ENCODE: an Efficient Framework for using Network Coding in Multi-hop Wireless Networks

Nastooh Taheri Javan*

Computer Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN
E-mails: nastooh@eng.ikiu.ac.ir

Short Abstract
Network coding is all about combining a variety of packets and forwarding as much packets as possible in each transmission operation. The network coding technique improves the throughput efficiency of multi-hop wireless networks by taking advantage of the broadcast nature of wireless channels. Most previous studies in wireless multi-hop networks, were foucesed on improving network coding gain as the most important parameter, while if some decision rules in the network nodes were modified, the overall performance of network coding technique will improve. In this paper the two aforementioned approaches, ***To Overhear or Not to Overhear*** and ***To Send or Not to send*** were combined together to propuse a new efficient framework. In particular, all network nodes when act in the coder role, use the *To Send or Not to Send* decision rule and when they operate in the decoder role, use the *To Overhear or Not to Overhear* decision rule. We called this framework ***ENCODE*** and we compared it with COPE as the reference framework in wireless multi-hop networks.

Keywords
Network Coding, Coding Gain, Multi-hp Wireless Networks, Optimal Stopping Theory, SMDP.

1- Short Introduction

In this research, by modifying two sensitive decision-making approaches in multi-hop wireless networks, one in coder nodes and the other in decoder nodes, we have created an effective framework for using network coding in these networks. In the first decision-making approach (in coder nodes) using optimal stopping theory, nodes try to find the best moment to send packets; Because by postponing the transmissions, the nodes can increase the chance of finding better patterns for coding and thus increasing the coding gain. This approach is actually a trade-off between coding gane and end-to-end delay. In the second decision-making approach (in decoder nodes), by using SMDP and reinforcement learning, the nodes learn over time which is the best? 1) turning off the radio madule in order to conserve energy, or staying awake to increase the coding opportunities. In the proposed framework, named ENCODE, network nodes simultaneously use these two decision-making approaches.

2- Proposed Work and Methodology

In many inter-flow network coding schemes nodes are encouraged to overhear neighbour's traffic in order to improve coding opportunities at the transmitter nodes. In the first approach, we formulate network coding aware sleep/wakeup scheduling as a semi Markov decision process (SMDP) that leads to an optimal node operation. In the proposed solution for SMDP, the network nodes learn when to switch off their transceiver in order to conserve energy and when to stay awake to overhear some useful packets. One of the main challenges here is the delay in obtaining reward signals by nodes. We employ a modified Reinforcement Learning (RL) method based on continuous-time Q-learning to overcome this challenge in the learning process.
On the other hand, there are some scenarios where the coding cannot be exploited due to the stochastic nature of the packet arrival process in the network. In these cases, the coding node faces two critical choices: forwarding the packet towards the destination without coding, thereby sacrificing the advantage of network coding, or, waiting for a while until a coding opportunity arises for the packets. In the second approach, we address this sequential decision making problem by using the solid framework of optimal stopping theory, and derive the optimal stopping rule for the coding node to choose the optimal action to take, i.e. to wait for more coding opportunity or to stop immediately. In this research, the two approaches, were combined together to propuse ENCODE, a new efficient framework for using network coding in multi-hp wireless networks.

3- Conclusion

The mission of this paper is to provide a comprehensive and efficient framework for using network coding in multi-hop wireless networks based on the combination and combined use of two decision-making approaches: "to send or not to send" and "to overhear or not to overhear". For this combination, the system model was redefined and the impact of the two approaches on each other's performance was evaluated precisely. Finally, the proposed ENCODE framework was compared with the COPE framework (as a reference model) and the advantages and disadvantages of each were obtained.

4- References

[1] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard and J. Crowcroft, **"XORs in the air: practical wireless network coding,"** *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 3, p. 497–510, 2008.

[2] Nastooh Taheri Javan, Mehdi Dehghan and Masoud Sabaei, **"To Overhear or Not to Overhear: A Dilemma between Network Coding Gain and Energy Consumption in Multi-hop Wireless Networks,"** *Wireless Networks*, vol. 25, pp. 4097-4113, 2019.

[3] Nastooh Taheri Javan, Masoud Sabaei and Mehdi Dehghan, **"To Send or Not to Send: An Optimal Stopping Approach to Network Coding in Wireless Multihop Networks,"** *International Journal of Communication Systems (IJCS)*, Vol. 31, no. 2, 2018.

ENCODE: یک چارچوب کارآمد جهت استفاده از کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی

نستوه طاهری جوان
استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

چکیده
ماهیت همه‌پخشیِ رسانهٔ انتقال موجب محبوبیت کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم شده است. در این مقاله به کمک اصلاحِ توأمانِ دو رویکرد تصمیم‌گیری حساس در شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی، یکی در گره‌های کدگذار و دیگری در گره‌های کدگشا، یک چهارچوب کارآ برای استفاده از کدبندی شبکه در این شبکه‌ها با عنوان ENCODE ارائه شده‌است. در اولین رویکرد در گره‌های کدگذار با استفاده از مدلسازیِ مساله توسط نظریهٔ توقف بهینه، گره‌ها سعی دارند بهترین لحظهٔ ارسالِ بسته‌ها را بیابند؛ زیرا گره‌ها با به تاخیر انداختن ارسال‌ها می‌توانند شانس یافتن الگوهای بهتر برای کدبندی را افزایش دهند. این رویکرد یک مصالحه بین بهرهٔ کدبندی و تاخیر انتها-به-انتهاست. در دومین رویکرد در گره‌های کدگشا، با کمک مدلسازیِ مساله در قالب فرآیند تصمیم‌گیری شبه مارکفی و با استفاده از یادگیری تقویتی، گره ها در طول زمان فرامی‌گیرند که در چه زمان بهتر است جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی واحد رادیویی خود را خاموش کرده و به خواب بروند و در چه زمان بهتر است جهت افزایش فرصت‌های کدبندی بیدار مانده و به شنود ترافیک همسایه‌ها بپردازند. این رویکرد یک مصالحه بین بهرهٔ کدبندی و مصرف انرژی است. در چهارچوب پیشنهادی، گره‌های شبکه به صورت توأمان از این دو رویکرد تصمیم‌گیری استفاده می‌کنند، به این ترتیب که هنگام ارسال داده (در نقش گره‌های کدگذار) از رویکرد تصمیم‌گیری اول و در سایر بازه‌ها (در نقش گرهٔ کدگشا) از رویکرد تصمیم‌گیری دوم استفاده می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند چهارچوب پیشنهادی در مقایسه با سایر رویکردهای موجود بهبودهای قابل توجهی در کارآیی شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی ایجاد می‌کند.

کلمات کلیدی
کدبندی شبکه، شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی، بهرهٔ کدبندی، نظریهٔ توقف بهینه، فرآیند تصمیم‌گیری شبه مارکفی.

نام نویسنده مسئول: دکتر نستوه طاهری جوان
ایمیل نویسنده مسئول: nastooh@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله:
تاریخ(های) اصلاح مقاله:
تاریخ پذیرش مقاله:

۱- مقدمه

اندکی پس از ارائهٔ نظریهٔ کدبندی شبکه برای کاربرد چندپخشی در شبکه‌های سیمی [۱]، طیِ تحقیقات متعددی مشخص گردید با توجه به ماهیت همه پخشیِ رسانهٔ انتقال در شبکه‌های بی‌سیم، کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم به افزایش کارآیی شبکه کمک شایانی می‌کند [۲]. از مهم‌ترین مزیت-های استفاده از کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم می‌توان به افزایش تحمل-پذیری در برابر خرابی و از بین رفته بسته‌ها، افزایش نرخ گذردهی و کاهش مصرف انرژی (به دلیل کاهش تعداد ارسال‌ها) اشاره کرد. کلید افزایش کارآییِ استفاده از کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم، سعی در بهبود بهرهٔ کدبندی[1] است. در اینجا منظور از بهرهٔ کدبندی شبکه عبارت است از: «نسبتِ تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای ارسال تعداد مشخصی بسته بدون استفاده از کدبندی شبکه، به تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای همان تعداد بسته و با استفاده از کدبندی شبکه» [۳]؛ این مقدار همواره بزرگ‌تر و یا مساوی با یک است.

با مرور پژوهش‌های پیشین در می‌یابیم بسیاری از پیاده سازی‌های موجود از استفادهٔ کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی، تمرکز خود را بطور کامل بر روی افزایش بهرهٔ کدبندی جهت بهبود کارآیی کدبندی شبکه گذاشته-اند[۴]، به گونه‌ای که در عمل دیگر مولفه‌های کارآیی در این میان قربانی می-شوند[۵]؛ در صورتی‌که ما معتقدیم می‌توان با اصلاح برخی از روال‌های تصمیم-گیری در گره‌ها، یک تعادل منطقی بین مولفه‌های کارآیی هنگام استفاده از کدبندی شبکه برقرار کرد. هدف کلی در این پژوهش، بهبود عملکرد کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی از طریق اصلاح فرآیندهای تصمیم‌گیری در گره‌ها است. برای نیل به این هدف در این مقاله دو رویکرد مهم به صورت توأمان در نظر گرفته شده است؛ در رویکرد اول تمرکز بر روی روال تصمیم‌گیری در گره‌های فرستندهٔ بسته‌های کدشده (گره‌های کدگذار) است و در رویکرد دوم با تامل بر روالِ تصمیم‌گیری در گره‌های گیرندهٔ بسته‌های کدشده (گره‌های کدگشا) سعی در بهبود رَوَندِ تصمیم‌گیری در این گره‌ها است. با استفادهٔ توامانِ گره‌های شبکه از این دو رویکرد، چهارچوب پیشنهادی با عنوان *ENCODE*[2] شکل می‌گیرد که در آن گره‌ها هنگامی که در موقعیت ارسال داده هستند، بر اساس فرآیند اول تصمیم‌گیری می‌کنند و در مابقی زمان‌ها از فرآیند دوم تصمیم‌گیری استفاده خواهند کرد.

در اولین رویکرد تصمیم‌گیری که ما آن را در یکی از پژوهش‌های پیشین *To Send or Not to Send* نام‌گذاری کردیم[۶]، گره‌ها در عملیات کدگذاری، سعی دارند بهترین تصمیم را برای انتخاب درجهٔ کدبندی بسته‌های ارسالی بگیرند. در اینجا منظور از درجهٔ کدبندی یک بستهٔ کد شده، تعدادِ بسته‌های خالصی است که با هم ترکیب شده‌اند. در این مساله هنگامی که گرهٔ کدگذار تصمیم به ارسال یک بسته می‌گیرد، باید بهترین الگوی کدبندی را برای آن انتخاب کند، اما گرهٔ کدگذار می‌داند هرچقدر ارسال یک بسته را به تعویق اندازد، این احتمال وجود دارد که با رسیدنِ گزارش‌های بسته‌های موجود در حافظهٔ همسایه‌ها، گره بتواند الگوی بهتری برای کدبندی انتخاب کرده و تعداد ارسال‌ها را بیش از پیش کاهش دهد. اما به تعویق انداختن تعمدیِ ارسال‌ها به

[1] Coding Gain

[2] Efficent Network CODing

معنای افزایش تاخیر انتها-به-انتها در شبکه است. گره‌ها در این رویکرد به کمک مدلسازیِ این روال تصمیم‌گیری با استفاده از نظریهٔ توقف بهینه [۷] بهترین زمان ارسال برای یک بسته را پیدا خواهند کرد.

