

تحلیل روش کدگذاری شبکه تنک برای نرم افزارهای بلادرنگ

امیر زارعی^۱، کارشناسی ارشد علوم کامپیوتر، ساناز محمدی^۲، کارشناسی ارشد علوم کامپیوتر، پیمان پهلوانی^۳، استادیار

۱- دانشکده علوم رایانه و فناوری اطلاعات - دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان - ایران - az.hldv@gmail.com

۲- دانشکده علوم رایانه و فناوری اطلاعات - دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان - ایران - mohammadi.s@iasbs.ac.ir

۳- دانشکده علوم رایانه و فناوری اطلاعات - دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان - ایران - pahlevani@iasbs.ac.ir

چکیده: کدگذاری شبکه تنک به عنوان یک روش جهت کاهش پیچیدگی محاسباتی روش کدگذاری شبکه خطی تصادفی معرفی شد. در این روش برخلاف روش کدگذاری شبکه خطی تصادفی بیشتر ضرایب ماتریس کدگشایی صفر است. این تغییر باعث کاهش قابل توجه پیچیدگی محاسباتی الگوریتم های کدگشایی می شود. کدگشایی جزئی به معنای امکان کدگشایی بخشی از بسته های خام (پیش از دریافت بسته های مورد نیاز برای کدگشایی همه بسته های خام) تعریف می شود و یکی از قابلیت های روش کدگذاری شبکه تنک است. در این مطالعه با بهره بردن از قابلیت ذکر شده، با ارائه سه مدل مختلف روش کدگذاری تنک را به عنوان یک رویکرد برای کاهش تأخیر کدگشایی در نرم افزارهای بلادرنگ بررسی می کنیم. به طور دقیق تر ما ابتدا، با معرفی یک مدل مبتنی بر زنجیره ی مارکوف، کدگذاری شبکه تنک را برای پیکربندی بدون یازخورد از لحاظ عملکردهای تعداد ارسال های مورد نیاز و میانگین تأخیر کدگشایی بسته برای یک نسل از بسته های خام ارزیابی می کنیم. سپس صحت مدل ارائه شده را با استفاده از شبیه سازی گسترده ارزیابی کرده و نشان می دهیم مدل ارائه شده قادر به ارزیابی دقیق تعداد ارسال های مورد نیاز و تأخیر کدگشایی بسته برای یک نسل از بسته های خام است. نتایج همچنین صحت مدل در کانال خطا دار را هم ارزیابی می کند. در ادامه مدل مبتنی بر بازخورد را معرفی می کنیم و در بخش شبیه سازی نشان می دهیم این مدل قادر به ایجاد یک تعادل بهتر بین عملکرد تعداد ارسال و میانگین تأخیر کدگشایی بر بسته است. در آخر با تمرکز بر مسئله پیدا کردن درخت پوشای تصادفی یک مدل مینی بر گراف برای تحلیل کدگذاری شبکه تنک ارائه می کنیم و نشان می دهیم اگرچه مدل معرفی شده فقط برای تنکی ۲ معتبر است، اما ظرفیت توسعه برا تنکی های کمتر را نیز دارا است.

واژه های کلیدی: کدگذاری شبکه خطی تصادفی، کدگذاری شبکه تنک، تعداد ارسال ها، میانگین تأخیر کدگشایی.

Analysis of Sparse Network Coding Method for Real-Time Applications

Amir Zaree, MSc Student¹, Sanaz Mohammadi, MSc Student², Peyman Pahlevani, Assistant Professor³

1- Department of Engineering - Network Computing, Communications and Storage at Aarhus University, Denmark
Email: az.hldv@gmail.com

2- Department of Computer Science and Information Technology, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran, Email: mohammadi.s@iasbs.ac.ir

3- Department of Computer Science and Information Technology, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran, Email: pahlevani@iasbs.ac.ir

Abstract: Sparse network coding was introduced to reduce the computational complexity of the random linear network coding. In this method, most of the decoding matrix coefficients are zero. Partial decoding means the possibility of decoding a part of the raw packets is one of the capabilities of the sparse network coding method. We introduce three different models of sparse coding method as an approach to reduce decoding latency in real-time communication. More precisely, we first evaluate a sparse network coding for a no feedback configuration in terms of the performance of the total number of transmissions required, and the average packet decoding delay for a generation of raw packets, by introducing a Markov chain-based model. Then we evaluate the accuracy of the proposed model using extensive simulation and show that the proposed model can accurately estimate the number of required transmissions and decoding delay for a generation of packets. The results also evaluate the accuracy of the model in the erasure channel. In the following, we introduce the feedback-based model and we show that this model can create a better balance between the functions of the number of transmissions and the average decoding delay per packet. Finally, by focusing on the problem of finding the random spanning tree, we present a graph-based model for analyzing sparse network coding and show that although the proposed model is valid only for grade 2 sparsity, it also has the capacity to develop for lower sparsity.

Keywords: Random linear network coding, Sparse network coding, Number of packet transmissions, Average decoding delay.

نام نویسنده مسئول: پیمان پهلوانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - جاده گاوزنگ - دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - دانشکده علوم رایانه و فناوری اطلاعات

۱- مقدمه

نتایج شبیه سازی نشان می دهد وجود بازخورد تأثیر بسزایی در کاهش سربار تعداد ارسال این روش دارد.

۲- کارهای گذشته و انگیزه

اولین مدل برای کدگذاری شبکه تنک توسط گریبدو و همکاران معرفی شد [۳]. آن ها برای مدل سازی کدگذاری شبکه تنک در یک پیکره بندی شامل یک فرستنده و یک گیرنده، یک زنجیره مارکف^{۱۳} ارائه کردند. هدف از این مدل سازی ارزیابی عملکرد تعداد ارسال های مورد نیاز برای کدگذاری یک نسل است. اگرچه مدل ارائه شده از دقت بالایی برای تخمین تعداد ارسال های مورد نیاز بهره می برد، مهمترین مشکل آن استفاده از شبیه سازی مونت کارلو برای تولید تابع احتمال مستقل خطی بودن یک بسته در مدل است.

سنقوی برای اولین تعداد ارسال های مورد نیاز برای کدگذاری یک نسل را برای کدهای آبخاری تنک بررسی کرد [۱۰]. او با در نظر گرفتن یک پیکره بندی شامل یک فرستنده و یک گیرنده توانست با معرفی یک تابع توزیع احتمال تعداد بسته های حاصل از کدگذاری جزئی را برای هر تعداد ارسال به بالاترین مقدار ممکن (بهینه) برساند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در کدهای آبخاری فرستنده بر اساس یک تابع توزیع احتمال تعدادی بسته خام را ترکیب کرده (کد کرده) به طرف گیرنده ارسال می کند. هدف ارائه چنین تابعی بهینه کردن تعداد ارسال مورد نیاز است. با این وجود مدل ارائه شده قابلیت پیاده سازی را برای اندازه ی نسل های ثابت ندارد.

تلمی و همکاران اولین مدل عملیاتی جهت ارزیابی کدگذاری را برای کدهای آبخاری معرفی کردند [۱۱]. اگرچه مدل ارائه شده از لحاظ کدگذاری جزئی در سمت گیرنده بهینه است اما آنها برای کد کردن بسته های خام با اندازه k در سمت گیرنده از یک الگوریتم با پیچیدگی زمانی $O(k^2)$ استفاده می کنند. مطالعاتی هم مانند کارهای [۱۲، ۱۳] مدل های عملیاتی و بهینه ای برای ارزیابی کدگذاری جزئی معرفی کردند اما همه آنها از بازخورد گیرنده بهره می بردند در حالی که امکان بازخورد برای همه سیستم ها عملیاتی نیست.

بر اساس مطالعه انجام شده در [۱۴] کدگذاری جزئی یکی از قابلیت های کدگذاری شبکه تنک است و این قابلیت می تواند تأثیر بسزایی در کاهش یا افزایش تأخیر دریافت داده در نرم افزار های بلادرنگ^{۱۴} را داشته باشد. پژوهش انجام شده در [۱۵] تأثیر اندازه ی میدان منتهای بر عملکردهای تعداد ارسال و تأخیر کدگذاری نیز پوشش دهد. اگرچه نویسندگان برای کانال خطی یک مدل ریاضیاتی ارائه کرده اند اما نتایجی که صحت مدل برای پیکره بندی خطی را نشان دهد وجود ندارد.

