ارزش فازی گره تعیین می‌شود.

کدگذاری با جریان تحت مسیریابی است که در صف گره موجود هستند و  $c_q$  نشان دهنده ظرفیت صف گره بر حسب تعداد بسته است.

$$n_{cp}^{nom} = \frac{n_{cp}}{c_q} \times 10 \quad (۳)$$

در نهایت، با ادغام نمودن هر دو عامل نرمالیزه  $n_{cp}^{norm}$  و  $d_{ld}^{norm}$  پارامتر نرمالیزه شده «قابلیت کدگذاری گره»  $PC(n)$  حاصل می شود. پارامتر  $PC(n)$  نیز مطابق شکل ۵، در پنج سطح low, very low, medium, high و very high فازی سازی می شود.



شکل ۵: فازی سازی پارامتر نرمالیزه شده قابلیت کدگذاری گره

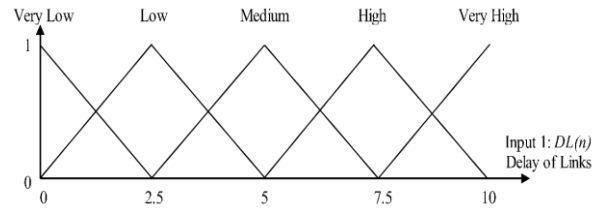
### ۳-۱-۵- میزان مطلوبیت وضعیت صف گره

این پارامتر بر اساس تعداد بسته های موجود در صف ارسال گره که هنوز به گام بعد ارسال نشده اند، سنجیده می شود. به منظور افزایش احتمال پذیرش بسته و عدم سرریز بافر، مناسب است بافر گره پر از دحام نباشد. از سوی دیگر، از آنجاکه برای ایجاد موقعیت کدگذاری، نیاز است بافر گره، حاوی بسته های واجد شرایط کدگذاری باشد، نمی توان خالی بودن صف گره و یا وجود تعداد کمی بسته در صف گره را به عنوان ایده آل ترین حالت برای وضعیت بافر گره در نظر گرفت. از این رو، وضعیت میانه (حالتی که نیمی از بافر گره، پر باشد) به عنوان مناسب ترین حالت برای بافر گره در نظر گرفته می شود؛ چراکه در این حالت، علاوه بر آنکه گره مورد نظر، پر از دحام نبوده و قادر به دریافت بسته های جدید است، احتمال اعمال کدگذاری (به دلیل وجود بسته هایی در بافر گره) نیز وجود خواهد داشت. بنابراین، میزان اختلاف میان «تعداد بسته های موجود در بافر گره» و «نیمی از ظرفیت بافر گره»، با استفاده از رابطه (۶) محاسبه و به عددی بین ۰ تا ۱۰ نرمالیزه شده و در سطح very low, low, medium, high و very high مطابق شکل ۶ فازی سازی می شود. در رابطه (۴)،  $QL(n)$  پارامتر نرمالیزه شده درجهی مطلوب بودن صف گره،  $c_q$  ظرفیت صف گره (بر حسب تعداد بسته) و  $n_{ep}$  مشخص کنندهی تعداد بسته های موجود در صف گره است.

$$QL(n) = \frac{\left| \frac{c_q}{2} - n_{ep} \right|}{c_q} \quad (۴)$$

### ۲-۵- قانون های فازی

همان طور که پیش تر مشخص شد، هریک از ۳ پارامتر ورودی سیستم فازی پیشنهادی، به ۵ سطح فازی سازی می شوند. بنابراین، تعداد کل حالت های ممکن، برابر با ۱۲۵ حالت خواهد بود. بنابراین، در هر لحظه از کار شبکه، مقادیر ورودی سیستم فازی، در تعدادی از ۱۲۵ حالت ممکن جای می گیرند. برای هر یک از این حالات، با توجه به دانش



شکل ۴: فازی سازی میزان تأخیر نرمالیزه شده پیوند گره

### ۲-۱-۵- قابلیت کدگذاری

در پروتکل FCAR، به منظور شناسایی قابلیت کدگذاری گره، از دو عامل بهره گیری می شود:

۱- تعداد کدگذاری صورت گرفته در گره

۲- تعداد بسته های قابل کدگذاری موجود در صف گره

شناسایی میزان قابلیت کدگذاری هر گره با دخیل نمودن عامل «تعداد کدگذاری های صورت گرفته در گره»، موجب می شود که در ارزیابی قابلیت کدگذاری گره، گره هایی که دارای موقعیت بهتری برای اعمال کدگذاری هستند، مطلوب تر محسوب شوند. چراکه تعداد کدگذاری انجام شدهی بیشتر برای یک گره به معنای مطلوب بودن موقعیت مکانی آن نسبت به بقیه گره ها برای ایجاد ساختار کدگذاری است. در واقع، بیشتر بودن این عامل نشان از این دارد که گره، در ناحیه ای قرار گرفته که تعداد مناسبی از گره های شبکه در حوالی آن در موقعیت مناسب جهت ایجاد ساختار کدگذاری قرار گرفته اند و مسیرهای بسیاری به سمت آن هدایت می شوند. از آنجاکه شبکه ای مانند شبکه های توری بی سیم، ایستا بوده و موقعیت گره ها ثابت هستند، می توان این عامل را به عنوان عاملی مطلوب جهت ایجاد موقعیت های کدگذاری آتی بیشتر در نظر گرفت.