در دومین رویکرد تصمیم‌گیری که ما آن را در یکی از پژوهش‌های پیشین *To Overhear or Not to Overhear* نامگذاری کردیم [۸]، گره‌های شبکه سعی دارند به کمک یک فرآیندِ یادگیری، بهترین تصمیم برای بیدار ماندن (و شنود بسته‌های جدید) و یا خوابیدن (و ذخیره کردن انرژی) را اتخاذ نمایند. یکی از مسائل مهم در استفاده از کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم این است که هر چه یک گرهٔ عادی بیشتر بسته‌های دیگران را شنود کرده و این بسته ها را در حافظهٔ خود نگه داشته و گزارش آنها را به اطلاع همسایه‌های خود برساند، به بهبود بهرهٔ کدبندی در گره‌های همسایه کمک بیشتری خواهد کرد! این امر به قدری در بهبود بهرهٔ کدبندی در شبکه‌های بی‌سیم کمک می‌کند که در عمدهٔ پیاده سازی‌ها، همهٔ گره‌ها در تمام زمان بیکاریِ خود، در حال شنود بسته‌های در حال تبادل مابین همسایه‌های خود هستند و نام این عمل را Overhearing گذاشته اند [۳]. در این رویکرد از پژوهش ما، گره‌ها به کمک مدلسازیِ مساله با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری شبه مارکفی [۹] و سپس حلِ آن به کمک یادگیری تقویتی، سعی دارند در طول زمان الگوی مناسبی برای خواب و بیدار خود در زمان بیکاری بر اساس مصالحه بین بهرهٔ کدبندی و مصرف انرژی به‌دست آورند.

در مقالهٔ حاضر و به جهت روشن شدنِ اهمیت هر رویکرد در مقایسه با رویکرد دیگر از یکسو و روشن شدن تاثیر دو رویکرد بر روی یکدیگر از سوی دیگر، تغییراتی در مدل سیستم اعمال می‌کنیم تا بتوانیم هر دو رویکرد را توأمان در گره‌های شبکه پیاده‌سازی کنیم. برای ارزیابیِ هرچه بهتر، ابتدا به طور دقیق تاثیر فرآیند تصمیم‌گیریِ اول را بر روی کارآییِ فرآیند تصمیم گیریِ دوم بررسی می‌کنیم، سپس به طور عکس، تاثیر فرآیند تصمیم گیری دوم را بر فرآیند اول بررسی خواهیم کرد و در انتها استفادهٔ توأمانِ هر دو فرآیند با یکدیگر را ارزیابی خواهیم کرد تا بتوانیم یک چهارچوب جامع برای افزایش کارآییِ استفاده از کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی ارائه دهیم. شایان ذکر است در این پژوهش چهار معیارِ اصلی به عنوانِ معیارهای ارزیابیِ کارآییِ کدبندی شبکه در نظر گرفته شده‌اند؛ شاملِ *بهرهٔ کدبندی*، *تاخیر انتها به انتها*، توان *گذردهی* و *میزان مصرف انرژی*.

رئوس نوآوری‌های ارائه شده در این مقاله به قرار زیرند:

- ارزیابیِ تاثیر دو رویکرد تصمیم‌گیری بر روی کارآییِ یکدیگر به طور مجزا.
- اصلاح مدل سیستم جهت پیاده سازیِ توأمانِ دو رویکرد تصمیم‌گیری در گره‌های شبکه.
- ارائهٔ یک چهارچوب یکپارچه و کارآ با عنوان ENCODE جهت استفاده از کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی و مقایسهٔ کارآیی آن با چهارچوب‌های محبوب موجود.

در ادامه این مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده‌است. در بخش دوم تحقیقات مرتبط بررسی خواهند شد. بخش سوم این مقاله به تشریح رویکرد اولِ تصمیم گیری در گره‌های کدگذار و بخش چهارم به رویکرد دومِ تصمیم‌گیری در گره‌های کدگشا می‌پردازد. در بخش پنجم مدل سیستم و مفروضات توصیف می‌شوند و نتایج عددی در فصل ششم تشریح شده‌اند. در انتها و در بخش هفتم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از این پژوهش آمده است.

۲- پژوهش‌های مرتبط

پر استنادترین پیاده‌سازی در حیطهٔ کاربرد کدبندی شبکهٔ بین جریانی در شبکه‌های بی‌سیم، COPE است [۳]. ایدهٔ COPE از سه فاز اصلی تشکیل شده است. شنود فرصت‌طلبانه: هر گره تمام بسته‌های ارسال‌شده در محیط اطرافش را شنود کرده و برای مدت محدودی در حافظه نگه می‌دارد. کدگذاری فرصت‌طلبانه: در این فاز گرهٔ کدگذار از بین گزینه‌های متعدد برای کدبندی، سعی دارد بهترین گزینه را به گونه‌ای انتخاب کند که بیش‌ترین تعداد بسته‌ها را در قالب یک بستهٔ کد شده ارسال کند. یادگیری وضعیت همسایه‌ها: هر گره باید وضعیت بافر همسایه‌های خود را بداند، به همین دلیل گره‌ها موظف هستند گزارش دریافت خود را برای همسایه‌ها ارسال کنند؛ از سوی دیگر گره‌ها پس از دریافت گزارش‌های دریافت از جانب همسایه‌های خود، می‌توانند در فاز کدگذاری تصمیم بهتری برای کدبندی بسته‌ها اتخاذ کنند.

۲- ۱- پژوهش های مرتبط با تصمیم‌گیری در گره‌های کدگذار

برخی از پژوهش‌های اخیر در حیطهٔ استفاده از کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم بر روی این مساله متمرکز هستند که آیا بسته‌هایی که در گره‌های میانی فرصت کدبندی مناسبی ندارند را می‌توان قدری متوقف کرد یا خیر؟ اما عمدهٔ این تحقیقات فرض‌های بسیار محدود کننده‌ای برای این مساله در نظر گرفته‌اند. مهم‌ترین فرضِ محدود کننده‌ای که در این پژوهش‌ها به چشم می‌خورد استفاده از سناریوی *هم‌مسیریِ معکوس*[3] است. در این مدل دو جریانِ خاص دقیقاً در خلاف جهت یکدیگر در گرهٔ میانیِ مدنظر برقرار هستند و این گره سعی می‌کند بسته‌های این دو جریان را باهم کد کرده و سپس ارسال کند.

در [۱۰] مسالهٔ مدت زمان نگه‌داشتن بسته‌ها در گره‌های کد گذار به کمک زنجیرهٔ مارکف و مدل پنهان مارکف در سناریوی هم‌مسیریِ معکوس مدل شده است. در [۱۱] همین سناریو به صورت یک فرآیند تصمیم مارکفی مدل شده و در نهایت به کمک برنامه‌سازی پویای تصادفی یک راه‌کار برای آن ارائه شده است. در [۱۲] یک راه‌کار در سناریوی هم‌مسیریِ معکوس به کمک روشِ Primal-dual برای کمینه کردن هزینهٔ کلیِ سیستم شامل تاخیر و تعداد ارسال‌ها ارائه شده‌است. در [۱۳] نویسندگان سناریوی هم‌مسیریِ معکوس را به صورت یک زنجیرهٔ مارکف زمان پیوسته مدل کرده اند و نشان داده‌اند این شبکه ها دقیقاً متناظر با مسالهٔ مشتریانِ مثبت-منفی هستند. در [۱۴] تمرکز نویسندگان بر روی هزینهٔ ارسال‌ها و تاخیر در سناریوی هم‌مسیریِ معکوس گذاشته شده‌است و این سناریو به صورت یک فرآیند تصمیم مارکفی مدل‌سازی شده است. در [۱۵] نویسندگان مصالحهٔ انرژی-تاخیر در سناریوی هم‌مسیریِ معکوس را به صورت سیاست‌های زمان-انتظار مدل‌کرده اند. در [۱۶] نویسندگان سناریوی هم‌مسیریِ معکوس را به کمک یک زنجیرهٔ مارکف زمان گسسته و فرآیند ورود بسته‌ها را به کمک یک فرآیند مارکفیِ زمان گسستهٔ ورود مدل‌سازی کرده‌اند. در [۱۷] نیز نویسندگان یک استراتژیِ توزیع شده مبتنی بر نظریهٔ بازی‌ها برای بهینه‌سازیِ مصالحهٔ انرژی-تاخیر در سناریوی هم‌مسیریِ معکوس ارائه داده‌اند. در [۱۸] نویسندگان یک تکنیکِ تقسیمِ فرکانسیِ مضاعف برای سناریوی هم‌مسیریِ معکوس ارائه داده‌اند. در [۱۹] مساله را در حدِ یک شبکهٔ قطاری محدود کرده‌اند و یک استراتژیِ بین لایه‌ای مابین لایهٔ شبکه و لایهٔ پیوند داده‌ها اراده داده‌اند.

۲- ۲- پژوهش‌های مرتبط با تصمیم‌گیری در گره‌های کدگشا

برخی از پژوهش‌ها تلاش دارند در سناریوهای محدود شده ای، میزان شنود در شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر کدبندی را کاهش دهد. برخی با محدود کردن حجم شنود بسته ها و برخی با استفاده از مکانیزم خواب و بیدار.

در [۲۰] برای کاهش شنودِ بسته‌های تکراری در کاربردهای همه‌پخشی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، هر گره قبل از ارسال بستهٔ اصلی، یک بستهٔ کوچک با عنوان *خلاصه اطلاعات*[4] را بصورت همه پخشی ارسال می‌کند که حاوی

[3] Reverse Carpooling

[4] Digest-info

خلاصه‌ای از دادهٔ بستهٔ اصلی است که متعاقباً ارسال خواهد شد. گره‌های دیگر به کمک این بستهٔ کوچک می‌توانند متوجهٔ تکراری یا جدید بودنِ بستهٔ دادهٔ اصلیِ متعاقبِ این بسته شده و برای خواب و بیدار خود تصمیم‌گیری کنند. در [۲۱] نویسندگان کدبندی شبکه را در شبکه‌های GinMAC در نظر گرفته اند. آنها برای کاهش سربار شنود بسته‌ها، سعی کرده‌اند با تنظیمِ مجددِ برش‌های زمانی (تغییر، حذف و اضافه کردن برخی از برش‌های زمانی)، برخی از برش‌های زمانیِ شنود را کاهش دهند. نویسندگان در [۲۲] با توزیع مصرف انرژی در گره‌های اطراف گرهٔ سینک، سعی در ارائهٔ یک راه‌کار تلفیقی از کدبندی شبکه و زمانبندیِ خواب/بیدار برای نقاط گلوگاهیِ شبکه‌های حسگر بی‌سیم در کاربردهای چندرسانه‌ای داشته‌اند. در [۲۳] برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم با کاربردهای مبتنی بر ارسال‌های سیل‌آسا، یک چهارچوب ترکیبی ارائه شده‌است که در آن سعی شده ایدهٔ کدبندی شبکه با زمانبندیِ خواب/بیدار ترکیب شود تا مشکلِ ارسال‌های مضاعف و تکراری در راه‌کارهای مبتنی بر همه پخشی برطرف گردد. در [۲۴] نویسندگان راه‌کاری با عنوانِ GreenCode معرفی کرده‌اند که در واقع یک پروتکلِ دسترسی به کانال مشترکِ آگاه از کدبندی است که سعی در بهبود مصرف انرژی به کمک زمانبندیِ خواب/بیدار گره‌ها دارد.

۳- رویکرد تصمیم گیری در گره‌های کدگذار

ماهیت تصادفی رسیدن بسته‌ها به یک گرهٔ کدگذار در نظریهٔ کدبندی شبکه، یک چالش ویژه پیش روی گرهٔ کدگذار قرار می‌دهد؛ فرض کنید یک گرهٔ کدگذار در صف ارسال خود یک بسته برای ارسال به مقصدی خاص دارد و اکنون نوبت ارسال این بسته است. با استفاده از ایدهٔ کدبندی شبکه، گرهٔ فرستنده صفِ ارسال خود را برای یافتن فرصت‌های کدبندی جستجو می‌کند و برای یافتن یک الگوی مناسبِ کدبندی دیگر بسته‌های موجود در صف ارسال را چک می‌کند. اما فرض کنیم این گره هیچ فرصت کدبندیی برای بستهٔ در حال ارسال پیدا نکند! حال گره با یک تصمیم مهم و دو انتخاب مواجه است:

- **انتخاب اول:** بستهٔ مورد نظر را به صورت دست‌نخورده به سمت مقصد ارسال کند. با این کار گره در واقع از مزایای کدبندی شبکه صرف‌نظر کرده است.
- **انتخاب دوم:** بستهٔ مورد نظر را مدتی به امید به وجود آمدن فرصت‌های کدبندی نگه دارد.