شبیه سازی های ما در شکل ۱ تأثیر تنکی (ω) و اندازه ی میدان (q) بر عملکرد تعداد ارسال های مورد نیاز برای کدگذاری یک نسل از بسته های خام (T_n) را با استفاده از دو روش کدگذاری شبکه تنک (SNC) و خطی تصادفی ($RLNC$) نشان می دهد. به طور کلی هرچه

نسل پنجم ارتباطات^۱ به طور کلی به عنوان نسلی که موانع و مشکلات نسل چهارم را برطرف می کند، معرفی می شود [۱، ۲]. یکی از اهداف ارائه ی این نسل کاهش تأخیر دریافت بسته ها در بستر اینترنت بی سیم است، به ویژه در شبکه های ارتباطی که مستعد خطا هستند^۲. کدگذاری شبکه^۳ یکی از روش های نوظهوری است که پتانسیل کاهش تأخیر دریافت اطلاعات را در نسل پنجم وعده می دهد [۳]. مفهوم کدگذاری شبکه به عنوان یک راهبرد نوین با قابلیت ترکیب بسته های کد شده در گره های میانی شبکه معرفی شد. در این روش برخلاف سایر روش های کدگذاری مانند کدهای آبخاری^۴ گره های میانی قادر به کدگذاری مجدد^۵ بسته های کد شده هستند. مطالعات بسیاری توان عملیاتی بهتر شبکه های مستعد خطا و شبکه هایی با پیکره بندی شامل گره های میانی را در صورت استفاده از این روش نشان داده اند [۴، ۵].

روش کدگذاری خطی تصادفی^۶ [۶، ۷] پیاده سازی عملیاتی روش کدگذاری شبکه است. از دیدگاه عملیاتی تعداد بسته های خام و اندازه ی میدان منتهای^۷ دو ورودی مهم این روال هستند. در این روش فرستنده یا همان کدگذار^۸ بسته های خام را بر مبنای روش های جبری و استفاده از یک میدان منتهای به صورت خطی کد کرده و گیرنده یا همان کدگشا^۹ پس از دریافت تعداد بسته کد شده مورد نیاز با تشکیل یک ماتریس کدگذاری قادر به کدگذاری بسته های خام خواهد بود. تعداد ارسال های مورد نیاز برای کدگذاری یک نسل از بسته های خام، تأخیر کدگذاری و طول بسته کد شده سه چالش اصلی در استفاده این روش هستند. اگرچه روش کدگذاری خطی تصادفی از لحاظ عملکرد تعداد ارسال یک روش بهینه در نظر گرفته می شود، اما از لحاظ تأخیر کدگذاری وابسته به اندازه میدان منتهای عملکردهای متفاوتی دارد.

کدگذاری شبکه تنک^{۱۰} از دیدگاه عملیاتی همان روش کدگذاری خطی تصادفی است با این تفاوت که برای ساختن هر بسته کد شده ضرایب بیشتر بسته های خام صفر در نظر گرفته می شود. در نتیجه ماتریس کدگذاری^{۱۱} یک ماتریس تنک خواهد بود. این ویژگی به طور قابل توجهی باعث کاهش پیچیدگی محاسباتی عملیات کدگذاری می شود [۸، ۹]. اما سربار تعداد ارسال را به سیستم تحمیل می کند. یکی از نتایج پیاده سازی روش کدگذاری شبکه تنک قابلیت کدگذاری جزئی^{۱۲} است. در واقع در این روش فرستنده پس از دریافت تعداد کمی بسته ی کد شده قادر به شروع کدگذاری بخشی از بسته های خام خواهد بود و برخلاف کدگذاری شبکه خطی تصادفی لازم نیست حتماً تعداد زیادی بسته ی کد شده برای شروع عملیات کدگذاری دریافت کند.

نماد ω عرض پنجره ی ارسال می باشد، در این روش یک بسته ی کد شده را ω تنک در نظر می گیریم اگر تعداد ضرایب غیر صفر بسته کد شده ω باشد. مدل های تحلیلی ارائه شده تاکنون، کدگذاری شبکه تنک را در یک پیکره بندی بدون بازخورد در نظر گرفته اند در حالی که

در این مقاله روش کدگذاری شبکه تنک با بازخورد پیشنهاد شده است. این روش ترکیب روش کدگذاری شبکه تنک و روش تکرار درخواست اتوماتیک (ARQ) [۱۶] می‌باشد. این روش بدین صورت عمل می‌کند که زمانی که بسته‌ای یا بسته‌هایی در گیرنده کدگشایی شده، یک بازخورد به فرستنده ارسال می‌شود. فرستنده بسته‌هایی که کدگشایی شده‌اند را از فرآیند کدگذاری حذف می‌کند. بدین ترتیب این روش از ارسال تکراری بسته‌های کدگشایی شده جلوگیری می‌کند. در بخش نتایج آزمایش‌های مربوط به شبیه‌سازی و مقایسه‌ی دو روش کدگذاری تنک و کدگذاری شبکه با بازخورد آمده است. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش با بازخورد تعداد ارسال‌ها را ۳۵ درصد و میانگین زمان کدگشایی برای هر بسته را ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. نتایج ثابت می‌کند روش ارائه شده می‌تواند یک تعادل بین عملکردهای ذکر شده ایجاد کند.

در ادامه یک مدل مبتنی بر گراف برای ارزیابی عملکرد کدگذاری شبکه تنک از لحاظ تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای کدگشایی یک نسل ارائه می‌شود. مدل معرفی شده جدید و ابزار مناسبی برای ارزیابی عملکرد کدگذاری شبکه است. اگرچه مدل برای تنکی با اندازه ۲ معتبر است اما ظرفیت توسعه برای تنکی‌های مختلف را دارد. در انتها با توجه به مدل گرافی بدست آمده کران بالایی برای تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای کدگشایی یک نسل ارائه می‌شود.

۴- مدل سازی ریاضی

در یک سیستم مبتنی بر کدگذاری شبکه تنک یک فرستنده قصد دارد یک نسل از بسته‌های خام را به یک گیرنده ارسال کند. یک گام زمانی را مدت زمان ارسال یک بسته کدشده از فرستنده به گیرنده در نظر می‌گیریم. نسل S شامل n بسته خام را به صورت زیر تعریف می‌کنیم. هر آنچه که در این بخش آمده است از مقاله [۱۵] برگرفته شده است.

$$S = \{S_i\}_{i=1}^n \quad (1)$$

در گام زمانی j یک بسته‌ی کدشده با تنکی ω به صورت زیر ساخته می‌شود.

$$u_j = \sum_{i=1}^{\omega} g_{f(i),j} \times S_{f(i)} \quad (2)$$

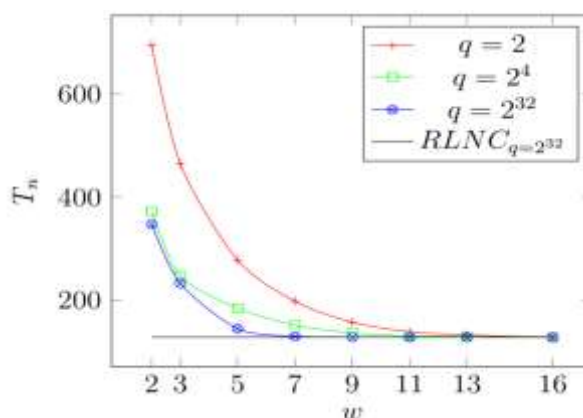
جایی که $f(i)$ ها به صورت تصادفی از مجموعه $\{1, \dots, n\}$ انتخاب می‌شود. همچنین ضرایب $g_{f(i),j}$ نیز به صورت تصادفی از اعضای مجموعه $G \in F_q$ (میدان متناهی) بر طبق توزیع زیر انتخاب می‌شوند.

$$p(g_{i,j} = v) = \frac{1}{q} \quad \forall v \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\} \quad (3)$$

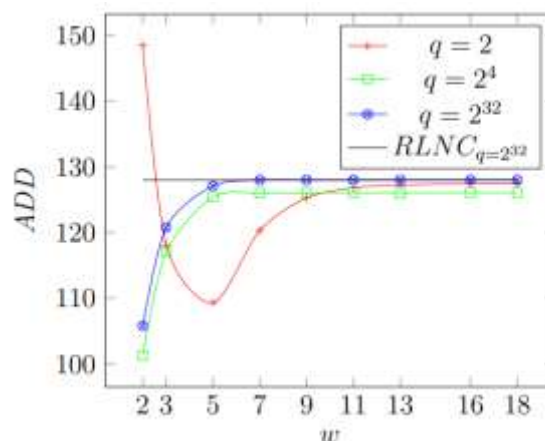
اگر u_1, \dots, u_m نمایش‌دهنده مجموعه بسته‌های دریافت شده برای کدگشایی نسل s و $m \geq n$ ، ماتریس M نمایش‌دهنده ماتریس

تنکی بی‌شتر با شد و میدان کوچک‌تر با شد. سربار تعداد از سال روش کدگذاری تنک بیشتر است.