تشخیص مناسب بودن موقعیت گره جهت اعمال کدگذاری، با سنجش تعداد کدگذاری صورت پذیرفته توسط آن گره صورت می پذیرد. این عامل تحت عنوان درجهی مطلوبیت موقعیت گره شناخته شده و پارامتر نرمالیزه شدهی آن که به صورت  $d_{ld}^{norm}$  نشان داده می شود، با استفاده از رابطه (۲) به عددی بین ۰ تا ۱۰ نرمالیزه می شود. در این رابطه،  $n_{dtp}$  مشخص کنندهی تعداد بسته های متمایز ارسال شده توسط گره و  $n_c$  نشان دهندهی تعداد کدگذاری صورت پذیرفته در گره است.

$$d_{ld}^{nom} = \left( 1 - \frac{|n_{dtp} - n_c|}{n_{dtp}} \right) \times 10 \quad (۲)$$

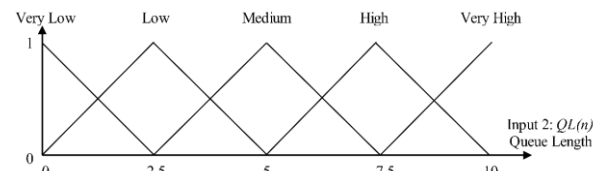
از طرفی، هر قدر تعداد بسته های قابل کدگذاری در گره، بیشتر باشد نشان از این است که گره در ترافیک مناسبی قرار دارد و به منظور ایجاد مسیرهای با امکان کدگذاری بر روی آن امکان پذیر است. به منظور فازی سازی عامل «تعداد بسته های قابل کدگذاری» ابتدا با به کارگیری رابطه (۳)، این عامل به عددی میان ۰ تا ۱۰ نرمالیزه می شود. در این رابطه،  $n_{cp}^{norm}$  نشان دهندهی تعداد بسته های قابل کدگذاری موجود در گره به صورت نرمالیزه شده،  $n_{cp}$  نشان دهندهی تعداد بسته های قابل



در این رابطه،  $n$  نشان دهنده تعداد قواعد فازی،  $Rule_i$  نشان دهنده می‌تواند باشد. به عنوان مثال، اگر برای گره‌ای، تأخیر پیوند کم باشد، اختلاف وضعیت صف با حالت ایده آل، خیلی کم باشد و قابلیت کدگذاری آن بسیار بالا باشد، چنین گره‌ای از دید دانش انسانی گره‌ای بسیار مطلوب است، بنابراین ارزش این قانون در پایگاه قواعد بسیار بالا و متناظر با  $very\ high$  خواهد بود. به عبارتی، قرار گرفتن وضعیت گره‌ای در این قانون بسیار ارزشمند خواهد بود. ارزش هر قانون به صورت کسری از عدد ۱ اعمال می‌شود. اگر وضعیت تأخیر پیوند گره، در وضعیت  $low$  قرار گیرد، دو پارامتر دیگر هر یک می‌توانند ۵ حالت داشته باشند. بنابراین در حالتی که تأخیر پیوند در سطح  $low$  باشد، ۲۵ قانون تعریف می‌شود که ۱۰ نمونه از آن در جدول (۲) نشان داده شده است. به همین صورت، ۱۱۵ قانون دیگر نیز لحاظ شده است که به دلیل تکرر، خلاصه‌سازی شده است.

۶- معیار مسیریابی

در پروتکل پیشنهادی FCAR، هر گره میزان مطلوبیت خود را از نظر «قابلیت کدگذاری»، «کیفیت پیوند میان خودش و گره‌ای که بسته‌ی RREP را از آن دریافت کرده» و نیز «میزان مطلوبیت شرایط صف گره» با استفاده از منطق فازی محاسبه می‌نماید و هنگامی که بسته‌ی RREP را دریافت نمود، ارزش فازی محاسبه‌شده‌ی خود را با مقدار قبلی موجود در فیلد معیار بسته‌ی RREP جمع نموده و نسبت به ارسال بسته‌ی RREP به گام بعد درج‌شده در آن اقدام می‌کند.



شکل ۶: سطح‌بندی پارامتر نرمالیزه شده‌ی صف گره

جدول ۲: نمونه‌ای از قوانین فازی پیشنهادی

Rule	Antecedent			Consequent
	Delay of Link $DL(n)$	Queue Length $QL(n)$	Probability to Coding $PC(n)$	Cost $C(n)$
1	Low	Very Low	Very Low	Low
2	Low	Very Low	Low	Medium
3	Low	Very Low	Medium	High
4	Low	Very Low	High	High
5	Low	Very Low	Very High	Very High
6	Low	Low	Very Low	Low
7	Low	Low	Low	Medium
8	Low	Low	Medium	Medium
9	Low	Low	High	High
10	Low	Low	Very High	Very High

۵-۳- محاسبه ارزش هر گره

بدین ترتیب، هر گره در شبکه پس از هر بازه زمانی نمونه‌برداری یک وضعیت مشخص خواهد داشت که برگرفته از سه پارامتر ذکر شده در شکل ۳ است. این ۳ پارامتر، پس از ورود به سیستم فازی و انجام عملیات فازی و تطابق با قوانین، تبدیل به خروجی سیستم فازی می‌گردند که به عنوان هزینه گره  $n$  یا همان  $NC(n)$  در نظر گرفته خواهد شد. این مقدار بر اساس رابطه‌ی معرفی شده در سیستم فازی ممدانی [۲۸] از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌گردد.

$$NC(n_j) = \frac{\sum_{i=1}^n Rule_i \times c_i}{\sum_{i=1}^n Rule_i} \quad (5)$$

۷- شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

کلید شبیه‌سازی‌های این پژوهش با استفاده از شبیه‌ساز شبکه (NS-2) انجام شده است. مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۳) به‌طور خلاصه ذکر شده‌اند. شبکه به مدت ۱۰ ثانیه شروع به کار نموده و پس از اتمام ۱۰ ثانیه، الگوریتم پیشنهادی اعمال می‌گردد. در هر شبکه، ۵۰ گره به صورت تصادفی در محیط  $800 \times 800$  مترمربع توزیع شده است. ۱۰ جفت از گره‌ها به صورت تصادفی، به عنوان مبدأ و مقصد جریان‌ها انتخاب می‌شوند. به بیان دقیق‌تر، مبدأ هر جریان، در زمانی مستقل از سایر جریان‌ها، شروع به ارسال داده به

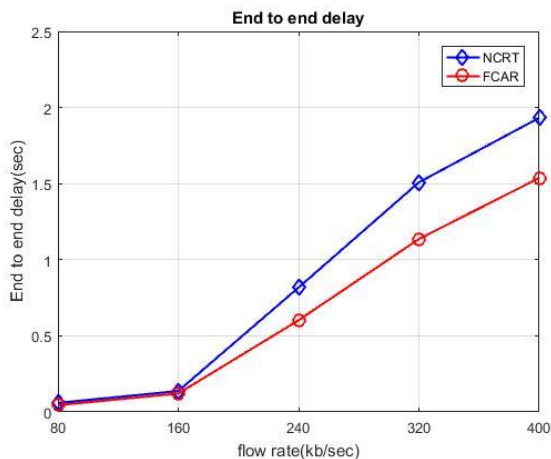
۵-۳- محاسبه ارزش هر گره

بدین ترتیب، هر گره در شبکه پس از هر بازه زمانی نمونه‌برداری یک وضعیت مشخص خواهد داشت که برگرفته از سه پارامتر ذکر شده در شکل ۳ است. این ۳ پارامتر، پس از ورود به سیستم فازی و انجام عملیات فازی و تطابق با قوانین، تبدیل به خروجی سیستم فازی می‌گردند که به عنوان هزینه گره  $n$  یا همان  $NC(n)$  در نظر گرفته خواهد شد. این مقدار بر اساس رابطه‌ی معرفی شده در سیستم فازی ممدانی [۲۸] از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌گردد.

۷- شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

کلید شبیه‌سازی‌های این پژوهش با استفاده از شبیه‌ساز شبکه (NS-2) انجام شده است. مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۳) به‌طور خلاصه ذکر شده‌اند. شبکه به مدت ۱۰ ثانیه شروع به کار نموده و پس از اتمام ۱۰ ثانیه، الگوریتم پیشنهادی اعمال می‌گردد. در هر شبکه، ۵۰ گره به صورت تصادفی در محیط  $800 \times 800$  مترمربع توزیع شده است. ۱۰ جفت از گره‌ها به صورت تصادفی، به عنوان مبدأ و مقصد جریان‌ها انتخاب می‌شوند. به بیان دقیق‌تر، مبدأ هر جریان، در زمانی مستقل از سایر جریان‌ها، شروع به ارسال داده به

میزان بهبود روش FCAR نسبت به NCRT، در جریان‌هایی با نرخ بیشتر از ۲۴۰ کیلوبیت در ثانیه و بیشتر، نمایان تر است. علت این است که با افزایش نرخ جریان، شبکه ازدحام بیشتری خواهد داشت و میزان تداخل و در نتیجه تأخیر تحمیل شده بر بسته‌های داده، بیشتر خواهد شد. در چنین شرایطی، منظور نمودن عامل «تأخیر پیوندهای طول مسیر» در پروتکل FCAR، موجب می‌شود که مسیرهای برپاشده، از نظر کیفیت پیوندها شرایط مطلوب‌تری داشته باشند. این امر موجب می‌شود که بسته‌ها تأخیر کمتری نسبت به روش NCRT متحمل شوند و احتمال از دست رفتن بسته‌ها به دلیل سپری شدن زمان انقضا کاهش یابد. از طرفی، با افزایش نرخ جریان، نسبت تحویل داده کاهش می‌یابد. چراکه با افزایش نرخ جریان، تعداد بسته‌های بیشتری وارد شبکه می‌شوند. این امر موجب می‌شود که تداخل و رقابت بیشتری در ارسال بسته‌ها به وجود آید و نسبت تحویل بسته کاهش یابد. باین‌حال، پروتکل FCAR در جریان‌های با نرخ بالا نیز عملکرد بهتری نسبت به NCRT دارد. چراکه بامنظور نمودن عامل «تأخیر پیوندهای مسیر» هنگامی که پیوند یک گره، ازدحام و تداخل بیشتری داشته باشد، ارزش فازی آن کمتر شده و شانس آن گره برای شرکت در مسیریابی کاهش می‌یابد.