اما سؤال اصلی این است: در صورت انتخاب گزینهٔ دوم (و انتظار برای فرصت‌های بهترِ کدبندی)، گره چه مدت باید برای کشف فرصت کدبندی منتظر بماند؟ این احتمال وجود دارد در صورت زیاده‌روی در نگه‌داشتن بسته و با افزایش میزان تأخیر انتها به انتهای این بسته، این بسته از دید لایهٔ بالاتر (مثلاً TCP یا حتی برنامهٔ کاربردی) از بین رفته تلقی شود!

ما این تصمیم‌گیری در گره‌های کدگذارِ شبکه را تحت عنوان مسالهٔ "ارسال یا عدم ارسال" در پژوهش پیشین خود [۶] و با استفاده از نظریهٔ توقف بهینه[5] مدل‌سازی کرده‌ایم. مسائل توقف بهینه در حالت کلی مسائلی هستند که در آنها یک عامل باید بهترین زمان برای توقف (و انجام یک عمل) را پیدا کند. در مسالهٔ ما، گره باید بین دو گزینهٔ ادامهٔ انتظار و ارسال بسته یکی را انتخاب کند.

در این مساله در طول زمان، گره گزارش‌های دریافتِ همسایه‌هایش را دریافت می‌کند. هر کدام از این گزارش‌ها در راستای افزایش بهرهٔ کدبندی دارای ارزشمندیِ خاصی هستند. این گزارش‌ها و مقدار ارزشمندیِ آن‌ها در واقع متغیرهای تصادفی و پاداش‌های قابل مشاهدهٔ عامل یادگیر در نظریهٔ توقف بهینه قلمداد می‌شوند. گرهٔ یادگیر، با مشاهدهٔ این متغیرها باید زمان مناسب جهت صدور دستور توقف (و صدور دستور ارسال بسته) را پیدا کند.

۳- ۱- مفروضات اصلی در این رویکرد

در این مساله، بزنگاه تصمیم‌گیری در لحظه‌ای رخ می‌دهد که گره یک فرصت ارسال دارد، به این ترتیب افق تصمیم‌گیری از یک فرصت ارسال تا فرصت ارسال بعدی است. در این پژوهش فرض شده‌است که گره‌ها از پروتکل IEEE 802.11 برای دسترسی به کانال استفاده می‌کنند [۲۵]. هر گره‌ای که یک بستهٔ داده برای ارسال داشت، باید وضعیت کانال را بررسی کند و اگر کانال آزاد بود آنگاه گره یک *فرصت ارسال* به دست آورده است و می‌تواند بسته‌ای را ارسال کرده یا منتظر بماند. همچنین ما فرض کرده‌ایم که مدت زمان بین دو فرصت ارسال متوالی، T، برای یک گرهٔ خاص از یک توزیع نمایی با پارامتر λ_t تبعیت می‌کند.

همچنین ما فرض کرده‌ایم بسته‌ها با یک توزیع پوآسن با پارامتر λ_p به یک گره وارد می‌شوند[۲۶] و هر گره در شبکه می‌تواند مبدا، مقصد و یا تقویت کنندهٔ بسته‌ها باشد و فرآیند تولید بسته در گره‌ها، i.i.d.[6] پوآسن است. بعلاوه بسته‌ها با یک توزیع پوآسن با نرخ λ_p (بر حسب بسته بر ثانیه) وارد می‌شوند. از طرفی گزارش‌های دریافت با یک توزیع پوآسن با پارامتر λ_r دریافت می‌شوند، زیرا گزارش‌های دریافت به همراه بسته‌های داده جابجا می‌شوند.

در این مساله فرض شده است که هر بستهٔ دریافتیِ جدید می‌تواند با احتمالِ p_p بهترین درجهٔ کدبندی بسته‌های موجود، d، را یک واحد افزایش دهد و هر گزارشِ دریافت جدید نیز می‌تواند با احتمال p_r بهترین درجهٔ کدبندی بسته‌های موجود را یک واحد افزایش دهد. بنابراین مقدار افزایشِ بهترین درجهٔ کدبندی بر اساس ورود بسته‌های دادهٔ جدید یک توزیع پوآسن با پارامتر $\lambda_p.t.p_p$ و افزایش بهترین درجهٔ کدبندی بر اساس دریافت گزارش‌های دریافت همسایه‌ها، یک توزیع پوآسن با پارامتر $\lambda_r.t.p_r$ است. به این ترتیب، λ_d نرخ کلیِ افزایش d به صورت زیر خواهد بود [۶]:

$$\lambda_d = \lambda_r.p_r + \lambda_p.p_p \qquad (۱)$$

۳- ۲- مدل‌سازی

ما این مسالهٔ را در قالب نظریهٔ توقف بهینه و به کمک یک چهارتایی به صورت $<D, A, R, P>$ مدل کرده‌ایم که در آن D فضای وضعیت، A مجموعه اعمال، R تابع پاداش و P ماتریس احتمالات گذارها است.

مرحله: در این مساله هر مرحله، مدت زمان بین دو فرصت ارسال متوالی است، پس لحظهٔ تصمیم‌گیری دقیقاً لحظه‌ای است که فرصت ارسال از راه می‌رسد.

متغیر وضعیت: وضعیت یک گره، d، برابر است با درجهٔ *بهترین* گزینهٔ کدبندی برای همهٔ بسته‌هایی که در صف ارسال یک گره قرار دارند که در این حالت $D=\{1, 2, 3, \ldots\}$ مجموعهٔ همهٔ وضعیت‌های ممکن است.

مجموعهٔ عمل: در هر بزنگاه تصمیم‌گیری، گره دو گزینه برای انتخاب دارد، انتخاب 0 برای انتظار و انتخاب 1 برای ارسال (توقف).

ماتریس گذار: ما فرض کرده‌ایم که $p_{ij}(a, T_0)$ برابر است با احتمال گذار از وضعیت i به وضعیت j هنگامی که عملِ a انتخاب و اجرا شود و مرحلهٔ بعدی در T_0 واحد زمانیِ بعد رخ دهد. ماتریس گذار به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$P = \left[p_{ij}(a, T_0)\right] \qquad (۲)$$

حال با در نظر گرفتن D به عنوان همهٔ وضعیت‌های ممکن داریم:

$$p_{ij}(1, T_0) = p\{x_{t+1} = j | x_t = i, a = 1, T = T_0\}; i, j \epsilon D \qquad (۳)$$

که خواهیم داشت:

$$p_{ij}(1, T_0) = 0; \;\; \forall j \epsilon D - \{1\} \qquad (۴)$$

$$p_{i1}(1, T_0) = 1; \qquad \forall i \epsilon D \qquad (۵)$$

عبارات ۳ و ۴ نشان می‌دهند که با انتخاب عمل ارسال، سیستم حتما به وضعیت d=1 منتقل می‌شود. همچین برای عمل انتظار خواهیم داشت [۶]:

[5] Optimal Stopping Theoty

[6] Independent and identically distribution

$$p_{ij}(0,T_0) = p\{x_{t+1} = j | x_t = i, a = 0, T = T_0\} = \begin{cases} 0 & ; j < i \\ \dfrac{e^{-\lambda_d T_0}(\lambda_d T_0)^{j-i}}{(j-i)!} & ; j \geq i \end{cases} \quad (۶)$$

که نشان می‌دهد انتظار برای بزنگاه بعدی، سیستم را هیچ‌گاه به یک وضعیت بدتر (با درجهٔ کدبندی کمتر) منتقل نمی‌کند.

تابع پاداش: فرض کنیم $R(d, a)$ برابر با حجم پاداش به دست آمده با انتخاب عملِ a در وضعیت s باشد، تابع R را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$R(d,a) = \begin{cases} g(d-1) & ; a = 1 \\ 0 & ; a = 0 \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن $g(.)$ منفعت به دست آمده ناشی از کاهش تعداد ارسال‌هاست.

دنبالهٔ منفعتِ قابل دستیابی برای یک گره می‌تواند به صورت زیر فرموله گردد:

$$Y_0 = 0$$
$$Y_n(d_1, d_2, \dots, d_n, T_n) = g(d_n - 1) \times e^{-L.\delta.T_n}; n \geq 1 \quad (۸)$$

در عبارت فوق، بهرهٔ کدبندی به دست آمده بر اساس تاخیرِ تزریق شده کاهش می‌یابد.

۳- ۳- قانون توقف بهینه

با توجه به ماهیت مساله، پیدا کردن سیاست کنترلِ بهینه، در واقع یافتن یک حد آستانه بر روی درجهٔ کدبندی گره با راهکار 1-SLA[7] است. توضیح اینکه در روش 1-SLA، در هر مرحله ابتدا امید ریاضیِ سود قابل دستیابی تا **یک** مرحلهٔ بعد محاسبه می‌شود، حال سود به دست آمده در مرحلهٔ جاری با امید ریاضیِ سود مرحلهٔ آینده مقایسه می‌گردد، اگر میزان سود مرحلهٔ جاری بزرگتر بود، مشاهدات متوقف شده و تصمیم به توقف گرفته می‌شود.

قضیه ۳-۱: *در مسائل توقف بهینه، اگر* $E\{sup_n Y_n\} < \infty$ *و* $lim\ sup_{n\to\infty} Y_n \leq Y_\infty$ *و مساله یکنوا باشد، آنگاه قانون توقفِ 1-SLA بهینه است.*

اثبات: در فصل پنجمِ [۲۷] به طور کامل آمده است. ■

لم ۳-۱: در مسالهٔ ما دو شرط $E\{sup_n Y_n\} < \infty$ و $\lim\sup_{n\to\infty} Y_n \leq Y_\infty$ ارضا می‌شوند.

اثبات: در بخش ۳ از [۶] آمده‌است. ■

برگردیم به تعیین قانون توقف بهینه؛ در مسالهٔ ما عبارت بهینگی[8] به صورت زیر نوشته می‌شود [۶]:

$$v(d) = max \begin{Bmatrix} 0 + \int_0^\infty \sum_{j\geq d} p_{dj}(0,T) \times v(j) \times e^{-L.\delta.T} f_T(t)dt, \\ g(d-1) + \int_0^\infty p_{d1}(1,T) \times v(1) f_T(t)dt \end{Bmatrix} \quad (۹)$$

که در آن $v(d)$ برابر است با حداکثر میزانِ منفعت قابل انتظار اگر سیستم در وضعیت d باشد. با ساده سازیِ عبارت ۹ خواهیم داشت:

$$v(d) = max\left\{\int_0^\infty \sum_{j\geq d} p_{dj}(0,T) \times v(j) \times e^{-L.\delta.T} f_T(t)dt, g(d-1)\right\} \quad (۱۰)$$

که عبارت بهینگیِ مسالهٔ ما خواهد بود.