شکل ۲ از [۱۵] تأثیر تنکی (ω) و اندازه میدان (q) را بر عملکرد میانگین تأخیر کدگشایی بسته برای کدگشایی یک نسل از بسته‌های خام (ADD) را با استفاده از دو روش کدگذاری شبکه تنک (SNC) و خطی تصادفی (RLNC) نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد کدگذاری شبکه تنک عملکرد بهتری برای $3 \leq \omega \leq 9$ از نظر میانگین تأخیر کدگشایی بسته ارائه می‌کند. شکل ۲و۱ به وضوح اهمیت ارائه‌ی یک مدل که بین عملکردهای تعداد ارسال و تأخیر کدگشایی تعادل ایجاد کند را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای کدگشایی یک نسل (T_n) با ۱۲۸ بسته خام



شکل ۲: میانگین تأخیر کدگشایی بر بسته (ADD) برای نسلی از ۱۲۸ بسته خام

۳- نوآوری‌ها

نوآوری این مقاله به این صورت است که مدل سازی ریاضی برای روش کدگذاری تنک که در [۱۴، ۱۵] معرفی شده است را برای کانال‌های با خطا ارائه کرده و مشخص می‌نماییم که عملکرد آن‌ها در کانال‌های خطا دار چیست که در مقاله‌های پیشین در نظر گرفته نشده است. نتایج شبیه‌سازی در کانال‌های خطا دار در بخش ۷ آمده است.

تعریف ۳: با استفاده از تعریف ۲ تأخیر کدگذاری نسل S به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$ADD = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (8)$$

۴-۱- مدل مارکوف

در این بخش سیستم مبتنی بر کدگذاری شبکه تنک را با یک زنجیره مارکف جذب‌کننده^{۱۷} مدل خواهیم کرد. هر آنچه که در این بخش آمده است از مقاله [۱۵] برگرفته شده است.

هر حالت از مدل مارکف را با دو تایی (c, t) تعریف می‌کنیم جایی که t تعداد بسته‌های کدشده جمع‌آوری شده برای پوشش c بسته خام است. هر بسته جدید منجر به تغییر حالت از (c, t) به $(c+i, t+1)$ خواهد شد.

معادله (۳) به طور مشخص نشان می‌دهد با کاهش اندازه میدان متناهی q احتمال انتخاب ضریب صفر افزایش پیدا می‌کند. برای مثال

$$Y = MX = [M \quad MS] \Rightarrow \quad (9)$$

$$RREF(Y) = [I_k \quad S]$$

برای $q=2$ ضرایب از مجموعه $\{0,1\}$ انتخاب خواهند شد، در نتیجه احتمال $P(g_{i,t}=0)$ برابر با $1/5$ است. این مقدار تأثیر قابل توجهی بر روی احتمال تولید بسته وابسته خطی خواهد داشت. بنابراین کافی است تأثیر اندازه‌ی میدان به احتمال‌های گذر اضافه شود. احتمال گذار $p_{c,t}^{\omega,n}(i)$ بین حالت‌های (c, t) و $(c+i, t+1)$ برای $\omega=3$ به صورت زیر قابل محاسبه است.

برای حالت $i=0, i=1, i=2$ داریم:

$$p_{c,t}^{\omega,n}(i=0) = \binom{c}{3} \times \left(\frac{\binom{c}{2} \times \binom{n-c}{1}}{\binom{n}{3}} \times \left(\frac{1}{q}\right)^1 \right) \times \left(\frac{\binom{c}{1} \times \binom{n-c}{2}}{\binom{n}{3}} \times \left(\frac{1}{q}\right)^2 \right) \times \left(\frac{\binom{n-c}{3}}{\binom{n}{3}} \times \left(\frac{1}{q}\right)^3 \right). \quad (10)$$

$$p_{c,t}^{\omega,n}(i) = \begin{cases} 0, & \text{if } (c,t) \in A, \\ \sum_{j=i}^{b_2} \frac{\binom{c}{\omega-j} \times \binom{n-c}{j}}{\binom{n}{\omega}} \times \left(1 - \frac{1}{q}\right)^j \times \left(\frac{1}{q}\right)^{j-i} \times \binom{j}{i}, & \text{if } (c,t) \notin A_i \in B_{n,c,\omega}, \end{cases} \quad (11)$$

$$p_{c,t}^{\omega,n}(i=0) = \binom{c}{3} \times \left(\frac{\binom{c}{2} \times \binom{n-c}{1}}{\binom{n}{3}} \times \left(\frac{1}{q}\right)^1 \right) \times \left(\frac{\binom{c}{1} \times \binom{n-c}{2}}{\binom{n}{3}} \times \left(\frac{1}{q}\right)^2 \right) \times \left(\frac{\binom{n-c}{3}}{\binom{n}{3}} \times \left(\frac{1}{q}\right)^3 \right). \quad (12)$$

کدگذاری در سمت گیرنده باشد بنابراین رابطه بین u_1, \dots, u_m و s_1, \dots, s_n را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M = \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & g_{1,3} & \dots & g_{1,n} \\ g_{2,1} & g_{2,2} & g_{2,3} & \dots & g_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m,1} & g_{m,2} & g_{m,3} & \dots & g_{m,n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

برای ساختن بسته‌های کدشده x_1, \dots, x_n ضرایب به شکل زیر به بسته‌های خام الحاق می‌شوند.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 & s_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & s_n \end{bmatrix} = [I_n S] \quad (7)$$

برای کدگذاری نسل S گیرنده با به کار بردن عملیات حذفی گوس- جردن^{۱۵} ماتریس کدگذاری را به صورت زیر به شکل سطری پلکانی کاهش یافته^{۱۶} تبدیل می‌کنیم.

در معادله بالا M ماتریس کدگذاری، S ماتریس بسته‌های خام، X ماتریس بسته‌های کد شده و $RREF$ فرم سطری پلکانی ماتریس Y است.

تعریف ۱: پوشش بسته‌های خام به معنای تعداد ستون‌های دارای عنصر غیر صفر ماتریس کدگذاری تعریف می‌شود که با نماد C نمایش داده می‌شود [۱۵].

تعریف ۲: تأخیر کدگذاری بسته خام S_i به معنای تعداد ارسال‌های مورد نیاز به منظور کدگذاری S_i با نماد d_i نشان داده می‌شود [۱۵].

$$p_{c,t}^{\omega,n}(i=1) = \left(\frac{c}{2}\right) \times \binom{n-c}{1} \times \left(1 - \frac{1}{q}\right)^1 \times \left(\frac{c}{1}\right) \times \binom{n-c}{2} \times \left(1 - \frac{1}{q}\right)^1 \times \left(\frac{1}{q}\right)^1 \times \binom{2}{1} \times \left(\frac{n-c}{3}\right) \times \left(1 - \frac{1}{q}\right)^1 \times \left(\frac{1}{q}\right)^2 \times \binom{3}{1} \quad (13)$$

$$p_{c,t}^{\omega,n}(i=2) = \left(\frac{c}{1}\right) \times \binom{n-c}{2} \times \left(1 - \frac{1}{q}\right)^2 \times \left(\frac{n-c}{3}\right) \times \left(1 - \frac{1}{q}\right)^2 \times \left(\frac{1}{q}\right)^1 \times \binom{3}{2} \quad (14)$$

$$T_x = \sum_{\forall(c,t) \in \Phi} pr_{c,t} \times t, \quad (19)$$

در نهایت برای حالت $i=3$:

$$p_{c,t}^{\omega,n}(i=3) = \left(\frac{n-c}{3}\right) \times \left(1 - \frac{1}{q}\right)^3 \quad (15)$$