شکل ۸: مقایسه متوسط تأخیر بسته در دو پروتکل NCRT و FCAR

### ۷-۲- آزمون میانگین تأخیر بسته

تأخیر بسته‌های ارسال شده در شبکه، عبارت است از مقدار زمانی که به‌طور متوسط طول می‌کشد تا یک بسته، از گره مبدأ به گره مقصد برسد. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، میانگین تأخیر انتها به انتهای بسته در روش FCAR نسبت به روش NCRT کمتر است. چراکه در پروتکل پیشنهادی FCAR، علاوه بر میزان ازدحام صف گره‌ها و میزان قابلیت کدگذاری، میزان تأخیر پیوند متصل به گره در تحویل بسته به گام بعد نیز لحاظ شده است، بنابراین، گره‌هایی که مقدار تأخیر بیشتری در پیوند خود دارا باشند، ارزش فازی کمتری خواهند داشت و شانس کمتری برای شرکت در مسیریابی خواهند یافت. در نتیجه، کیفیت پیوندهای مسیریابی انتخاب‌شده توسط پروتکل FCAR بهتر است. در جریان‌های با نرخ پایین، میزان تأخیر پیوندهای مختلف

مقصد متناظر خود می‌نماید و مدت‌زمان ارسال داده در هر یک از ۱۰ جریان نیز مستقل از دیگر جریان‌ها بوده و در حالت کلی با یکدیگر برابر نیست. نرخ هر جریان، بین ۸۰ تا ۴۰۰ کیلوبیت بر ثانیه، با فاصله‌های افزایشی ۸۰ کیلوبیت بر ثانیه، تغییر می‌کند.

### جدول ۳: پارامترهای تنظیم‌شده در شبیه‌سازی

Proposed Method	پارامترها
UDP	پروتکل انتقالی
Omni-Antenna	نوع آنتن
100s	زمان شبیه‌سازی
250m	محدوده انتقال گره
100	طول صف گره
CBR	Application
1024 byte	اندازه هر بسته
IEEE802.11b	استاندارد کنترل دسترسی به رسانه

### ۷-۱- آزمون نسبت تحویل داده در شبکه

نسبت تحویل داده در شبکه، نشان از قابلیت اطمینان روش موردنظر است، بیان‌گر این است که چند درصد از بسته‌هایی که ارسال شده‌اند، با موفقیت به مقصد می‌رسند.



شکل ۷: مقایسه نسبت تحویل بسته در دو پروتکل NCRT و FCAR

همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد، نسبت تحویل داده در پروتکل پیشنهادی FCAR، نسبت به پروتکل NCRT بهبود یافته است. علت این است که در پروتکل FCAR، با توجه به‌منظور نمودن تأخیر پیوندهای طول مسیر، مسیریابی که برای ارسال داده انتخاب می‌گردند، کیفیت بهتری (از نظر پهنای باند، نسبت سیگنال به نویز و عدم وجود تداخل همسایه‌ها) نسبت به مسیریابی انتخابی پروتکل NCRT خواهند داشت. بنابراین، احتمال رسیدن موفق بسته‌ها به مقصدشان بیشتر، و احتمال عدم از دست رفتن آن‌ها به دلیل برخورد، کمتر می‌شود. علاوه بر آن، با عبور بسته‌های داده از پیوندهایی با کیفیت بهتر، بسته‌ها تأخیر کمتری تجربه خواهند کرد و احتمال منقضی شدن زمان انقضای بسته‌ها کمتر خواهد شد. بنابراین، بسته‌های داده، با احتمال بیشتری با موفقیت به مقصد تحویل داده می‌شوند.

پروتکل FCAR، موقعیت‌های کدگذاری بیشتری ایجاد شده و گذردهی شبکه بهبود می‌یابد.

مقدار بهبود ایجاد شده توسط روش FCAR نسبت به روش NCRT در جریان‌هایی با نرخ بالاتر از ۲۴۰ کیلوبیت بر ثانیه مشهودتر است. چراکه در جریان‌هایی با نرخ‌های بالاتر، امکان ایجاد تداخل و تأخیر در ارسال و در نهایت، از دست رفتن بسته‌ها افزایش می‌یابد. در این شرایط، با منظور نمودن عامل «تأخیر پیوندها» مسیریابی که پیوندهایی با پهنای باند بیشتر، تداخل کمتر و در نهایت تأخیر کمتری دارند، در پروتکل FCAR شانس بیشتری برای انتخاب شدن خواهند داشت. به این ترتیب، احتمال از دست رفتن بسته‌ها به شدت کاهش می‌یابد و گذردهی شبکه در نتیجه‌ی آن افزایش می‌یابد.

با افزایش نرخ جریان‌های شبکه، تعداد بسته‌های موجود در شبکه در واحد زمان افزایش می‌یابد و بسته‌های بیشتری در شبکه جابه‌جا شده و توسط گره‌های شبکه (از جمله گره‌های مقصد) دریافت می‌شوند. این امر روند افزایشی گذردهی شبکه را با افزایش نرخ جریان‌ها توجیه می‌کند.