۳- ۴- یافتن راهکار

برای به دست آوردن راهکار توقف بهینه، ما نه تنها باید محاسبه کنیم که چه مقدار انتظار سودمند است، بلکه باید به دست آوریم تحت چه شرایطی انتظارِ بیشتر معقول نیست؟ برای این منظور باید منفعتِ توقف در مرحلهٔ جاری را هر بار با منفعتِ مورد انتظار با توقف در مرحلهٔ بعد مقایسه کنیم. به این منظور ما مجموعهٔ B را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$B = \left\{d: g(d-1) \geq \int_0^\infty \sum_{j\geq d} p_{dj}(0,T) \times g(j-1) \times e^{-L.\delta.T} f_T(t)dt\right\} \quad (۱۱)$$

که در آن B نشان دهندهٔ مجموعهٔ همهٔ وضعیت‌هایی است که در آنها توقف در آن وضعیت حداقل به میزانِ ادامه و توقف در مرحلهٔ بعد سودمند است، از طرفی $g(d\text{-}1)$ نشان دهندهٔ میزان پاداش برای توقف در مرحلهٔ جاری است و در نهایت عبارت $\int_0^\infty \sum_{j\geq d} p_{dj}(0,T) \times g(j-1) \times e^{-L.\delta.T} f_T(t)dt$ نشان دهندهٔ منفعت مورد انتظار برای انتظار تا مرحلهٔ بعد و سپس توقف است. با ساده‌سازیِ عبارت ۱۱ خواهیم داشت [۶]:

$$B = \left\{d: g(d-1) \geq \int_0^\infty \sum_{j\geq d} \frac{e^{-\lambda_d T}(\lambda_d T)^{j-d}}{(j-d)!} \times g(j-1) \times e^{-L.\delta.T} \times \lambda_t e^{-\lambda_t T} dT\right\} \quad (۱۲)$$

در گامِ بعدی ما باید نشان دهیم که مجموعهٔ B یک مجموعهٔ بسته بر روی d است، سپس با استفاده از رویکرد 1-SLA یک قانون توقف بهینه استنتاج کنیم. می‌دانیم هنگامی که یک بستهٔ کد شده با درجهٔ کدبندی d ارسال می‌شود، دقیقا به تعداد d-1 ارسال را در شبکه کاهش می‌دهد. حال با فرضِ اینکه $g(.)$ در یک فرمِ خطی از $g(d) = cd + b$ قرار دارد، مجموعهٔ B به صورت زیر خواهد بود:

$$B = \left\{d: cd + b \geq \int_0^\infty \sum_{j\geq d} \frac{e^{-\lambda_d T}(\lambda_d T)^{j-d}}{(j-d)!} \times (cj + b) \times e^{-L.\delta.T} \times \lambda_t e^{-\lambda_t T} dT\right\} \quad (۱۳)$$

با ساده سازیِ عبارت فوق، به ارتباط زیر خواهیم رسید:

$$\begin{aligned} B &= \{d: cd + b \geq cd.E_T(e^{-L.\delta.T}) + c\lambda_d E_T(Te^{-L.\delta.T}) + b.E_T(e^{-L.\delta.T})\} \\ &= \left\{d: \left(1 - E_T(e^{-L.\delta.T})\right)(cd + b) \geq c\lambda_d E_T(Te^{-L.\delta.T})\right\} \\ &= \left\{d: d \geq \frac{\lambda_d E_T(Te^{-L.\delta.T})}{\left(1 - E_T(e^{-L.\delta.T})\right)} - \frac{b}{c}\right\} \\ &= \left\{d: d \geq \frac{\lambda_d \frac{\lambda_t}{(\delta L + \lambda_t)^2}}{\left(1 - \frac{\lambda_t}{\delta L + \lambda_t}\right)} - \frac{b}{c}\right\} \\ &= \left\{d: d \geq \lambda_d \frac{\lambda_t}{\delta L(\delta L + \lambda_t)} - \frac{b}{c}\right\} \end{aligned} \quad (۱۴)$$

که در واقع حد آستانه در راهکار بهینه برای مسالهٔ ما عبارت است از [۶]:

$$d^* = \lambda_d \frac{\lambda_t}{\delta L(\delta L + \lambda_t)} - \frac{b}{c} \quad (۱۵)$$

و در نهایت $w(d)$، قانون تصمیم‌گیری، برابر است با:

$$\boldsymbol{w(d)} = \begin{cases} 0; & d < d^* \\ 1; & d \geq d^* \end{cases} \quad (۱۶)$$

که نشان می‌دهد در هر بزنگاه تصمیم‌گیری، گره باید مقدار d^* را محاسبه کرده و با مقدار d جاری مقایسه کند، اگر مقدار d از d^* کوچکتر بود، تصمیم به انتظار برای بزنگاه بعدی میگیرد، در غیر اینصورت تصمیم ارسال (توقف) را انتخاب می‌کند. به صورت شهودی می‌توان گفت مقدارِ d^* متاثر از دو پارامترِ اصلی است؛ ۱) نرخ وقوع فرصت‌های ارسال و ۲) نرخ به‌وجود آمدن فرصت‌های کدبندی. اگر نرخ وقوع فرصت‌های کدبندی بالا باشد، مقدار d^* بالاتر محاسبه می‌شود که در این حالت انتظار (به امیدِ ارسال با درجه‌های بالاتر) منطقی است. از طرف مقابل، فرض کنیم فاصلهٔ بین فرصت‌های ارسال زیاد است؛ این مساله باعث کاهش مقدارِ d^* می‌شود و گرهٔ کدگذار به ارسالِ بسته‌های با درجهٔ پایین‌تر راضی می‌شود.

۴- رویکرد تصمیم‌گیری در گره‌های کدگشا

بسیاری از پیاده‌سازی‌های کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم، جهت افزایش فرصت‌های کدبندی در شبکه، (و در نتیجه کاهش تعداد ارسال‌ها در شبکه) گره‌های شبکه را به شنود ترافیک همسایه‌های خود ترغیب می‌کنند و گره‌ها باید برای مدتی این بسته‌ها را در حافظه خود نگهداری کنند. این شنود فرصت‌طلبانه همواره موفقیت آمیز نبوده و در بسیاری از مواقع، بسته‌هایی که گره شنود می‌کند برای عملیاتِ کدبندی همسایه‌های مفید نیستند [۸].

ما مسالهٔ "*شنود یا عدم شنود*" را در یکی از پژوهش‌های پیشین و به صورت

[7] One-Stage-Look-Ahead

[8] Optimality equation

یک فرآیند تصمیمِ شبه مارکفی فرموله کرده‌ایم [۸]. در راهکار پیشنهادی گره‌های شبکه تلاش می‌کنند که یاد بگیرند کِی بخوابند و کِی برای شنود بسته‌های همسایگان بیدار بمانند.

۴- ۱- مدل‌سازی

جزئیات مدلسازی به قرار زیر است:

بزنگاه‌های تصمیم‌گیری: در این مساله بزنگاه‌های تصمیم‌گیری، فاصله‌های بین بازه‌های بیکاری هر گره (فرصت‌های شنود) هستند.

فضای وضعیت: مجموعهٔ وضعیت‌های ممکن برای یک گره با S نشان داده می‌شود. حال اگر فرض کنیم $s_t \in S$ نشان دهندهٔ وضعیت گره در زمان t باشد:

$$s_t = (e_t, g_t) \tag{۱۷}$$

که در آن e_t میزان انرژی باقیماندهٔ گره در زمان t است و g_t نشان دهندهٔ میزان کارآیی عملیات کدبندی شبکه در همسایگی آن گره در زمان t است.

عمل‌ها: بر اساس وضعیت جاری و در هر بزنگاه تصمیم‌گیری، هر گره می‌تواند تصمیم به خوابیدن یا بیدار ماندن بگیرد. پس داریم:

$$a_t = \begin{cases} 0, & overhear \\ 1, & sleep \end{cases} \tag{۱۸}$$

پویایی وضعیت‌ها: عملاً می‌توان پویایی وضعیت‌ها را با دو پارامتر مشخص کرد، یکی احتمالات گذارها ($P_{ss'}(a)$) و دیگری زمان اقامت مورد انتظار[9] به ازای هر زوج وضعیت-عمل ($F_s(a)$). برای مشخص کردن $P_{ss'}(a)$ باید احتمال آنکه در لحظهٔ بزنگاه تصمیم‌گیری بعدی سیستم در وضعیت s' باشد، به شرطی که در وضعیت جاری (s) عمل a انتخاب شود را محاسبه کرد. از طرف دیگر $F_s(a)$ در واقع مدت زمان مورد انتظار تا بزنگاه تصمیم‌گیری بعدی است به شرطی که در لحظهٔ جاری (s) عمل a انتخاب شود. در این پژوهش، ما $Y_{dd'}$ را به عنوان مقدار مناسبی برای تابع F به صورت مدت زمان مورد انتظار بین دو بزنگاه تصمیم‌گیری متوالیِ d و d' تعریف می‌کنیم [۸]:

$$Y_{dd'} = \left[\sum_{i \in K_n} \sum_{j \in (K_i - n)} \lambda_{ij}\right]^{-1} \tag{۱۹}$$

که در آن K_n مجموعهٔ همسایه‌های گرهٔ n و λ_{ij} نرخ ارسال بسته از گرهٔ i به گرهٔ j است.

سیاست بهینه: سیاست $\pi = \{(s,a) \mid a \in A, s \in S\}$ یک مجموعه از زوج‌های وضعیت-عمل برای تمام وضعیت های فرآیند تصمیمِ شبه مارکفی است، و سیاست بهینه سیاستی است که پاداش تجمعی مورد انتظار را بیشینه کند.

تابع پاداش: ما پاداش یک گره در فرآیند تصمیم‌گیری‌اش را بر اساس میزان انرژی صرفه‌جویی شده حاصل از انتخاب عمل‌هایش تعریف می‌کنیم. میزان انرژی مصرف شده در گرهٔ n و برای عملیات ارسال با مدت زمان یک برشِ فرضیِ T_{slot} برابر است با:

$$E_T = W_{tr} \times T_{slot} \tag{۲۰}$$

که در آن W_{tr} مقدار ثابتی از توان است که گرهٔ n در حالت ارسال مصرف می‌کند. ما فرض کرده‌ایم واحد رادیوییِ هر گره وقتی که در حالت دریافت قرار دارد با توان ثابت W_{rc} کار می‌کند، بنابراین میزان انرژی مصرف شده برای دریافت یک بسته در مدت زمان T_{slot} برابر است با:

$$E_R = W_{rc} \times T_{slot} \tag{۲۱}$$

بدیهی است شنود یک بسته در حالت بی‌قید، دقیقاً به همان اندازهٔ دریافت یک بسته انرژی مصرف می‌کند. علاوه بر این ما فرض کردیم هنگامی که واحد رادیوییِ یک گره در وضعیت خواب است، انرژی‌ای مصرف نمی‌کند. به این ترتیب و بر اساس فرضیات مطرح شده، هنگامی که یک گره در یک بازهٔ بیکاری تصمیم به خواب می‌گیرد، می‌تواند به اندازهٔ E_R انرژی ذخیره کند. از طرفی گره‌ها طِی یک فرآیند تصادفی مقداری انرژی از محیط جمع آوری می‌کنند. میزان انرژی‌ای که هر گره از محیط دریافت می‌کند با نرخ متوسط ζ است.

تابع r در اینجا مقدار پاداش دریافت شده در زمان t را نشان می‌دهد که می‌تواند بر اساس پاداش یا هزینهٔ اعمال، مثبت یا منفی باشد. تابع پاداش یک گره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r(s_t, a_t) = Revenue(s_t, a_t) - Cost(s_t, a_t) \tag{۲۲}$$

که در آن $Revenue$ و $Cost$ به ترتیب برابرند با [۸]:

$$Revenue(s_t, a_t) = \begin{cases} 0, & a_t = 1 \\ \psi E_R, & a_t = 0 \ and \ p_t^o = useful \\ 0, & a_t = 0 \ and \ p_t^o = useless \end{cases} \tag{۲۳}$$

و

$$Cost(s_t, a_t) = \begin{cases} 0, & a_t = 1 \\ E_C, & a_t = 0 \end{cases} \tag{۲۴}$$

که در آنها ($0 \le \psi$) ψ فاکتور سودمندیِ بستهٔ شنود شده است، این فاکتور به طور بسیار ساده محاسبه شده و برابر است با تعداد دفعاتی که این بستهٔ شنود شده در عملیات کدبندی همسایه‌ها مشارکت می‌کند. در این حالت p_t^o بستهٔ شنود شده در زمان t است، و داریم:

$$p_t^o = \begin{cases} useful, & if \ p_t^o \ is \ in \ p_k^c \quad \exists \, p_k^c, \ t \le k \le t + \alpha \\ useless, & else \end{cases} \tag{۲۵}$$

که در آن p_k^c بستهٔ کدشدهٔ دریافت شده در زمان k است و t زمانی است که بستهٔ p_t^o شنود شده است و α ضرب‌الاجلِ سودمندیِ بستهٔ است. در حالت کلی هنگامی که یک بستهٔ کد شده در ψ بستهٔ کدشده مشارکت کرده باشد، تعداد ψ ارسال را در شبکه کاهش داده است. به طور شهودی می‌توان گفت مقدار $Revenue$ میزان انرژی ذخیره شده در همسایه‌های گره را نشان می‌دهد.