احتمال گذر برای هر ω به صورت زیر قابل محاسبه است:
احتمال ورود به هر حالت مدل ($pr_{c,t}$) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$p_{c,t}^{\omega,n}(i) = \begin{cases} \sum_{j=i}^{b_2} \frac{\binom{c}{\omega-j} \times \binom{n-c}{j}}{\binom{n}{\omega}} & \text{if } (c,t) \notin A_i \in B_{n,c,\omega} \\ \left(1 - \frac{1}{q}\right)^i \times \left(\frac{1}{q}\right)^{t-i} \times \binom{j}{i} & \end{cases} \quad (16)$$

جایی که T_x نشان دهنده تعداد ارسال های مورد نیاز برای کدگشایی x بسته ی خام است. از طرف دیگر برای کدگشایی کل یک نسل کافی است $x = n$ باشد. برای ارزیابی کدگشایی جزئی یک مفهوم به نام میانگین تأخیر کدگشایی بسته معرفی کردیم. برای بدست آوردن یک کران پایین برای این عملکرد کافی است ما T_x را تأخیر کدگشایی بسته x -م در نظر بگیریم. برای کدگشایی $x-1$ بسته باقی مانده نیز T_x یک باند بالا است زیرا همان طور که قبلا اشاره کردیم برای کدگشایی x از n بسته T_x کافی است. از این رو T_i را می توان تأخیر کدگشایی بسته d_i معرفی کرد. با جایگزین کردن T_i با d_i در معادله ۹ رابطه ی ۲۰ را خواهیم داشت.

$$ADD = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (20)$$

۵- روش بازخورد

در این مقاله روش بازخورد برای اولین بار ارائه شده است که این روش به این صورت می باشد:

همانطور که در بخش های قبلی اشاره شد هرگاه تعدادی بسته های جدید کدگشایی شوند، گیرنده به فرستنده با استفاده از بسته های بازخورد یک سیگنال می فرستد. این مکانیزم ها این قابلیت را به فرستنده می دهند که بسته های کدگشایی شده را کد نکند. با استفاده از این مکانیزم ها تضمین می کنیم که در هر نسل همه ی بسته ها قابل استفاده هستند. روش های قبلی ARQ فقط برای بسته های کد نشده استفاده می شوند اما این اولین روشی است که در کدگذاری شبکه استفاده می شود و بازخورد را برای بسته های دیکد شده انجام می دهد که نسل کامل کدگشایی نشده است ولی برخی بسته ها کدگشایی شدند.

۶- مدل مبتنی بر گراف

در این بخش هدف ارائه ی یک مدل مبتنی بر گراف برای ارزیابی عملکرد کدگذاری شبکه تنک از لحاظ تعداد ارسال های مورد نیاز برای کدگشایی یک نسل است. مدلی که در ادامه ارائه خواهد شد یک مدل مبتنی بر گراف است که برای اولین بار در این مقاله ارائه شده است و فقط برای

$$pr_{c,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } t=1, \\ \sum_{i=0}^{\omega} p_{c-i,t}^{\omega,n}(i) \times pr_{c-i,t-1} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (17)$$

$$(c \geq x, t \geq (x + \left\lceil \frac{c-x}{\omega} \right\rceil)) \quad (18)$$

همان طور که اشاره کردیم یکی از ویژگی های کدگذاری شبکه تنک قابلیت کدگشایی جزئی است. در این بخش هدف ارائه ی یک کران پایین برای تعداد ارسال های مورد نیاز برای کدگشایی x بسته از n است. برای این کار بر طبق لم ۱ (ارائه شده در مطالعه [۱۴]). محدودیت هایی را روی دو عنصر C و t اعمال می کنیم.

لم ۱: برای کدگشایی حداقل x بسته ی خام از یک نسل با اندازه n فقط حالت های با ویژگی رابطه ی شماره ۱۸ جذب کننده هستند.

در نظریه احتمال، زنجیره مارکوف جذب کننده، زنجیره مارکوفی است که در آن هر حالت می تواند به یک حالت جاذب برسد. حالت جاذب حالتی است که پس از وارد شدن به آن نمی توان از آن خارج شد. اکنون می توانیم با استفاده از حالت هایی با ویژگی رابطه ۱۸ یک کران پایین به صورت زیر برای ارزیابی کدگذاری شبکه تنک از لحاظ تعداد ارسال معرفی کنیم.

یک نسل است. همچنین الگوریتم‌هایی با زمان اجرا $O(n \log n)$ به عنوان کران بالا برای مسئله وجود دارند [۱۷].

۷- شبیه سازی و بررسی صحت مدل سازی

در این بخش به طور خلاصه به مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی مدل ریاضی خواهیم پرداخت. شبیه سازی فرایند کدگذاری و کدگشایی با استفاده از کتابخانه‌ی KODO [۱۸] در زبان ++C انجام گرفته است. با توجه به این که فرآیند کدگذاری بسته‌ها به صورت تصادفی بوده برای هر خروجی از ۵۰۰۰ بار اجرای برنامه میانگین گرفته‌ایم. همچنین اختلاف نتایج بین شبیه سازی و پیاده سازی مدل با استفاده از روش میانگین جذر مربعات بدست آمده است.

جدول ۱ تعداد ارسال‌های مورد نیاز شامل نتایج بدست آمده از شبیه سازی و پیاده سازی مدل را برای کدگشایی یک نسل از بسته‌های خام را با اندازه‌های متفاوت نشان می‌دهد. جدول ۱ به وضوح اختلاف ناچیز ناشی از شبیه سازی و پیاده سازی را نمایش می‌دهد، جایی که حداکثر اختلاف از لحاظ جذر مربعات ۰/۰۷ است. این جدول همچنین تأثیر سطح تنکی و میدان متناهی بر تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای کدگشایی یک نسل را نیز نمایش می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت برای یک نسل هرچه قدر تنکی بیشتر باشد (ω کوچکتر) تعداد ارسال‌های بیشتری برای کدگشایی آن نیاز است. برای مثال برای تمام نسل‌ها جایی که تنکی برابر ۲ است بیشترین تعداد ارسال مورد نیاز است. این نتیجه ناشی از قابلیت کدگشایی جزئی است زیرا بعد از تعدادی ارسال فرآیند کدگشایی بسته‌های خام آغاز می‌شود و هرچه تنکی بیشتر باشد امکان تشکیل بسته‌های کدشده از بسته‌های خام کدگشایی شده بالاتر می‌روند، در نتیجه احتمال ارسال بسته‌ی غیر مفید بیشتر می‌شود. همچنین به طور مشخص می‌توان نتیجه گرفت که هرچه سطح تنکی کمتر باشد تعداد ارسال‌های کمتری برای کدگشایی یک نسل مورد نیاز است. به طوری که وقتی به $\omega = n$ یا همان RLNC می‌رسیم تعداد ارسال‌ها کمینه می‌شود. علت این است که کدگذاری شبکه با بازخورد بسته‌های کدگشایی شده را از بسته‌های کد شده جدا کرده و آن‌ها را ارسال نمی‌کند.

شکل ۴ نشان می‌دهد دقت مدل ارائه شده در [۱۴، ۱۵] بالا است و مدل به درستی می‌تواند رفتار سیستم در یک کانال خطا دار را برای سطوح تنکی و میدان‌های متناهی متفاوت نشان دهد. همچنین مشاهده می‌کنیم هرچه خطا بیشتر شود به تعداد ارسال بیشتری برای کدگشایی ۴۰ بسته خام نیاز است. در شکل ۴ تأثیر سطح تنکی به خوبی نشان داده می‌شود جایی که هرچه سطح تنکی بیشتر باشد کدگشایی جزئی در کانال خطا دار تسریع می‌شود.

میدان‌هایی با اندازه‌ی بزرگ و تنکی ۲ معتبر است. علت این امر که مدل ارائه شده فقط برای $\omega = 2$ می‌باشد این است که مدل به صورت گراف است و از یال برای دو بسته استفاده شده است بنابراین $\omega = 2$ می‌باشد. برای $\omega > 2$ هاپیر گراف در نظر گرفته می‌شود که در این مقاله به آن نپرداخته‌ایم و این موضوع به عنوان کارهای آینده قابل بحث و بررسی می‌باشد.