#### ۷-۴- سربار

در بررسی سربار این دو پروتکل می‌بایست به این نکته توجه شود که هر دو پروتکل NCRT و FCAR پروتکل‌هایی بر مبنای DSR هستند و حتی ساختار بسته‌های RREQ و RREP در آن‌ها کاملاً یکسان است. پس می‌بایست سربار بسته‌های کنترلی باهم مقایسه شوند. از آنجاکه این پارامتر عبارت است از نسبت تعداد بسته‌های کنترلی بر تعداد بسته‌های داده، این پارامتر را می‌توان از رابطه‌ی (۸) محاسبه نمود:

$$Overhead = \frac{\sum_{j=1}^n (RREQ_j + RREP_j + RERR_j + HELLO_j)}{\sum_{i=1}^n N_i^T} \times 100 \quad (8)$$

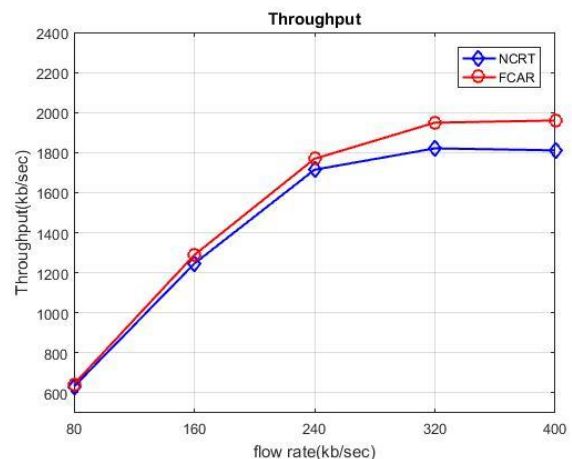
که در این رابطه،  $RREQ_j$  و  $RREP_j$  و  $RERR_j$  و  $HELLO_j$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد بسته‌های  $RREQ$  و  $RREP$  و  $RERR$  و  $HELLO$  ارسال شده توسط گره  $j$  است.  $N_i^T$  نیز نشان‌دهنده‌ی تعداد بسته‌های داده‌ی دریافت شده توسط گره  $i$  و  $n$  نشان‌دهنده‌ی تعداد کل گره‌های شبکه است. با توجه به این معیار، دو پروتکل NCRT و FCAR مقایسه شده و نمودار شکل ۱۰ حاصل شد.

نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که سربار بسته‌های کنترلی روش پیشنهادی FCAR کمتر از NCRT است. علت این است که در پروتکل FCAR، به دلیل اینکه کیفیت پیوندهای مسیر نیز در نظر گرفته شده است، مسیریابی ارسل داده مسیریابی با کیفیت بهتر هستند. به بیان بهتر، احتمال اینکه مسیر شکسته شود و نیاز به مسیریابی مجدد کمتر خواهد شد. بنابراین، تعداد بسته‌های خطای مسیر (RERR) و به دنبال آن، تعداد بسته‌های RREQ و RREP مورد نیاز جهت مسیریابی مجدد در پروتکل FCAR کمتر از پروتکل NCRT است. حال آنکه در پروتکل NCRT کیفیت پیوندها در نظر گرفته نشده است و احتمال شکسته شدن مسیر و ارسال بسته‌های خطای مسیر (RERR) بیشتر است.

اختلاف ناچیزی دارند؛ چراکه در این حالت، میزان تداخل و رقابت در پیوندها کمتر است و با در نظر نگرفتن میزان تأخیر پیوند نیز امکان یافتن مسیریابی با تأخیر کم وجود دارد. بنابراین، روش FCAR عملکرد بهتر خود را در جریان‌هایی با نرخ بیشتر از ۱۶۰ کیلوبیت بر ثانیه نمایان می‌سازد. چراکه در جریان‌هایی با این نرخ و بیشتر، میزان تداخل و از دست رفتن بسته و نیاز به ارسال مجدد، افزایش می‌یابد و FCAR با منظور نمودن عامل «تأخیر پیوند» در فرآیند مسیریابی، مسیریابی با تأخیر کمتر را انتخاب می‌کند. بدیهی است با افزایش نرخ جریان‌های شبکه، میزان تأخیر ناشی از تداخل در هر گام و نیز تأخیر ناشی از فرآیند دسترسی به رسانه انتقال، افزایش خواهد یافت. بنابراین، با افزایش نرخ جریان‌های شبکه، میزان تأخیر آنها به انتها به طور کلی افزایش می‌یابد و نمودار روند صعودی خواهد داشت.

#### ۷-۳- آزمون گذردهی شبکه

گذردهی شبکه عبارت است از تعداد بیت دریافت شده در گره‌های مقصد در واحد زمان برای کلیه جریان‌های شبکه.