۴- ۲- راه حل یادگیری تقویتی

همانطور که پیشتر اشاره شد، فرآیند تصمیم‌گیریِ شبه مارکفی در واقع یک عمومی‌سازی از فرآیند تصمیم مارکفیِ زمان گسسته است که پیشرفت سیستم در یک الگوی زمان پیوسته مدل می‌شود؛ به همین دلیل نسخهٔ زمان پیوستهٔ Q-learning [۲۸] باید برای حلِ فرآیندهای تصمیم‌گیریِ شبه مارکفی استفاده شود [۲۹]. در این راهکار مقادیر Q در بزنگاه تصمیم‌گیریِ d_{t+1} به کمک عبارت زیر به روز می‌شود:

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \beta \times \left(R(s_{t+1}, a_{t+1}) + e^{-\gamma(d_{t+1} - d_t)} \max_{a_{t+1} \in A(s_{t+1})} \{Q(s_{t+1}, a_{t+1})\} - Q(s_t, a_t)\right) \tag{۲۶}$$

در واقع در طول روال یادگیری یک گره در هر دور مقادیر Q را به روز کرده و پاداش مربوط را به همهٔ آنها نسبت می‌دهد. برای به روز رسانیِ مقادیر Q به ازای همهٔ $\hat{\theta} \in |\Theta|$ از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم [۸]:

$$Q(s_{t-\hat{\theta}}, a_{t-\hat{\theta}}, \hat{\theta}) \xleftarrow{update} Q(s_{t-\hat{\theta}}, a_{t-\hat{\theta}}, \hat{\theta}) + \beta \times \left(R(s_t, a_t) + e^{-\gamma(d_{(t+1)-\hat{\theta}} - d_{t-\hat{\theta}})} \max_{a_{t+1} \in A(s_{t+1}), \hat{\theta}} \{Q(s_{(t+1)-\hat{\theta}}, a_{(t+1)-\hat{\theta}}, \hat{\theta})\} - Q(s_{t-\hat{\theta}}, a_{t-\hat{\theta}})\right) \tag{۲۷}$$

که در آن $\hat{\theta}$ها به ترتیب از تعدادِ $|\Theta|$ کل تخمین ها انتخاب می‌شوند.

۵- مدل سیستم و چهارچوب ENCODE

در این بخش ابتدا مفروضات اصلی را تشریح کرده و در ادامه تغییراتی که برای اجرای توأمانِ دو رویکرد باید در عملکرد گره‌ها ایجاد شود را بیان می‌کنیم.

۵- ۱- مدل سیستم

در این بخش، مدل سیستم به تفکیک بررسی می‌گردد.

مدل کدبندی

دراین پژوهش، جهت انتخاب بهترین گزینهٔ ممکن برای کدبندی، هر گره لیست کل بسته‌های موجود در حافظه‌اش را برای همسایه‌هایش، تحت عنوان

[9] Expected sujourn time

گزارش دریافت، ارسال می‌کند. گزارش های دریافت بهمراهِ بسته‌های دادهٔ عادی ارسال می‌شوند. برای این کار یک سرآیندِ خاص به بسته‌های داده اضافه می‌شود، جایی بینِ سرآیند لایهٔ شبکه (مسیریابی) و سرآیند لایهٔ پیوند داده (MAC)، که به آن سرآیند کدبندی گوییم. این سرآیندِ کدبندی شامل سه بخش عمدهٔ زیر است: ۱) شناسهٔ بسته‌های کدشده در بستهٔ جاری، ۲) گزارش‌های دریافت و ۳) تاییدهٔ دریافت بسته‌ها. مورد اول در واقع مشخص می‌کند که اگر این بستهٔ جاری به صورت کدشده است، چه بسته‌هایی در این کدبندی مشارکت کرده‌اند. این اطلاعات برای کدگشایی بسته در مقصد مهم است؛ مورد دوم نیز گزارش‌های بسته‌های شنود و دریافت شدهٔ مبدا این بسته است که این اطلاعات برای عملیات کدبندی دیگران مفید است و در نهایت تاییده‌های دریافت در لایهٔ MAC کاربرد دارد.

هر بستهٔ داده می‌تواند چندین گزارش را با خود حمل کند و در هر گزارش آدرس IP گرهٔ مبدا بسته‌های گزارش شده باید مشخص شود. برای این منظور، در گزارش‌ها ابتدا آدرس IP مبدا بسته‌ها، سپس شناسهٔ **آخرین** بستهٔ شنود شده از آن مبدا و پس از آن یک دنبالهٔ بیتی برای بسته‌های اخیراً شنود شده از آن مبدا ثبت می‌شود. به عنوان مثال فرمتِ یک گزارش می‌تواند به صورت زیر باشد:

{142.34.98.32; 107; 000010011011001} که این گزارش به این معناست که همسایهٔ مورد نظر (که این گزارش را به ما داده است)، از گرهٔ 142.34.98.32 چندین بسته (۶ بسته) در حافظهٔ خود دارد که آخرین بستهٔ شنود شده، بستهٔ ۱۰۷ است و در کل بسته‌هایی با شناسه‌های ۱۰۷، ۱۰۴، ۱۰۳، ۱۰۱، ۱۰۰ و ۹۷ از آن گرهٔ خاص دریافت شده است.

هنگامی که یک گره، یک بستهٔ کد شده را دریافت می‌کند، به سراغ سرآیند کدبندی آن بسته می‌رود. این سرآیند حاویِ لیست شناسهٔ بسته‌های کد شده است. حال این گره باید به ترتیب بر اساس شناسهٔ این بسته ها، آنها را از حافظهٔ خود بازیابی کرده و بعد از XOR کردن آنها با بستهٔ کد شدهٔ دریافتی، بستهٔ مورد انتظار خود را بازیابی کند.

مدل شبکه

در این پژوهش یک شبکهٔ بی‌سیم چندپرشی با گره‌های غیرمتحرک در نظر گرفته شده است. در این شبکه گره‌ها به صورت تصادفی در محیط پراکنده شده‌اند و تعدادی ارتباط (ارسال) یک طرفه بین آنها برقرار می‌گردد که هر گره می‌تواند مبدا یا مقصد ترافیک باشد و هر گره می تواند با همسایه های خود در شعاع ρ ارتباط برقرار کند.

هنگام برقراریِ یک ارتباط، جریانی از بسته‌ها بین مبدا و مقصد برقرار می‌شوند. ما (همانند بسیاری از پیاده سازی‌های کدبندی شبکه [۳]) فرض کرده‌ایم تمام بسته‌های دادهٔ ارسالی هم اندازه هستند، و در کاربردهایی که بسته‌های ارسالی اندازه‌های متفاوتی دارند، مبدا (یا گرهٔ کدگذار) به انتهای بسته‌های کوچکتر به مقدار نیاز بیت (با مقدار صفر) اضافه می‌کند.

مدل گره

در تمام شبکه ما معماری گره‌ها را یکسان در نظر گرفته‌ایم و همه از آنتن‌های همه-جهته استفاده می‌کنند. گره‌ها یک صف برای بسته‌های ارسالی به همسایه‌های خود (با طول p) دارند و یک صف دیگر برای نگهداری بسته‌هایی که در حالت بی‌قید از همسایه‌های خود شنود کرده‌اند (با طول q) دارند. بسته‌های صف q پس از مدتی و به کمک الگوریتم سالمندی حذف خواهند شد.

در این مقاله فرض شده‌است هر گره انرژی خود را توسط یک باتریِ قابل شارژ تامین می‌کند. بعلاوه گره سعی دارد در طول بازهٔ زندگی خود از منابع انرژیِ محیطی استفاده کند، اما در هر حال پس از آنکه ذخیرهٔ باتریِ گره به اتمام رسید، گره خاموش خواهد شد. اخیراً پیشرفت‌های تحقیقاتیِ زیادی در رابطه با برداشت انرژی از منابع محیطی صورت گرفته و حتی روش‌های کارآ و مناسبی برای جمع آوری انرژی از محیط در گره‌های بی‌سیم نیز ارائه شده [۳۰] که عملاً به طراحیِ گره‌های خود-پایدار منجر شده است. در این مقاله، ما فرض کرده‌ایم زمانِ از راه رسیدنِ انرژی‌های جمع آوری شده توسط یک گره یک فرآیند تصادفی است [۳۱].

همچنین ما فرض کرده ایم هر گره در طول ارسال یک بسته به میزان E_T واحد انرژی مصرف می‌کند، به همین ترتیب برای دریافت (یا شنود) هر بسته به قدار E_R واحد انرژی نیاز است و در نهایت در بازهٔ زمانی برابر با ارسال یک بسته، اگر یک گره هیچ بسته‌ای دریافت نکند (در وضعیت شنود بیکار) به میزان E_I واحد انرژی مصرف می‌کند. در حالتی که گره در وضعیت خواب به سر می‌برد، ما فرض کرده ایم که میزان مصرف انرژی قابل چشم پوشی است.

در این پژوهش گره‌ها در لایهٔ MAC از پروتکل پایهٔ IEEE 802.11 [۳۲] استفاده می‌کنند. استاندارد 802.11 دارای دو حالت است، ارسال تک پخشی و ارسال همه پخشی. در حالت تک پخشی، دریافت هر بسته فوراً توسط گیرنده تایید می‌شود و عدم دریافت تاییدیه نشان دهندهٔ یک تصادم است و فرستنده باید دوباره بستهٔ فوق را از نو ارسال کند که این مساله قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد. ما در این پژوهش از حالت تک پخشیِ 802.11 استفاده می‌کنیم که بتوانیم از مزیتِ قابلیت اطمینانِ آن استفاده کنیم.

۵- ۲- چهارچوب *ENCODE*

برای ترکیب و استفادهٔ همزمانِ هر دو رویکرد در عملکرد گره‌های شبکه، باید تغییراتی (عمدتاً در پروتکل دسترسی به کانال) اعمال کنیم. همانطور که پیشتر اشاره شد، برای رسیدن به قابلیت اطمینان در ارسال بسته‌ها، از حالتِ تک‌پخشیِ 802.11 با سه تغییر اساسی زیر استفاده می‌کنیم.