گراف غیر جهت دار کام $G = (V, E)$ را در نظر بگیرید جایی که V نشان‌دهنده‌ی مجموعه‌ی رئوس متناظر با بسته‌های خام و E مجموعه‌ی یال‌های متناظر با بسته‌های کد شده با تنکی ۱۲ است. برای واضح تر شدن تعریف‌های بالا مثال زیر را شرح می‌دهیم. برای حالتی که $n = 5$ و $q = 7$ است. مجموعه‌های زیر را به عنوان مجموعه‌ای از بسته‌های کد شده در نظر بگیرید.

$$H_1 = s_5 + 3s_4 + 4s_3 + 2s_2 + s_1$$

$$H_2 = s_2 + 2s_1 + s_3 + s_2 + 3s_2 + 5s_1 + s_4 + 4s_3$$

$$H_3 = 6s_1 + 5s_2 + 2s_5 + 4s_1 + 3s_3 + 3s_2 + s_5 + 2s_4 + s_4 + 6s_5$$

شکل ۳ مدل مبتنی بر گراف H_1, H_2, H_3 را نمایش می‌دهد.

در حالتی که H_1 مجموعه‌ی بسته‌های دریافت شده توسط مقصد باشد، قادر به کدگشایی هیچ کدام از بسته‌های خام نخواهد بود. در حالت H_2 مقصد قادر به کدگشایی بسته‌های خام $s_1 + s_2 + s_3$ خواهد بود. اما در حالت H_3 مقصد کل بسته‌های خام مجموعه‌ی n را کدگشایی خواهد کرد. این مثال نشان می‌دهد وجود دور در مدل مبتنی بر گراف به معنای کدگشایی تمام بسته‌های خام شرکت کننده در دور است. همچنین بسته‌های خامی که با بسته‌های خام شرکت کننده در دور یال مشترک دارند نیز کدگشایی خواهند شد. نتیجه ذکر شده به این سبب است که برای شکل گیری یک دور با تعداد راس n تعداد n یال نیز موجود است. از طرفی می‌دانیم برای کدگشایی n بسته خام به n بسته کدشده نیاز است.

۶-۱- کران بالا برای تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای کدگشایی

یک نسل

درخت پوشای تصادفی S را روی گراف دلخواه G در نظر بگیرید. اضافه کردن یک یال بین دو راس دلخواه به معنای شکل گیری یک دور است که آن را با C نشان می‌دهیم. با توجه به اینکه S تمام راس‌های گراف را ملاقات کرده بنابراین C منجر به کدگشایی همه بسته‌های خام متناظر با راس‌ها خواهد شد. از طرفی ذکر این نکته ضروری است که حالت‌هایی برای کدگشایی همه بسته‌های یک نسل وجود دارند درحالی که در گراف تشکیل شده امکان ایجاد درخت پوشای تصادفی وجود ندارد. مثال زیر این نتیجه گیری را به طور واضح نشان می‌دهد.

$$H_1 = s_1 + 3s_2 + 4s_2 + 2s_3 + s_1 + 2s_2 + s_5 + s_4 + 4s_5 + 6s_4$$

گیرنده تمام بسته‌ها را کدگشایی خواهد کرد درحالی که به دلیل غیرمتصل بودن گراف امکان تشکیل درخت پوشای تصادفی وجود ندارد. بر طبق تو صیفات بالا می‌توان نتیجه گرفت مسئله تولید درخت تصادفی یک کران بالا برای تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای کدگشایی

جدول ۱: میانگین تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای کدگشایی کل یک نسل برای پیکره‌بندی‌های مختلف

q=2 (آ)

RLNC	$\omega=10$	$\omega=13$	$\omega=11$	$\omega=9$	$\omega=7$	$\omega=5$	$\omega=3$	$\omega=2$		
۹/۶۱ -	- -	- -	- -	- -	۹/۶۵ ۹/۳۱	۱۰/۵ ۹/۹	۱۴/۸۵ ۱۳/۹۲	۲۱/۱۳ ۲۱/۰۹	شبیه سازی مدل	n = ۸
۱۷/۶۳ -	۱۷/۶۳ ۱۷/۵۳	۱۷/۶۵ ۱۷/۵۳	۱۷/۶۹ ۱۷/۴۹	۱۷/۸۹ ۱۷/۴۲	۱۸/۸۴ ۱۸/۳۱	۲۳/۰۴ ۲۲/۳۴	۳۵/۹۶ ۳۳/۹۱	۵۳/۹۸ ۵۲/۴۲	شبیه سازی مدل	n=۱۶
۳۲/۹۲ -	۳۳/۱۳ ۳۳/۰۳	۳۳/۶۹ ۳۳/۰۵	۳۳/۹۶ ۳۳/۲۵	۳۵/۱۴ ۳۴/۴۷	۳۷/۴۵ ۳۶/۷۹	۵۲/۷۰ ۵۱/۰۹	۸۷/۰۲ ۸۵/۸۱	۱۲۹/۶۷ ۱۲۸/۰۶	شبیه سازی مدل	n=۳۲
۶۵/۵۶ -	۶۶/۶۱ ۶۵/۷۵	۶۶/۱۴ ۶۵/۶۹	۶۷/۷۹ ۶۷/۲۱	۷۲/۳۷ ۷۲/۰۱	۸۷/۹۸ ۸۷/۲۷	۱۲۱/۷۷ ۱۲۰/۹۷	۲۰۲/۶۶ ۲۰۱/۵۷	۲۸۶/۶۵ ۲۸۴/۹۲	شبیه سازی مدل	n=۶۴
۱۲۹/۶۱ -	۱۳۱/۴۷ ۱۳۱/۹۶	۱۳۲/۸۵ ۱۳۱/۹۵	۱۳۸/۹۱ ۱۲۸/۳۱	۱۵۷/۱۵ ۱۵۶/۵۹	۱۹۷/۹۳ ۱۹۷/۳۱	۲۷۷/۷۱ ۲۷۶/۹۴	۴۶۳/۹۷ ۴۶۲/۷۲	۶۹۴/۹۷ ۶۹۳/۱۴	شبیه سازی مدل	n=۱۲۸

q = 2^4 (ب)

RLNC	$\omega=15$	$\omega=13$	$\omega=11$	$\omega=9$	$\omega=7$	$\omega=5$	$\omega=3$	$\omega=2$		
۸/۰۷ -	- -	- -	- -	- -	۸/۰۸ ۸/۰۶	۸/۱۱ ۸/۰۸	۸/۷۵ ۸/۳۱	۱۱/۶۹ ۱۰/۷۱	شبیه سازی مدل	n = ۸
۱۶/۰۶ -	۱۶/۰۷ ۱۶/۰۶	۱۶/۰۷ ۱۶/۰۶	۱۶/۰۸ ۱۶/۰۶	۱۶/۰۱ ۱۶/۰۵	۱۶/۳۱ ۱۶/۰۹	۱۷/۰۶ ۱۶/۵۱	۱۹/۹۹ ۱۹/۰۲	۲۹/۱۸ ۲۸/۰۹	شبیه سازی مدل	n=۱۶
۳۲/۰۷ -	۳۲/۰۶ ۳۲/۰۵	۳۲/۰۷ ۳۳/۰۵	۳۲/۰۸ ۳۳/۰۶	۳۲/۱۹ ۳۲/۱۲	۳۳/۲۳ ۳۲/۱۴	۳۶/۷۹ ۳۶/۰۱	۴۵/۹۷ ۴۴/۸۷	۶۹/۹۱ ۶۸/۷۴	شبیه سازی مدل	n=۳۲
۶۴/۰۷ -	۶۴/۰۹ ۶۴/۰۸	۶۴/۲۲ ۶۴/۱۹	۶۴/۶۹ ۶۴/۳۱	۶۵/۹۷ ۶۵/۱۸	۷۰/۲۲ ۶۹/۴۱	۸۲/۸۱ ۸۱/۹۳	۱۰۸/۱۲ ۱۰۷/۹۵	۱۶۰/۲۶ ۱۵۸/۷۷	شبیه سازی مدل	n=۶۴
۱۲۸/۰۶ -	۱۲۸/۰۷ ۱۲۸/۰۵	۱۲۹/۳ ۱۲۸/۱۴	۱۳۰/۰۷ ۱۲۹/۹۸	۱۳۶/۰۵ ۱۳۵/۷۹	۱۵۱/۵ ۱۵۰/۷۶	۱۸۴/۵۶ ۱۸۳/۶۹	۲۴۷/۲۱ ۲۴۶/۰۶	۳۷۲/۱۳ ۳۷۰/۵۵	شبیه سازی مدل	n=۱۲۸

q = 2^32 (ج)