شکل ۹: مقایسه گذردهی دو پروتکل NCRT و FCAR

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، گذردهی روش پیشنهادی FCAR نسبت به روش NCRT بیشتر است. علت این است که در پروتکل NCRT، برای انتخاب مسیر، تنها موجود بودن تعداد بسته‌های قابل کدگذاری و میزان ازدحام صف گره، مورد نظر قرار گرفته است؛ در حالی که در روش FCAR، علاوه بر این دو معیار، میزان کیفیت پیوندهای مسیر نیز مدنظر قرار گرفته است. بنابراین، در پروتکل FCAR، وجود پیوندهای مناسب‌تر و با کیفیت بهتر (از نظر پهنای باند، تداخل و سایر عوامل دخیل در تأخیر پیوند)، ارزش فازی گره‌های طول مسیر را افزایش داده و شانس انتخاب مسیریابی با کیفیت بهتر، را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه وجود پیوندهایی با پهنای باند و کیفیت بهتر، ارتباط مستقیمی با گذردهی شبکه دارد، این امر موجب می‌شود علاوه بر این‌که بسته‌های داده با عبور از مسیریابی دارای موقعیت کدگذاری باهم ترکیب می‌گردند، بسته‌های حاصل از کدگذاری و نیز بسته‌های فاقد کدگذاری، با سرعت بیشتری ارسال گردند و نهایتاً گذردهی شبکه بهبود یابد. علاوه بر آن، با توجه به اصلاح شرایط کدگذاری IGCC در

سیستم فازی داده می‌شوند. به منظور لحاظ نمودن تعداد عملیات سیستم فازی نیز باید توجه شود که هر یک از ۳ پارامتر ورودی سیستم فازی پیشنهادی، به ۵ سطح فازی سازی می‌شوند. بنابراین، تعداد کل حالت‌های ممکن، برابر با ۱۲۵ حالت خواهد بود. بنابراین، در هر لحظه از کار شبکه، مقادیر ورودی سیستم فازی، در تعدادی از ۱۲۵ حالت ممکن جای می‌گیرند. به عبارت دیگر در بدترین حالت،  $125 \times p \times f \times d$  عمل لازم خواهد بود تا تصمیم مناسب برای تعیین ارزش گره استخراج شود. در طول محاسبات نیز حلقه‌های تکراری که عامل توان دوم یا توان سوم در محاسبات ایجاد کنند وجود ندارد. اگر فرض شود که در یک مسیر به تعداد  $N$  گره وجود دارد، در بدترین حالت تعداد عملیات لازم برای تعیین گره‌ها برابر با  $125 \times p \times f \times d \times N$  خواهد شد که یک پیچیدگی زمانی به صورت چند جمله‌ای است.

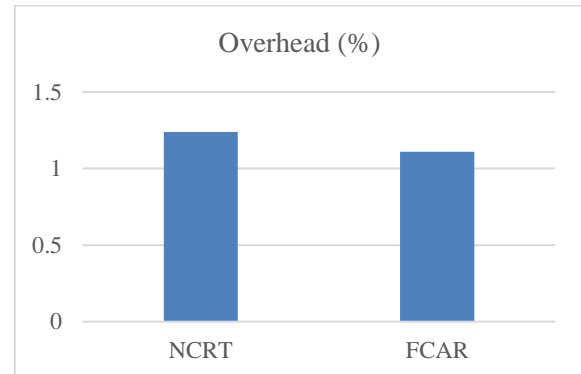
به عبارتی  $O(FCAR) = 125 \times O(NCRT)$ . ملاحظه می‌شود که پیچیدگی زمانی الگوریتم پیشنهادی FCAR، هم‌کلاس با پیچیدگی زمانی الگوریتم NCRT است. فلذا این پیچیدگی زمانی که در بدترین حالت محاسبه شده است، بسیار مطلوب است.

البته توجه شود که این مقدار عملیات در بدترین حالت است و مقدار واقعی محسوب نمی‌شود. در بسیاری از موارد لازم نیست که همه مسیرها برای یک جریان بررسی شوند. زیرا جریان موردنظر از بسیاری از مسیرهای شبکه عبور نخواهد کرد. فلذا میزان پیچیدگی در عمل بسیار کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر پارامتر  $p$  قابل کاهش به یک مقدار ثابت خواهد بود. همچنین چون همه‌ی بسته‌ها در همه‌ی جریان‌ها با یکدیگر کدگذاری نمی‌شوند و فقط بسته‌های ۲ یا تعداد محدودی جریان، با یکدیگر کدگذاری می‌شوند پس عملاً پارامتر ورودی  $f$  نیز قابل کاهش به یک عدد ثابت خواهد بود.

## ۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن معرفی تکنیک کدگذاری شبکه، مفهوم مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه معرفی شد. جهت رفع نقاط ضعف الگوریتم‌های مسیریابی آگاه به کدگذاری، الگوریتم پیشنهادی FCAR بر اساس یک مدل فازی ارائه شده است. در الگوریتم FCAR، در سیستم فازی پیشنهادی تعبیه‌شده در هر گره، چند عامل مؤثر بر بهبود عملکرد شبکه به‌عنوان ورودی به سیستم فازی، اعمال شده و میزان مطلوبیت گره، حاصل می‌شود. علاوه بر آن، با اصلاح شرایط کدگذاری پیشین، موقعیت‌های کدگذاری بیشتری برای شبکه فراهم شده است. در واقع در روش پیشنهادی این مقاله، میان کیفیت مسیر و میزان کدگذاری آن، مصالحه‌ای صورت گرفته است که در نهایت، منجر به بهبود عملکرد پارامترهای حیاتی در شبکه توری بی‌سیم (نظیر نسبت تحویل داده، تأخیر و گذردهی) می‌شود. بررسی و مقایسه‌ی پیچیدگی زمانی الگوریتم پیشنهادی نیز بیان‌گر این است که روش پیشنهادی FCAR از نظر پیچیدگی زمانی در وضعیتی بسیار مناسب، و هم‌کلاس با الگوریتم پیشین (NCRT) است.