اصلاح اول در IEEE 802.11

هنگام ارسال یک بستهٔ کد شده، فیلدِ مقصد در لایهٔ پیوند داده با یکی از مقاصدِ بستهٔ کد شده پر خواهد شد و مابقیِ مقاصدِ بسته‌های خالص، در سرآیند کدبندی اضافه خواهند شد. هنگامی که یک گره (در حالت بی قید) یک بستهٔ کد شده را دریافت می‌کند که آدرس مقصدِ آن بسته متفاوت با آدرسِ MAC آن گره است، باید سرآیند کدبندی بسته را نیز چک کند تا دریابد به عنوان گام بعدی در سرآیند کدبندی ذکر شده است یا خیر؟ اگر آدرس خود را در سرآیندِ کدنیگِ بسته و در لیست گام‌های بعدی دریافت، بسته را به عنوان یک بستهٔ کد شدهٔ دریافتی شروع به پردازش می‌کند. به این ترتیب یک گرهٔ خاص برای ارسال یک بستهٔ داده، ابتدا یکی از همسایه‌های خود را به عنوان مقصد بعدیِ این بسته انتخاب می‌کند و پس از تعیین کردنِ آدرس این همسایه به عنوان مقصدِ این بسته، بسته را به صورت تک‌پخشی ارسال می‌کند. بدیهی است تمام همسایه‌های این گره اگر در حالت بی‌قید باشند، این بسته را دریافت خواهند کرد. در نهایت تنها همسایه‌ای که به عنوان مقصد این بسته مشخص شده است، تاییدهٔ دریافتِ بسته را برمی‌گرداند. اگر بعد از یک بازهٔ زمانیِ مشخص، تاییدهٔ دریافت از گیرندهٔ اصلی دریافت نشود، بسته از نو ارسال می‌گردد.

اصلاح دوم در IEEE 802.11

ما مکانیزم دست‌تکانیِ RTS/CTS را با کمی تغییرات نیاز داریم. در حالت کلی این پیام‌ها برای برطرف کردن مشکلات ایستگاه پنهان و ایستگاه آشکار استفاده می‌شوند، به این ترتیب که قبل از ارسال بستهٔ داده، مبدا یک بستهٔ RTS را ارسال می‌کند که در آن مقصد و اندازهٔ بستهٔ دادهٔ اصلی مشخص شده است. مقصد نیز با ارسال یک بستهٔ CTS به این بسته پاسخ می‌دهد و سپس مبدا با دریافت بستهٔ CTS ارسال دادهٔ اصلی را آغاز می‌کند و منتظر دریافت تاییده از مقصد می‌ماند. مابقیِ گره‌ها که تبادلِ RTS و CTS را شنیده‌اند باید ارسال داده را به احترامِ این زوج به تعویق بیندازند! تبادل RTS/CTS احتمال

تصادم در مقصد را بسیار کاهش می‌دهد، در صورتی که تصادم‌ها در دیگر گره‌های شنود کننده قابل کشف نیستند؛ اما استفاده از این تکنیک یک تاثیر جانبیِ مفید خواهد داشت: یک بسته ممکن است چندین مرتبه تا دریافت توسط مقصد ارسال مجدد شود که این امر احتمال شنود و دریافت این بسته‌ها را توسط سایر گره‌ها افزایش می‌دهد.

اصلاح سوم در IEEE 802.11

در عمل هنگامی که یک بستهٔ کد شده ارسال می‌گردد، دریافت آن باید توسط همهٔ گره‌هایی که متقاضی این بستهٔ کد شده هستند، تایید گردد. برای این هدف ما از ارسال‌های مجدد محلی استفاده می‌کنیم. در این روش فرستنده انتظار دارد همهٔ گیرندگانِ بستهٔ کدشده که متقاضیِ دریافت آن بسته هستند، دریافت این بسته را تایید کنند، حال اگر یک (یا تعدادی) از گیرندگان دریافتِ این بسته را در یک بازهٔ مشخص تایید نکردند، بستهٔ کد شده از نو ارسال می‌شود، که حتی ممکن است با یک ترکیبِ جدید کد شده باشد و دیگر نیازی به مشارکتِ بسته‌های خالصی که گیرندگانِ آنها دریافت بستهٔ کدشدهٔ قبلی را تایید کرده اند، نیست. متاسفانه در عمل اینگونه ارسال تاییدیه به صورت همگام[10] هزینه و سربار زیادی دارد. به همین دلیل ما ارسال تاییدیه ها را به صورت غیرهمگام[11] انجام می‌دهیم. برای این منظور هنگامی که یک گره تعدادی بستهٔ خالص را با یکدیگر کد کرده و در قالب یک بستهٔ کدشده ارسال کرد، منتظر دریافت تاییدیه از جانب مقاصد همهٔ بسته‌های خالص می‌ماند. اگر تاییدیهٔ برخی از این بسته‌ها در مدت زمانِ T ثانیه دریافت نشد، بستهٔ خالص مورد نظر در ابتدای صف ارسال قرار می‌گیرد. حال این بسته ممکن است با تعدادی بستهٔ خالص دیگر کد شده و در نوبت بعدی ارسال گردد. از طرف مقابل هرگاه یک گره یک بستهٔ کد شده حاویِ یک بستهٔ خالصِ مورد انتظار خود دریافت کرد، باید یک تاییدیه به سمت مقصد ارسال کند. اما در این حالت ارسال تاییدیه ها غیر همگام است. به این ترتیب که اگر گره‌ای بستهٔ داده برای ارسال داشت، چک می‌کند که آیا تاییدیه‌ای منتظر ارسال دارد یا خیر؟ در صورتی که تعدادی تاییدیه در حالت معلق و منتظر ارسال بودند، آنها را در سرآیندِ کدبندی جاسازی کرده و ارسال می‌کند. با این روش نه تنها قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد، بلکه مشکلاتی مانند ایستگاه پنهان نیز از بین می‌رود.

بیان بهینه‌سازی مساله

مساله‌ای که چهارچوب ENCODE بدنبال حل آن است به صورت فرمال به صورت زیر است:

$$maximize\ \overline{\Delta}_i = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{t=0}^{T}\delta_j^t \qquad (۲۸)$$

S. T.

$$\frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N} b_i^j < \overline{B} \qquad (۲۹)$$

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} d_i^t < \overline{D} \qquad (۳۰)$$

به طوریکه در (۲۸) $\overline{\Delta}_i$ عبارتست از منفعت کدبندی گرهٔ i، که باید در کل زمان (T) و به ازای تمام همسایه‌های آن (N)، در این مساله بیشینه گردد. در حالتی که در قید (۲۹)، $\overline{B}$ برابر با متوسط کران بالای اندازهٔ بافر برای دستیابی به کیفیت سرویس مورد نظر لایهٔ کاربرد است. همچنین در قید (۳۰)، $\overline{D}$ متوسط کران بالای میزان تاخیر قابل قبول برای بسته‌های شبکه در لایهٔ کاربرد است.

۶- نتایج عددی

در این بخش ابتدا محیط اجرای شبیه سازی بررسی می گردد، سپس نتایج به دست آمده از فرآیند شبیه‌سازی به کمک ابزار NS2 [۳۳] ارائه می شود. برای ارزیابیِ عملکرد چهارچوب پیشنهادی و بررسی تاثیر عملکرد دو رویکرد بر روی یکدیگر ما از سه سناریوی شبیه‌سازی جداگانه استفاده کرده‌ایم. خلاصهٔ پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است. مدل رادیویی استفاده شده در این شبیه سازی از نوع بازتاب دوپرتویِ زمن انتخاب شده است، همچنین یک تقریب آماریِ سایه‌زنی نیز به مدل رادیویی افزوده شده است. مدولاسیون ارتباط رادیویی از نوع OQPSK انتخاب شده است.

جدول ۱: خلاصه پارامترهای شبیه‌سازی

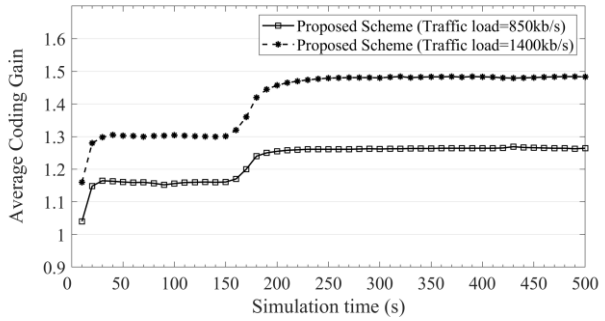
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
محدودهٔ ارسال گره (ρ)	200 m	توان مصرفی برای ارسال	320 μw
اندازهٔ بسته ها	500 B	توان مصرفی برای دریافت	240 μw
تعداد گره ها	200	توان مصرفی در شنود بیکار	150 μw
نوع ترافیک	UDP	نرخ یادگیری در RL (β)	0.5
پروتکل لایهٔ MAC	802.11	فاکتور تخفیف در RL (γ)	0.9
تعدادبسته‌ها برای محاسبهٔ درجهٔکدبندی(c)	15	حداکثر تاخیر پاداش در RL (θ_{max})	8
مدت زمان هر دور شبیه‌سازی	500 s	نرخ جمع آوری انرژی از محیط (ς)	75 $\mu j/s$

۶- ۱- سناریوی اول

هدف اصلیِ این سناریو، بررسی تاثیرِ نحوهٔ تصمیم گیری در *"ارسال یا عدم ارسال"* بر روی روال تصمیم گیریِ *"شنود یا عدم شنود"* است. برای نیل به این هدف، باید ابتدا رویکرد *"شنود یا عدم شنود"* را به صورت پیش فرض بر روی گره‌های شبکه فعال کنیم. با شروعِ روال شبیه سازی، گره‌ها سعی در تکمیلِ فرآیند یادگیریِ خود طبق رویکرد *"شنود یا عدم شنود"* دارند. پس از اجرای شبیه‌سازی‌های روال *"شنود یا عدم شنود"* به این نتیجه رسیدیم پس از گذشت حدودِ ۳۰٪ از زمانِ شبیه‌سازیِ ۵۰۰ ثانیه‌ای، جداول روالِ یادگیری به صورت قابل قبولی به مقادیر خود نزدیک (همگرا) می‌شوند، از این رو ما پس از گذشت ۱۵۰ ثانیه از آغاز روال شبیه سازی، روال *"ارسال یا عدم ارسال"* را در گره‌ها فعال می‌کنیم.

میانگین درجهٔ کدبندی بسته‌های ارسالی

برای ارزیابی بهرهٔ کدبندی، متوسط درجهٔ کدبندی کلیهٔ بسته‌های ارسال شده در کلیهٔ گره‌های میانی اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور میانگین درجهٔ بسته‌های ارسالی در بازه‌های ۵ ثانیه‌ای محاسبه شده و مقدار متوسط درجهٔ کدبندی بسته‌ها در نمودار درج شده است. نتایج به دست آمده از این سناریو در شکل ۱ نشان داده شده و در آن دو نمودار به ازای دو نرخِ متفاوت از ترافیکِ تولید شده رسم شده است. در این حالت، پس از فعال کردن روال *"ارسال یا عدم ارسال"* پس از ۱۵۰ ثانیه، متوسط درجهٔ کدبندی بسته‌ها شروع به افزایش می‌کند و با توجه به ثبات شرایط شبیه سازی در هر دور اجرا به یک مقدار خاص میل می‌کند.



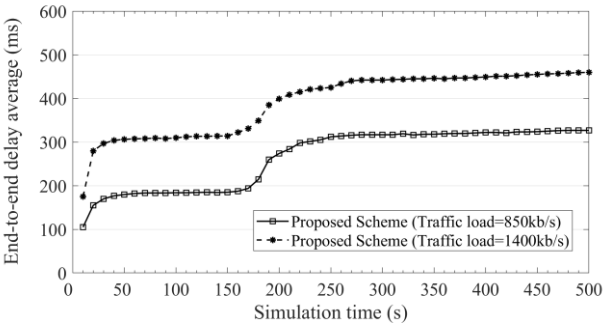
شکل ۱: میانگین درجهٔ کدبندی بسته‌ها در سناریوی اول

[10] Synchronous

[11] Asynchronous

میانگین تاخیر انتها به انتها

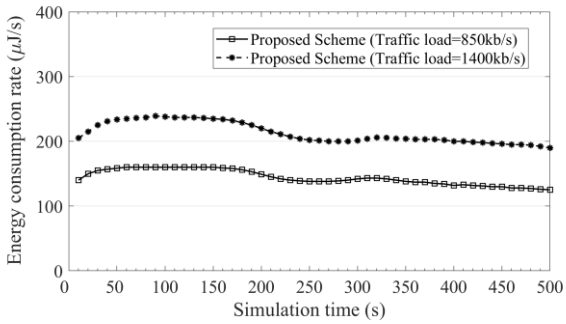
برای اندازه گیری تاخیر انتها به انتها، مدت زمانِ بینِ ارسال از مبدا تا رسیدن به مقصد برای بسته‌های تحویل شده اندازه‌گیری شده‌است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود پس از آنکه در ثانیهٔ ۱۵۰ روال *"ارسال یا عدم ارسال"* را فعال می‌کنیم، میانگین تاخیرهای انتها به انتها افزایش می‌یابد که دلیل آن تاخیرهای تحمیل شده به برخی از بسته‌ها به دلیل روال تصمیم‌گیریِ *"ارسال یا عدم ارسال"* در گره‌های میانی است.