RLNC	$\omega=10$	$\omega=13$	$\omega=11$	$\omega=9$	$\omega=7$	$\omega=5$	$\omega=3$	$\omega=2$		
۸ -	- -	- -	- -	- -	۸ ۸/۰۰۵	۸/۰۳ ۸/۰۱	۸۷/۸ ۸/۴۱	۹/۳۵ ۸/۸۴	شبیه سازی مدل	n = ۸
۱۶ -	۱۶ ۱۶	۱۶ ۱۶	۱۶ ۱۶	۱۶/۰۲ ۱۶/۰۱	۱۶/۰۸ ۱۸/۰۷	۱۶/۲۱ ۱۶/۱۵	۱۷/۵۵ ۱۶/۷۶	۲۶/۹۷ ۲۵/۶۱	شبیه سازی مدل	n=۱۶
۳۲ -	۳۲ ۳۲	۳۲ ۳۲	۳۲ ۳۲.۰۰۱	۳۲/۰۱ ۳۲/۰۰۱	۳۲/۰۶ ۳۲/۰۳	۳۲/۸۷ ۳۲/۳۱	۴۲ ۴۱/۱۷	۶۵/۲۳ ۶۴/۰۵	شبیه سازی مدل	n=۳۲
۶۴ -	۶۴ ۶۴	۶۴ ۶۴	۶۴/۰۱ ۶۴/۰۰۶	۶۴/۰۹ ۶۳/۹۹	۶۴/۳۷ ۶۳/۸۵	۶۸/۳ ۶۷/۷۳	۹۹/۰۵ ۹۸/۴۲	۱۵۱/۱۹ ۱۵۰/۸۵	شبیه سازی مدل	n=۶۴
۱۲۸ -	۱۲۸ ۱۲۸/۰۱	۱۲۸/۰۲ ۱۲۸/۰۱	۱۲۸/۸ ۱۲۸/۳	۱۲۸/۱۹ ۱۲۸/۰۹	۱۲۹/۷۷ ۱۲۸/۰۱	۱۴۴/۰۷ ۱۴۳/۶۹	۲۳۲/۶۲ ۲۳۱/۷۴	۳۴۷/۲۲ ۳۴۶/۰۱	شبیه سازی مدل	n=۱۲۸

جدول ۲: میانگین تأخیر کدگذاری بر بسته برای میدان‌هایی با اندازه‌ی متفاوت

$$q = 2 \quad (\text{آ})$$

RLNC	$\omega=15$	$\omega=13$	$\omega=11$	$\omega=9$	$\omega=7$	$\omega=5$	$\omega=3$	$\omega=2$		
۷.۵۸ -	- -	- -	- -	- -	۷.۲ ۶.۴۱	۷.۱۹ ۶.۴۷	۷.۴۵ ۶.۵۹	۹/۰۶ ۷/۹۱	شبه سازی مدل	n = ۸
۱۵/۵۵ -	۱۵/۵۴ ۱۴/۸۸	۱۵/۵۳ ۱۴/۸۵	۱۵/۴۶ ۱۴/۸۱	۱۵/۲۸ ۱۴/۷۳	۱۴/۰۸ ۱۴/۰۱	۱۳/۹۹ ۱۳/۰۱	۱۴/۵۸ ۱۳/۲۱	۱۸/۲۷ ۱۶/۸۱	شبه‌سازی مدل	n=۱۶
۳۱/۵۱ -	۳۱/۵۰ ۳۱/۰۹۴	۳۱/۴۵ ۳۰/۸۶	۳۱/۳۰ ۳۰/۷۵	۳۰/۹۲ ۳۰/۰۸	۲۹/۶۹ ۲۸/۹۱	۲۷/۹۱ ۲۷/۰۱	۲۹/۶۱ ۲۸/۰۱	۳۶/۷۷ ۳۵/۰۲	شبه سازی مدل	n=۳۲
۶۳/۵۱ -	۶۳/۴۴ ۶۳/۰۱	۶۳/۴۲ ۶۲/۸۴	۶۳/۴۰ ۶۲/۷۱	۶۲/۳۹ ۶۱/۶۵	۵۹/۷۷ ۵۹/۰۱	۵۴/۸۰ ۵۴/۳۵	۵۹/۱۸ ۵۷/۴۱	۷۴/۱۷ ۷۲/۶۶	شبه سازی مدل	n=۶۴
۱۲۷/۴۷ -	۱۲۷/۰۴۳ ۱۲۶/۱۹	۱۲۸/۲۱ ۱۲۶/۰۹	۱۲۸/۸۱ ۱۲۵/۷۴	۱۲۵/۲۶ ۱۲۴/۴۱	۱۲۰/۳۰ ۱۱۹/۱۹	۱۳۹/۳۱ ۱۰۹/۱	۱۱۸/۱۱ ۱۱۶/۶۱	۱۴۸/۴۹ ۱۴۶/۶۱	شبه سازی مدل	n=۱۲۸

$$q = 2^4 \quad (\text{ب})$$

RLNC	$\omega=15$	$\omega=13$	$\omega=11$	$\omega=9$	$\omega=7$	$\omega=5$	$\omega=3$	$\omega=2$		
۷/۶۹ -	- -	- -	- -	- -	۷/۶۸ ۶/۹۷	۷/۶۵ ۶/۹۱	۷/۲۳ ۶/۸۷	۶/۴۳ ۵/۴۱	شبه سازی مدل	n = ۸
۱۵/۴۲ -	۱۵/۴۲ ۱۴/۱۵	۱۵/۴۲ ۱۴/۱	۱۵/۴۲ ۱۳/۹۸	۱۵/۴۲ ۱۳/۹۳	۱۵/۴۲ ۱۳/۸۱	۱۵/۳۷ ۱۳/۷۶	۱۴/۴۷ ۱۲/۶۱	۱۲/۸۱ ۱۰/۴۱	شبه سازی مدل	n=۱۶
۳۱/۱۹ -	۳۱/۱۹ ۳۰/۴۳	۳۱/۱۹ ۳۰/۴۲	۳۱/۱۹ ۳۰/۴۱	۳۱/۱۸ ۳۰/۳۷	۳۱/۱۸ ۳۰/۰۱	۳۰/۷۷ ۲۹/۵۱	۲۹/۱۹ ۲۷/۷۳	۲۵/۶۱ ۲۴/۱۴	شبه سازی مدل	n=۳۲
۶۳/۰۹ -	۶۳/۰۹ ۶۲/۲	۶۳/۰۸ ۶۲/۱	۶۳/۰۸ ۶۲/۰۹	۶۳/۰۸ ۶۲/۰۷	۶۳/۰۵ ۶۱/۹۲	۶۲/۸۵ ۵۹/۴۳	۵۸/۸۲ ۵۷/۳۷	۵۱/۱۶ ۴۸/۶	شبه سازی مدل	n=۶۴
۱۲۷/۰۸ -	۱۲۷/۰۷ ۱۲۶/۴۱	۱۲۷/۰۷ ۱۲۶/۱۲	۱۲۷/۰۷ ۱۲۶/۰۱	۱۲۷/۰۸ ۱۲۵/۰۹	۱۲۷/۰۰۹ ۱۲۵/۸۴	۱۲۶/۴ ۱۲۴/۷۷	۱۱۸/۰۳ ۱۱۶/۴۱	۱۰۲/۲۳ ۱۰۰/۰۳	شبه سازی مدل	n=۱۲۸