بدیهی است در صورت شکسته شدن مسیر، نیاز به تکرار روند مسیریابی با استفاده از بسته‌های RREQ و RREP است. بنابراین، در پروتکل NCRT شکسته شدن مسیر بیشتر رخ می‌دهد، و این امر منجر به افزایش تعداد بسته‌های RREQ و RREP و RERR موردنیاز خواهد شد.



شکل ۱۰: مقایسه سربار بسته‌های کنترلی در دو پروتکل NCRT و FCAR

## ۸- تحلیل پیچیدگی زمانی

جهت بررسی پیچیدگی زمانی الگوریتم‌های NCRT و FCAR، می‌بایست پیچیدگی ناشی از هر دو قسمت الگوریتم منظور گردد: پیچیدگی ناشی از «بررسی شرایط کدگذاری» و پیچیدگی ناشی از «الگوریتم مسیریابی».

### ۸-۱- پیچیدگی شرایط کدگذاری

این پیچیدگی زمانی تابعی از تعداد مسیرها ( $p$ )، تعداد جریان‌ها ( $f$ ) و تعداد بسته‌های هر جریان ( $d$ ) است. در بدترین حالت پیچیدگی زمانی باید هر مسیر نسبت به هر جریان و بسته‌های آن بررسی شود. این موضوع می‌تواند پیچیدگی زمانی  $p \times f \times d$  را به همراه داشته باشد. از آنجاکه شرایط کدگذاری هر دو الگوریتم NCRT و FCAR از حیث بررسی مسیرها، جریان‌ها و بسته‌ها با یکدیگر مشابه است، این قسمت از پیچیدگی برای هر دو الگوریتم NCRT و FCAR تقریباً یکسان خواهد بود.

### ۸-۲- پیچیدگی الگوریتم مسیریابی

در الگوریتم NCRT، به منظور یافتن مسیر مناسب ارسال داده‌ها، برای هر مسیری مانند  $p_i$  مقدار  $GLARM_{p_i}$  بر اساس یک رابطه‌ی ریاضی، محاسبه می‌شود. بنابراین، اگر  $N$  گره در طول هر مسیر وجود داشته باشد، پیچیدگی ناشی از بررسی شرایط کدگذاری در کنار به‌کارگیری الگوریتم مسیریابی پیشنهادشده در روش NCRT برابر با،  $N \times d \times f \times p$  خواهد شد که از نوع چند جمله‌ای است.

در الگوریتم پیشنهادی FCAR، سه عامل «میزان تأخیر پیوند»، «میزان مطلوب بودن و وضعیت صف گره» و «قابلیت کدگذاری گره» به‌عنوان پارامترهای ورودی مؤثر بر انتخاب مسیر مناسب، به

- [10] M. A. Iqbal, B. Dai, B. Huang, A. Hassan, and S. Yu, "Survey of network coding-aware routing protocols in wireless networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, pp. 1956-1970, 2011.
- [11] D. S. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," *Wireless networks*, vol. 11, pp. 419-434, 2005.
- [12] K. Jain, J. Padhye, V. N. Padmanabhan, and L. Qiu, "Impact of interference on multi-hop wireless network performance," *Wireless networks*, vol. 11, pp. 471-487, 2005.
- [۱۳] معصومه واعظی و محمدعلی جبرئیل جمالی، "پروتکل مسیریابی جدید مبتنی بر کیفیت خدمات در شبکه های حسگر بیسیم با تحلیل سلسله مراتبی"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحه ۳۵۵، تابستان ۱۳۹۵.
- [۱۴] محمود پرنده و سیده‌ادی اقدسی علمداری، "ارائه پروتکل ارسال داده انرژی کارا مبتنی بر موقعیت برای شبکه های حسگر بصری" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحه ۲۹، بهار ۱۳۹۶.
- [15] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow," *IEEE Transactions on information theory*, vol. 46, pp. 1204-1216, 2000.
- [16] Y.-P. Hsu, N. Abedini, N. Gautam, A. Sprintson, and S. Shakkottai, "Opportunities for network coding: To wait or not to wait," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, pp. 1876-1889, 2015.
- [17] M. H. Amerimehr and F. Ashtiani, "Delay and throughput analysis of a two-way opportunistic network coding-based relay network," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, pp. 2863-2873, 2014.
- [18] K.-H. Lee, S. Cho, and J.-H. Kim, "Performance evaluation of network coding in IEEE 802.11 wireless ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 16, pp. 131-141, 2014.
- [19] S. Yang, J. Wu, and M. Cardei, "Efficient broadcast in MANETs using network coding and directional antennas," in *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 1499-1507, 2008.
- [20] J. Chen, K. He, R. Du, M. Zheng, Y. Xiang, and Q. Yuan, "Dominating set and network coding-based routing in wireless mesh networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 26, pp. 423-433, 2015.
- [21] J. Le, J. C. Lui, and D.-M. Chiu, "DCAR: Distributed coding-aware routing in wireless networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, pp. 596-608, 2010.
- [22] B. Guo, H. Li, C. Zhou, and Y. Cheng, "Analysis of general network coding conditions and design of a free-ride-oriented routing metric," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, pp. 1714-1727, 2011.
- [23] G.-X. Kok, C.-O. Chow, and H. Ishii, "Improving network coding in wireless ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 33, pp. 16-34, 2015.
- [24] L. F. Xie, P. H. J. Chong, I. W.-H. Ho, and H. C. B. Chan, "Virtual overhearing: An effective way to increase network coding opportunities in wireless ad-hoc networks," *Computer Networks*, vol. 105, pp. 111-123, 2016.
- [25] Z. Mei and Z. Yang, "Active intersession network coding-aware routing," *Wireless Networks*, vol. 23, pp. 1161-1168, 2017.