شکل ۲: میانگین تاخیر انتها به انتها در سناریوی اول

میانگین مصرف انرژی

در شکل ۳ هر نقطه بر روی نمودار، میانگین مصرف انرژی در هر ۵ ثانیه را نشان می‌دهد. در این وضعیت و پس از فعال شدن روال *"ارسال یا عدم ارسال"* در گره‌ها، قدری میزان مصرف انرژی کاهش می‌یابد و دلیل آن نیز کاهش تعداد ارسال‌ها در شبکه از طریق افزایش درجهٔ کدبندی بسته‌های ارسالی تشخیص داده شده‌است.



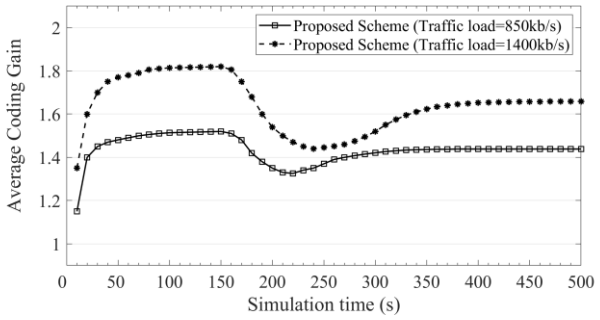
شکل ۳: میانگین مصرف انرژی در سناریوی اول

۶- ۲- سناریوی دوم

هدف اصلیِ این سناریو، بررسی تاثیرِ نحوهٔ تصمیم گیری در *"شنود یا عدم شنود"* بر روی روال تصمیم گیریِ *"ارسال یا عدم ارسال"* است. برای این منظور ابتدا رویکرد *"ارسال یا عدم ارسال"* را به صورت پیش فرض بر روی گره‌های شبکه فعال می‌کنیم و در ادامه گره‌ها سعی در تکمیلِ فرآیند یادگیریِ خود طبق رویکرد *"ارسال یا عدم ارسال"* دارند. پس از مدتی فرآیند تصمیم‌گیریِ *"شنود یا عدم شنود"* را نیز فعال کنیم تاثیر این رویکرد بر روی *"ارسال یا عدم ارسال"* مشخص گردد. برای این منظور پس از گذشتِ حدود ۳۰٪ از زمان شبیه سازی روال *"شنود یا عدم شنود"* را در گره‌ها فعال می‌کنیم.

میانگین درجهٔ کدبندی بسته‌های ارسالی

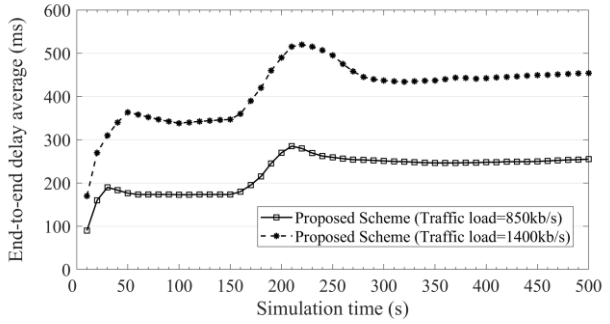
برای ارزیابی بهرهٔ کدبندی، منظور متوسط درجهٔ کدبندی کلیهٔ بسته‌های ارسال شده در کلیهٔ گره‌های میانی را محاسبه می‌کنیم و درجهٔ بسته‌های ارسالی در بازه‌های ۵ ثانیه‌ای به صورت میانگین در در شکل ۴ نشان داده شده است. در این سناریو از ثانیهٔ ۱۵۰ روال *"شنود یا عدم شنود"* فعال می‌گردد که فعال شدن این روال موجب کاهش متوسط درجهٔ کدبندی بسته‌ها می‌گردد.



شکل ۴: میانگین درجهٔ کدبندی بسته‌های ارسالی در سناریوی دوم

میانگین تاخیر انتها به انتها

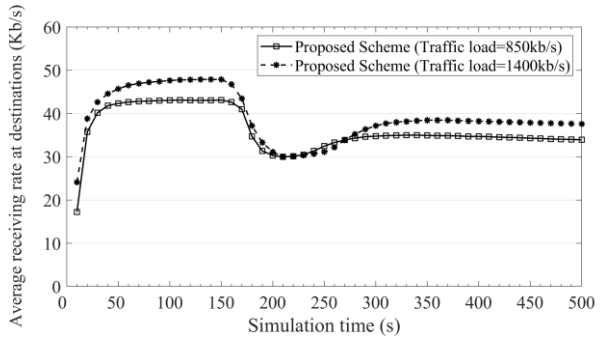
میانگین تاخیر انتها به انتها در بازه‌های ۵ ثانیه‌ای در شکل ۵ گزارش شده‌است. با فعال شدنِ رویکرد *"شنود یا عدم شنود"* قدری تاخیر انتها به انتها افزایش می‌یابد تا در نهایت جداولِ یادگیری در پروسهٔ *"شنود یا عدم شنود"* به مقادیر مناسبی نزدیک شوند، اما با این حال کماکان میزان تاخیر بسته‌ها به اندازهٔ قبل از فعال‌سازیِ *"شنود یا عدم شنود"* برنمی‌گردد.



شکل ۵: میانگین تاخیر انتها به انتها در سناریوی دوم

نرخ دریافت در مقاصد نهایی

نرخ دریافت بسته‌ها در مقاصد به عنوان تخمینی از توان گذردهی در شکل ۶ آمده است. همانطور که در این شکل نمایان است، پس از فعال‌سازیِ روال *"شنود یا عدم شنود"* درجهٔ کدبندی بسته‌های ارسالی کاهش یافته و نرخ دریافت بسته‌ها در مقصدها قدری کاهش می‌یابد.



شکل ۶: میانگین نرخ دریافت بسته‌ها در مقصدها در سناریوی دوم

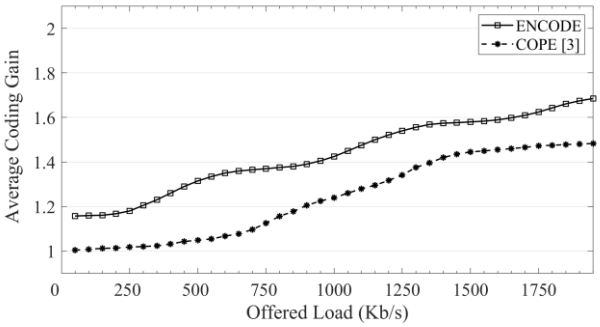
۶- ۳- سناریوی سوم

پس از بررسی پارامتریک و عددیِ تاثیرِ دو رویکرد *"ارسال یا عدم ارسال"* و *"شنود یا عدم شنود"* بر روی یکدیگر، حال نوبت پیاده سازیِ توأمان هر دو رویکرد و مقایسهٔ چهارچوب پیشنهادیِ ENCODE با چهارچوب مرجعِ COPE [۳] است. در این بخش هر دو رویکرد *"ارسال یا عدم ارسال"* و *"شنود یا عدم شنود"* به صورت همزمان در گره‌های شبکه فعال هستند.

میانگین بهرهٔ کدبندی

نتایج حاصل از میانگین بهرهٔ کدبندی *ENCODE* و COPE در شکل ۷

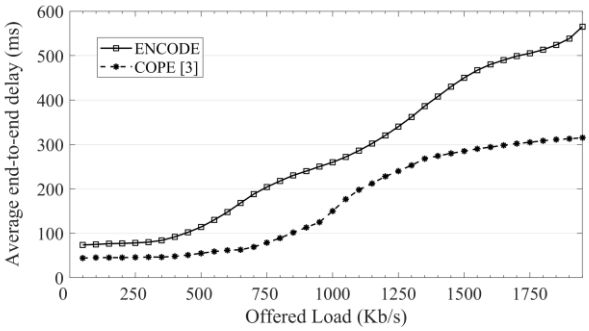
نمایش داده شده است. همانطور که در شکل پیداست، بهرهٔ کدبندی در چهارچوب *ENCODE* قدری از COPE بالاتر است که بیشتر نتیجهٔ تاثیر مثبت رویکرد تصمیم‌گیریِ *"ارسال یا عدم ارسال"* بر این پارامتر است.



شکل ۷: مقایسهٔ میانگین بهرهٔ کدبندی بین *ENCODE* و COPE

متوسط تاخیر انتها به انتها

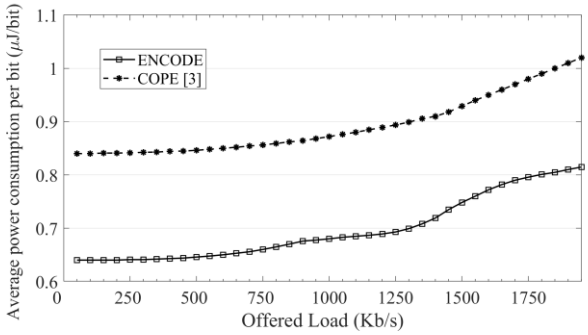
در شکل ۸ متوسط تاخیر انتها به انتهای به دست آمده در چهارچوب *ENCODE* و COPE گزارش شده است. همانطور که در نتایج به خوبی قابل مشاهده است، چهارچوب *ENCODE* هزینهٔ بهبود سایر پارامترهای کارآیی را از طریق افزایش تاخیر انتها به انتها پرداخت می‌کند!



شکل ۸: مقایسهٔ تاخیر انتها به انتها در *ENCODE* و COPE

میانگین مصرف انرژی

در شکل ۹ میانگین مصرف انرژی به ازای هر بیتِ تحویل شده به مقصد، در دو چهارچوب *ENCODE* و COPE آمده است. چهار چوب *ENCODE* عملکرد قابل قبولی در راستای کاهش مصرف انرژی دارد. عمدهٔ این صرفه جوی در مصرف انرژی به دلیل استفاده از رویکرد *"شنود یا عدم شنود"* و سعی در کاهش شنودهای بیهوده برای عملیات کدبندی توسط گره‌ها است.

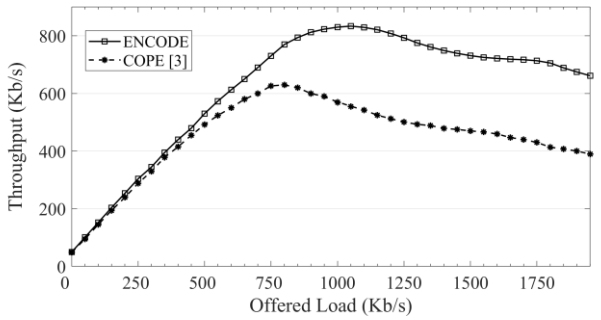


شکل ۹: مقایسهٔ میانگین مصرف انرژی به ازای هر بیت در *ENCOE* و COPE

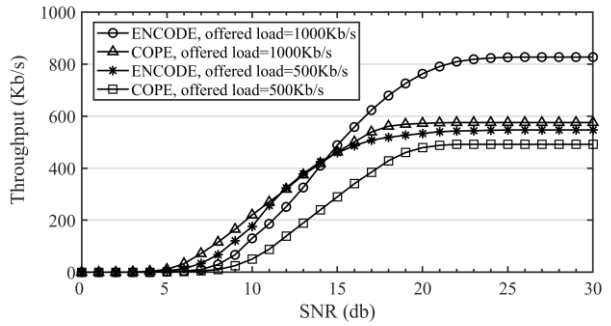
گذردهی

در شکل ۱۰ میزان گذردهی در دو چهارچوب *ENCODE* و COPE با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با افزایش حجم ترافیک در شبکه (از طریق افزایش تعدادِ جریان‌ها)، گذردهی در هر درو چهارچوب افزایش می‌یابد تا شبکه به اشباع خود نزدیک شود. در هر دو چهارچوب پس از اینکه حجم ترافیک در شبکه به حد اشباع نزدیک می‌شود و از آن عبور می‌کند، عملیات کدبندی و ترکیب بسته‌ها قدری کاهشِ گذردهی شبکه را به تعویق می‌اندازد.