$$q = 2^{32} \quad (\text{ج})$$

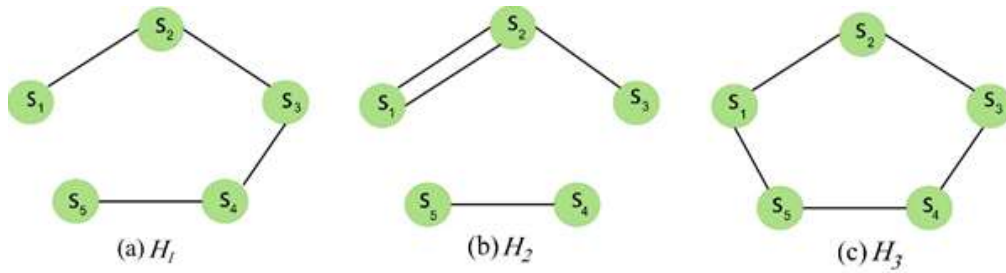
RLNC	$\omega=15$	$\omega=13$	$\omega=11$	$\omega=9$	$\omega=7$	$\omega=5$	$\omega=3$	$\omega=2$		
۸ -	- -	- -	- -	- -	۸ ۷/۵۶	۷/۹۹ ۷۷/۲۱	۷/۵۹ ۶/۸۱	۶/۵۵ ۵/۶۱	شبه سازی مدل	n = ۸
۱۶ -	۱۶ ۱۵/۶۴	۱۶ ۱۵/۵۴	۱۶ ۱۵/۵	۱۶ ۱۵/۴۲	۱۵/۹۹ ۱۵/۳۱	۱۵/۹۳ ۱۵/۱۷	۱۵/۰۲ ۱۳/۹۹	۱۳/۱۶ ۱۲/۰۱	شبه سازی مدل	n=۱۶
۳۲ -	۳۲ ۳۱/۵۱	۳۲ ۳۱/۴۷	۳۲ ۳۱/۲۹	۳۱/۹۹ ۳۱/۲۲	۳۱/۹۸ ۳۱/۱۳	۳۱/۸۹ ۳۱/۰۶	۳۰/۰۱ ۰۲/۲۹	۲۶/۲۷ ۲۵/۰۱	شبه سازی مدل	n=۳۲
۶۴ -	۶۴ ۶۳/۴۶	۶۴ ۶۳/۳۴	۶۴ ۶۳/۲۷	۶۳/۹۹ ۶۳/۲۵	۶۳/۹۵ ۶۳/۲۲	۶۳/۵۷ ۶۲/۹۱	۶۰/۲۹ ۵۹/۰۱	۵۲/۴۲ ۵۱/۱۲	شبه سازی مدل	n=۶۴
۱۲۸ -	۱۲۸ ۱۲۷/۳۹	۱۲۸ ۱۲۷/۲۱	۱۲۸ ۱۲۷/۱۹	۱۲۷/۹۹ ۱۲۷/۰۱	۱۲۷/۹۸ ۱۲۶/۹۵	۱۲۷/۰۹ ۱۲۶/۰۳	۱۲۰/۷۶ ۱۱۹/۲۴	۱۰۵/۷۹ ۱۰۴/۰۰۱	شبه سازی مدل	n=۱۲۸

جدول ۳: مقایسه روش‌های کدگذاری تنک از لحاظ تعداد ارسال

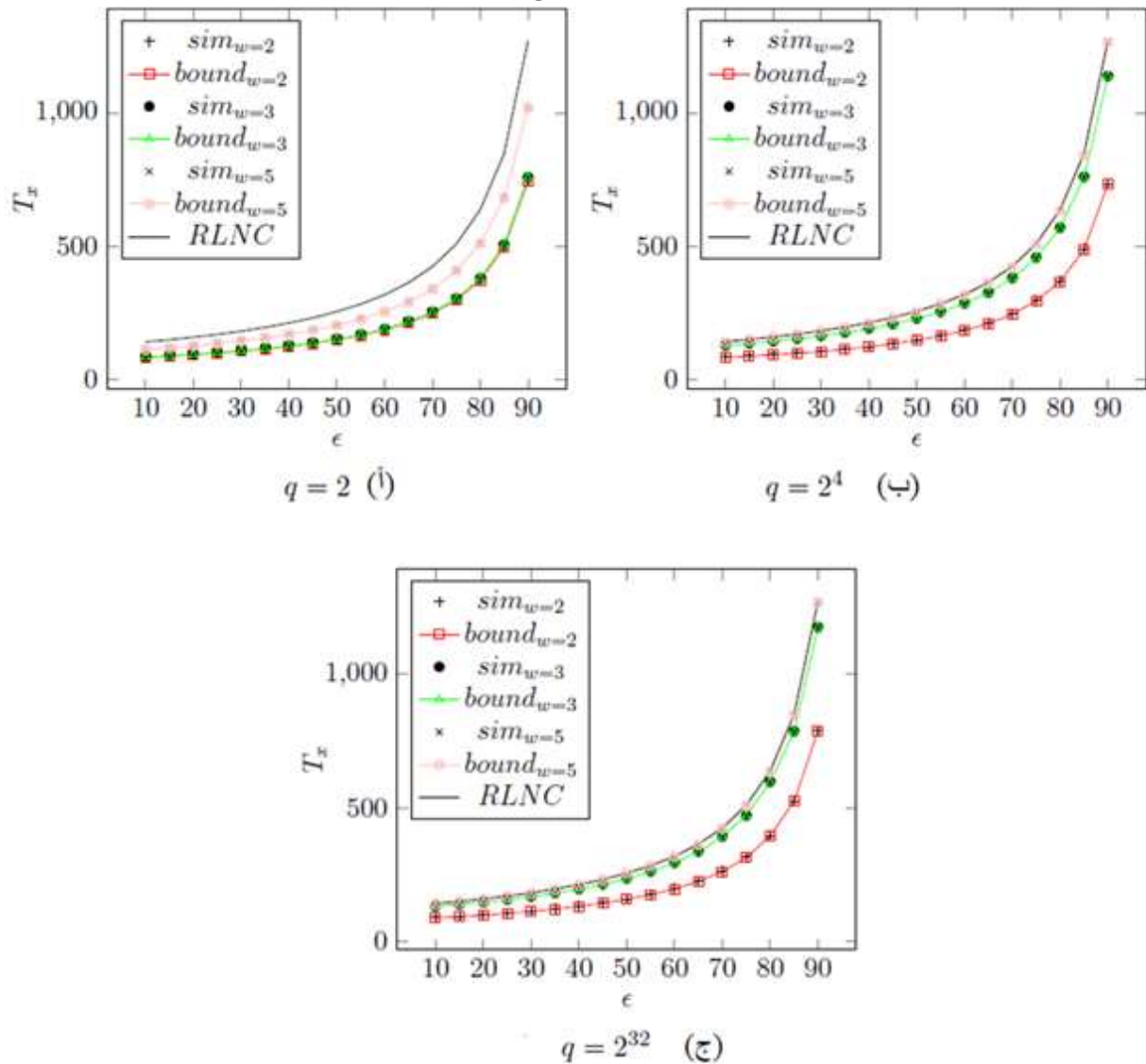
کدگذاری شبکه تنک با بازخورد	کدگذاری شبکه تنک	$\omega = 2$
۱۱/۶۲	۱۷/۴۵	$n = ۸, q = ۲$
۱۲/۷۹	۲۰/۶۶	$n = ۹, q = ۲$
۱۴/۲۸	۲۳/۲۲	$n = ۱۰, q = ۲$
۱۵/۵۴	۲۶/۰۵۹	$n = ۱۱, q = ۲$
۱۶/۹۳	۲۹/۵۰	$n = ۱۲, q = ۲$
۱۸/۳۷	۳۲/۵۷	$n = ۱۳, q = ۲$
۷/۰۰۸	۸/۰۳	$n = ۷, q = ۲^۸$
۸/۰۰۷	۹/۴	$n = ۸, q = ۲^۸$
۹/۰۰۷	۱۰/۹۲	$n = ۹, q = ۲^۸$
۱۰/۰۰۵	۱۲/۳۳	$n = ۱۰, q = ۲^۸$
۱۱/۰۰۹	۱۳/۸۷	$n = ۱۱, q = ۲^۸$
۱۲/۰۱۴	۱۵/۴۷	$n = ۱۲, q = ۲^۸$
۱۳/۰۱۲	۱۷/۰۰	$n = ۱۳, q = ۲^۸$
۷	۷/۹۴	$n = ۷, q = ۲^{۱۶}$
۸	۹/۴۷	$n = ۸, q = ۲^{۱۶}$
۹	۱۰/۷۲	$n = ۹, q = ۲^{۱۶}$
۱۰	۱۲/۳۰	$n = ۱۰, q = ۲^{۱۶}$
۱۱	۱۳/۷۹	$n = ۱۱, q = ۲^{۱۶}$
۱۲	۱۵/۳۰	$n = ۱۲, q = ۲^{۱۶}$
۱۳	۱۶/۹۳	$n = ۱۳, q = ۲^{۱۶}$