## ۱۰- پیشنهاد پژوهش‌های آتی

در این پژوهش، رویکرد مسیریابی آگاه به کدگذاری، با به‌کارگیری یک روش فازی بهبود یافت. حال این مسئله قابل‌طرح است که کدگذاری شبکه چه تأثیری بر سایر ویژگی‌های توپولوژی شبکه مثلاً تعداد پیوندهای مصرفی و نیز مقدار سربار شبکه دارد. بررسی این دو مسئله، به دو پژوهش بعدی واگذار می‌شود. به بیان بهتر، در پژوهش‌های آینده: ۱- باید بررسی شود که استفاده از پروتکل پیشنهادی در مقایسه با روش‌های پیشین، چه تأثیری بر روی تعداد پیوند (بال) مصرفی دارد. در صورت استفاده از تعداد پیوند بیشتر، انتخاب مسیرها باید به نحوی اصلاح شود تا تعداد پیوندهای دخیل در ارسال داده‌ها نیز در مسیرها کاهش یابد. ۲- همچنین باید بررسی شود مسیریابی فاقد کدگذاری و مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه چه تأثیری بر روی سربار شبکه دارند. اگر مسیریابی آگاه به کدگذاری شبکه، سربار را افزایش دهد، راهکاری به‌منظور کاهش سربار، در الگوریتم پیشنهادی تعبیه شود.

## مراجع

- [1] A. Ramamoorthy, J. Shi, and R. D. Wesel, "On the capacity of network coding for random networks," *IEEE transactions on information theory*, vol. 51, pp. 2878-2885, 2005.
- [2] P. A. Chou, Y. Wu, and K. Jain, "Practical network coding," in *Proceedings of the annual Allerton conference on communication control and computing*, pp. 40-49, 2003.
- [3] N. d. S. Ribeiro Júnior, R. C. Tavares, M. A. M. Vieira, L. F. M. Vieira, and O. Gnawali, "CodeDrip: Improving data dissemination for wireless sensor networks with network coding," *Ad Hoc Networks*, vol. 54, pp. 42-52, 2017.
- [4] J. Le, J. C. Lui, and D.-M. Chiu, "How many packets can we encode?-an analysis of practical wireless network coding," in *INFOCOM 2008. The 27th conference on computer communications. IEEE*, pp. 371-375, 2008.
- [5] C. Fragouli, J. Widmer, and J.-Y. Le Boudec, "Efficient broadcasting using network coding," *IEEE/ACM transactions on Networking*, vol. 16, pp. 450-463, 2008.
- [6] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Médard, and J. Crowcroft, "XORs in the air: Practical wireless network coding," in *ACM SIGCOMM computer communication review*, pp. 243-254, 2006.
- [7] J. Wang, J. Wang, K. Lu, Y. Qian, B. Xiao, and N. Gu, "Optimal design of linear network coding for information theoretically secure unicast," in *INFOCOM*, pp. 757-765, 2011.
- [8] J. Zhang, P. Fan, and K. B. Letaief, "Network Coding for Efficient Multicast Routing in Wireless Ad-hoc Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 56, pp. 598-607, 2008.
- [9] I. F. Akyildiz and X. Wang, "A survey on wireless mesh networks," *IEEE Communications magazine*, vol. 43, pp. 23-30, 2005.

- [27] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Broch, "DSR: the dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks," *Ad hoc networking*, p. 139-172, 2006.
- [28] D. T. Pham and M. Castellani, "Action aggregation and defuzzification in Mamdani-type fuzzy systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 216, pp. 747-759, 2002.
- [26] L. Hai, J. Wang, P. Wang, H. Wang, and T. Yang, "High-Throughput Network Coding Aware Routing in Time-Varying Multihop Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, pp. 6299-6309, 2017.

زیرنویسها:

- <sup>1</sup> Throughput
- <sup>2</sup> Robustness
- <sup>3</sup> Native
- <sup>4</sup> Random Linear Network Coding
- <sup>5</sup> Multicast session
- <sup>6</sup> Multiple unicast sessions
- <sup>7</sup> Wireless Mesh Networks
- <sup>8</sup> Multi-hop
- <sup>9</sup> Time-slot
- <sup>10</sup> Medium Access Control
- <sup>11</sup> Overhear
- <sup>12</sup> Expected number of Transmissions
- <sup>13</sup> Fuzzy-based Coding Aware Routing
- <sup>14</sup> Mobile Ad-hoc NETWORKS
- <sup>15</sup> CDS-based and Flow-oriented Coding-aware Routing
- <sup>16</sup> Distributed Coding-Aware Routing
- <sup>17</sup> Improved Generalized Coding Conditions
- <sup>18</sup> Coding and Load Aware Routing Metric
- <sup>19</sup> Network Coding Routing
- <sup>20</sup> Dynamic Source Routing