در شکل ۱۱ تاثیر خطا در کانال بر روی توان گذردهی دو چهارچوب با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در سناریوهای گذشته، میزان SNR برابر با 25db تنظیم شده بود. افزایش نرخ خرابیِ بیت‌ها موجب از بین رفتن برخی از بسته‌ها خواهد شد. در این حالت دو نرخ دادهٔ تحمیل شده به شبکه را بررسی کرده‌ایم، یکی ۵۰۰ کیلوبیت در هر ثانیه و دیگری ۱۰۰۰ کیلوبیت در هر ثانیه؛ اولی برای بررسی شرایطِ پیش از اشباع شبکه، و دومی برای شرایطِ در آستانهٔ اشباع شبکه.



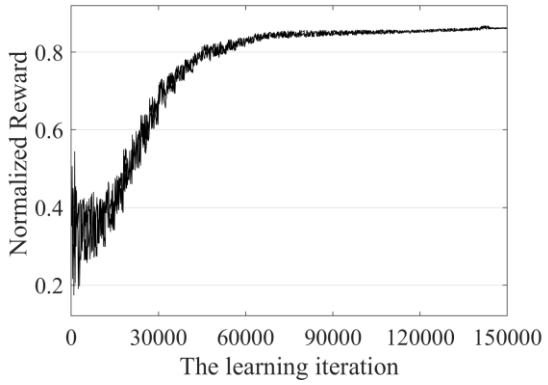
شکل ۱۰: مقایسهٔ گذردهی در *ENCODE* و COPE



شکل ۱۱: تاثیر SNR در گیرنده‌ها بر گذردهی در *ENCODE* و COPE

همگرایی روال یادگیری گره‌ها

در شکل ۱۲ زمان همگرایی روال یادگیری یک گره، در سناریوی سوم و در حالتی که هر دو رویکرد به طور همزمان در حال استفاده هستند، نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، حدوداً بعد از شصت‌هزار دور روال یادگیری به همگرایی مناسبی دست پیدا می‌کند.

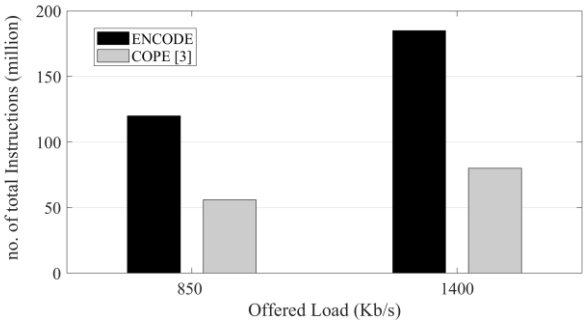


شکل ۱۲: همگرایی روال یادگیری گره‌ها در *ENCODE*

پیچیدگی محاسباتی

در شکل ۱۳ سربار محاسباتی در دو چهارچوب *ENCODE* و COPE با هم مقایسه شده‌اند. برای این منظور تعداد کل دستورات مربوط به فرآیند کدبندی در کل فرآیند شبیه‌سازی به ازای دو نرخ دادهٔ تحویل شده به شبکه شمارش شده‌اند. همانطور که در شکل قابل پیگیری است، سربار محاسباتی چهارچوب *ENCODE* از راهکار COPE بالاتر است و این به دلیل پیچیدگی محاسباتی فرآیندهای تصمیم گیری در چهارچوب

ENCODE است. چهارچوب COPE برای انتخاب الگوهای کدبندی بین بسته‌های مختلف از یک راهکار ساده‌تر نسبت به چهارچوب ENCODE، با دو رویکرد تصمیم‌گیری استفاده می‌کند.



شکل ۱۳: مقایسهٔ سربار محاسباتی در *ENCODE* و COPE

۷- نتیجه گیری

رسالت این مقاله، ارائهٔ یک چهارچوب جامع و کارآ برای استفاده از کدبندی شبکه در شبکه‌های بی‌سیم چندپرشی مبتنی بر ترکیب و استفادهٔ توامانِ دو رویکرد تصمیم‌گیریِ "ارسال یا عدم ارسال" و "شنود یا عدم شنود" تعیین شده‌بود. برای این ترکیب، مدل سیستم باز تعریف شده و تاثیر دو رویکرد بر روی عملکرد یکدیگر به طور دقیق ارزیابی شد. در نهایت چهارچوب پیشنهادی با عنوان ENCODE با چهارچوب COPE (به عنوان مدل مرجع) مقایسه شده و مزایا و معایب هر کدام به دست‌آمد.

مراجع

[1] R. Ahlswede, et al., "Network information flow," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 46, no. 4, pp. 1204-1216, 2000.

[2] F. Zhu, et al., "Practical Network Coding Technologies and Softwarization in Wireless Networks," IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 7, pp. 5211-5218, 2021.

[3] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard and J. Crowcroft, "XORs in the air: practical wireless network coding," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 16, no. 3, p. 497–510, 2008.

[4] S. Abdullah, M. N. Asghar, M. Fleury, et al., "Network-Coding-Enabled and QoS-Aware Message Delivery for Wireless Sensor Networks," Wireless Personal Communications, (DOI: https://doi.org/10.1007/s11277-023-10613-y), 2023.

[5] A. Singh and A. Nagaraju, "Low latency and energy efficient routing-aware network coding-based data transmission in multi-hop and multi-sink WSN," Ad Hoc Networks, vol. 107, p 102182, 2020.

[6] N. Taheri Javan, M. Sabaei and M. Dehghan, "To Send or Not to Send: An Optimal Stopping Approach to Network Coding in Wireless Multihop Networks," International Journal of Communication Systems (IJCS), Vol. 31, no. 2, 2018.

[7] D. Ciocan and V. Mišić, "Interpretable optimal stopping," Management Science, vol. 68, no. 3, pp. 1616–1638, 2022.

[8] N. Taheri Javan, M. Dehghan and M. Sabaei, "To Overhear or Not to Overhear: A Dilemma between Network Coding Gain and Energy Consumption in Multi-hop Wireless Networks," Wireless Networks, vol. 25, pp. 4097-4113, 2019.

[9] M. Baykal-Gursoy, "Semi-Markov decision processes: nonstandard criteria," Probability in the Engineering and Informational Sciences, vol. 21, no. 1, p. 635–657, 2007.

[10] W. Chen, K. B. Letaief and Z. Cao, "Opportunistic Network Coding for Wireless Networks," IEEE International Conference on Communication (ICC), pp. 4634-4639, 2007.

[11] Y. P. Hsu, et. al., "Opportunities for Network Coding: To Wait or Not to Wait," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 23, no. 6, pp. 1876-1889, 2015.

[12] Y. P. Hsu and A. Sprintson, "Opportunistic Network Coding: Competitive Analysis," NetCod Conference, pp. 191-196, 2012.

[13] J. Goseling, R. J. Boucherie and J. K. Ommeren, "Energy Consumption in Coded Queues for Wireless Information Exchange," in proc. of NetCod Conference, pp. 30-35, 2010.

[14] A. Mohapatra, et. al., "Network Coding Decisions for Wireless Transmissions With Delay Consideration," IEEE Transactions on Communications, vol. 64, no. 8, pp. 2965-2976, 2014.

[15] O. H. Abdelrahman and E. Gelenbe, "Performance Trade-offs in a Network Coding Router," in Proc. of 19th International Conference on Computer Communications and Networks, pp. 1-6, 2010.

[16] J. T. C. Gunasekara, et. al., "A Queueing Theoretic Model For Opportunistic Network Coding," International Conference on Networking and Communications (ICNC), pp. 999-1004, 2013.

[17] E. N. Ciftcioglu, Y. E. Sagduyu, R. A. Berry and A. Yener, "Cost-Delay Tradeoffs for Two-Way Relay Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, no. 12, pp. 4100-4109, 2011.

[18] 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, no. 5, pp. 2863-2873, 2014.

[19] Y. E. Sagduyu and A. Ephremides, "Some Optimization Trade-offs in Wireless Network Coding," 40th Annual Conference on Information Science and Systems, pp. 6-11, 2006.

[20] H. Y. Shwe and X. Jiang, "Efficient power savings in wireless sensor networks with network coding and overhearing avoidance," International Journal of Computer Engineering Research, vol. 2, no. 2, pp. 34-44, 2011.

[21] K. Samarasinghe, T. Voigt, L. Mottola and U. Roeding, "Network Coding with Limited Overhearing," 8th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN '11), 2011.

[22] K. H. Lee, J. H. Kima and S. Cho, "Power saving mechanism with network coding in the bottleneck zone of multimedia sensor networks," Computer Networks, Vol. 96, no 1, pp. 58-68, 2016.

[23] R. Chandanala, W. Zhang, R. Stoleru and M. Won, "On combining network coding with duty-cycling in flood-based wireless sensor networks," Ad Hoc Networks, vol. 11, no. 1, pp. 490-507, 2013.

[24] R. P. Trujilloa, et. al., "Network Coding and Duty Cycling in IEEE 802.11 Wireless Networks with Bidirectional Transmissions and Sleeping Periods," IEEE GLOBECOM '15, pp. 1-7, 2015.

[۲۵] م. محصل فقهی، «همگام‌سازی توأم زمانی و فرکانسی در سیستم‌های مخابراتی بر پایه استاندارد IEEE 802.11»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۹، شماره ۲، صفحه ۸۴۷-۸۵۸، تابستان ۱۳۹۸.

[26] Y. Yuan, K. Wu, W. Jia and Y. Peng, "On the queueing behavior of inter-flow asynchronous network coding," Computer Communications, vol. 35, pp. 1535-1548, 2012.

[27] T. Ferguson, "Optimal Stopping and Applications," Math. Dept., Univ. Calif., Los Angeles, CA, USA, Available: http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html, 2006.

[28] S. Ergun, I. Sammour and G. Chalhoub, "A survey on how network simulators serve reinforcement learning in wireless networks," Computer Networks, p.109934, 2023.

[29] M. Ghavamzadeh and S. Mahadevan, "Continuous-time hierarchical reinforcement learning," 18th International Conference on Machine Learning, pp. 186-193, 2001.

[30] H. Ojukwu, et. al., "Metasurface-Aided Wireless Power Transfer and Energy Harvesting for Future Wireless Networks," IEEE Access, vol. 10, pp. 52431-52450, 2022.

[31] D. K. Sah, S. Srivastava, R. Kumar, et al., "An energy efficient coverage aware algorithm in energy harvesting wireless sensor networks," Wireless Networks, vol. 29, pp. 1175–1195, 2023.

[۳۲] م. حامدیان، ب. شاهقلی قهفرخی و ن. مقیم، «یک پروتکل MAC آگاه از کیفیت تجربه کاربر مبتنیبر استاندارد IEEE802.11e»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحه ۴۶۹-۴۸۰، تابستان ۱۳۹۶.

[33] NS2, avalable at "http://www.isi.edu/nsnam/ns/," [Online].