جدول ۴: مقایسه روش‌های کدگذاری تنک از لحاظ میانگین زمان کدگذاری

کدگذاری شبکه تنک با بازخورد	کدگذاری شبکه تنک	
۶/۹۹	۹/۲۳	$n = ۸, q = ۲$
۷/۸۸	۱۰/۳۵	$n = ۹, q = ۲$
۸/۶۵	۱۱/۵۴	$n = ۱۰, q = ۲$
۹/۳۶	۱۲/۸۸	$n = ۱۱, q = ۲$
۱۰/۱۲	۱۳/۷۱	$n = ۱۲, q = ۲$
۱۰/۹۶	۱۴/۹۸	$n = ۱۳, q = ۲$
۵/۸۴	۵/۶۸	$n = ۷, q = ۲^۸$
۶/۶۱	۶/۴۱	$n = ۸, q = ۲^۸$
۷/۳۵	۷/۲۴	$n = ۹, q = ۲^۸$
۸/۱۰	۸/۰۶	$n = ۱۰, q = ۲^۸$
۸/۸۴	۸/۸۴	$n = ۱۱, q = ۲^۸$
۹/۶۲	۱۰/۵۸	$n = ۱۲, q = ۲^۸$
۱۰/۴۰	۱۲/۲۳	$n = ۱۳, q = ۲^۸$
۵/۸۱	۵/۶۴	$n = ۷, q = ۲^{۱۶}$
۶/۵۶	۶/۴۸	$n = ۸, q = ۲^{۱۶}$
۷/۳۳	۷/۲۹	$n = ۹, q = ۲^{۱۶}$
۸/۱۶	۸/۰۹	$n = ۱۰, q = ۲^{۱۶}$
۸/۸۳	۸/۸۸	$n = ۱۲, q = ۲^{۱۶}$
۹/۶۹	۹/۷۱	$n = ۱۳, q = ۲^{۱۶}$
۱۰/۳۸	۱۰/۵۳	$n = ۱۴, q = ۲^{۱۶}$



شکل ۳: مدل مبتنی بر گراف



شکل ۴: مقایسه روش‌های کدگذاری تنک برای تنکی‌های مختلف در کانال خطا دار با نرخ خطای مختلف از لحاظ تعداد ارسال‌های مورد نیاز برای کدگشایی ۴۰ بسته خام زمانی که اندازه کل بسته‌های خام ۱۲۸ است

- [7] T. Ho, M. Medard, J. Shi, M. Effros, and D. R. Karger, *On Randomized Network Coding*, In Proceedings of the Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing, vol.41, no.1, pp.11-20, 2003.
- [8] D. Silva, W. Zeng, and F. R. Kschischang, *Sparse Network Coding with Overlapping Classes*. 2009 Workshop on Network Coding, Theory, and Applications, pp.74-79, 2009.
- [9] Ch. W. Sorensen, A. S. Badr, J. A. Cabrera, D. E. Lucani, J. Heide, and F. H. P. Fitzek, *A Practical View on Tunable Sparse Network Coding*, Proceedings of European Wireless 2015; 21th European Wireless Conference, pp.1-6, 2015.
- [10] S. Sanghavi, *Intermediate Performance of Rateless Codes*, 2007 IEEE Information Theory Workshop, pp.478-48, 2007.
- [11] A. Talari and N. Rahnavard, "On the intermediate symbol recovery rate of rateless codes", IEEE Transactions on Communications, vol.60, no.5, pp.1237-1242, 2012.
- [12] B. Jun, P. Yang, J. No, and H. Park, "New fountain codes with improved intermediate recovery based on batched zigzag coding," IEEE Transactions on Communications, vol.65, no.1, pp.23-36, 2017.
- [13] A. Kamra, V. Misra, J. Feldman, and D. Rubenstein, *Growth codes: maximizing sensor network data persistence*, Proceedings of The 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, pp.255-266, 2006.
- [14] A. Zarei, P. Pahlevani and M. Davoodi, "On the partial decoding delay of sparse network coding," IEEE Communications Letters, vol. 22, pp.1668-1671, 2018.
- [15] A. Zarei, P. Pahlevani and D. E. Lucani, "An Analytical model for sparse network codes: Field Size considerations," IEEE Communications Letters, vol.24, pp.729 -733, 2020.
- [16] L. Peterson and B. Davie, *Computer networks: a systems approach*, Elsevier, 2007.
- [17] D. B. Wilson, *Generating Random Spanning Trees More Quickly Than The Cover Time*, Proceedings of the Twenty-Eighth Annual ACM Symposium on Theory of Computing, pp.296-303, 1996.
- [18] M. Pedersen, J. Heide and F.H.Fitzek, *KODO: An Open And Research Oriented Network Coding Library*, International Conference on Research in Networking, pp.145-152, 2011.

زیر نویس ها

- ¹⁰ Sparse Network Coding
¹¹ Decoding Matrix
¹² Partial Decoding
¹³ Markov Chain
¹⁴ Real-Time Applications
¹⁵ Gauss-Jordan Elimination
¹⁶ Reduced Row Echelon Form
¹⁷ Absorbing Markov chain

۸- نتیجه گیری

ما در این مقاله با توسعه‌ی نتایج ارائه شده در [۱۴، ۱۵] نتایج شبیه‌سازی گسترده‌ای را برای کدگذاری شبکه تنک ارائه کردیم. مدل ارائه شده قادر بود تأثیر میدان متناهی بر دو عملکرد تعداد ارسال‌ها و تأخیر کدگذاری بسته را بررسی کند. ما با استفاده از شبیه‌سازی نشان دادیم کران‌های پایین ارائه شده دقت بالایی دارند و به خوبی رفتار کدگذاری شبکه تنک را تقلید می‌کنند. در ادامه روش کدگذاری شبکه تنک با بازخورد معرفی شد و در بخش شبیه‌سازی نشان دادیم این روش تعادل بهتری را از نظر تعداد ارسال و تأخیر کدگذاری برای سیستم ایجاد می‌کند. در پایان یک مدل مبتنی بر گراف برای کدگذاری شبکه تنک معرفی شد و یک کران بالا بر اساس مسئله درخت پوشای تصادفی برای تعداد ارسال‌ها ارائه شد.

مراجع

- [1] N. Panwar, Sh. Sharma and A. K. Singh, "A survey on 5g: the next generation of mobile communication," Physical Communication, vol.18, pp.64-84, 2016.
- [2] N. Cvijetic, *Optical Network Evolution For 5g Mobile Applications And SDN-based Control*, 2014 16th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks), pp.1-5, 2014.
- [3] P. Garrido, D. E. Lucani, and R. Agüero, "A markov chain model for the decoding probability of sparse network coding," IEEE Transactions on Communications, vol.65, no.4, pp.1675-1685, 2017.
- [4] P. Garrido, D. E. Lucani, and R. Agüero, *How to tune sparse network coding over wireless links*, 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp 1-6, 2017.
- [5] J. Heide, M. V. Pedersen, F. K. H. P. Fitzek, and M. Médard, "On code parameters and coding vector representation for practical rlnc," 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp1-5, 2011.
- [6] T. Ho, M. Médard, R. Koetter, D. R. Karger, M. Effros, J. Shi, and B. Leong, "A random linear network coding approach to multicast," IEEE Transactions on Information Theory, vol.52, no.10, pp.4413-4430, 2006.

- ¹ Fifth Generation Communication
² Error-Prone Network
³ Network Coding
⁴ Fountain Codes
⁵ Recoding
⁶ Random Linear Network Coding (RLNC)
⁷ Finite Field
⁸ Encoder
⁹ Decoder