مجله علمی-پژوهشی
رایانش نرم و فناوری اطلاعات
جلد۴، شماره۴، سال ۱۳۹۴

ارائه روشی برای بهبود گذردهی کدگذاری شبکه‌های بی‌سیم با استفاده ازمسیریابی فرصت‌طلبانه

مهدی آقا صرام[۱]، راضیه شیخ پور[۲]
[۱]گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران mehdi.sarram@yazd.ac.ir
[۲]گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران r_sheikhpour@stu.yazd.ac.ir

چکیده - مسیریابی از مسائل مهم و حیاتی در شبکه‌های مخابراتی است. در الگوریتم‌های مسیریابی، هیچ گونه تغییر در بسته‌های داده‌ها توسط گره‌های میانی مجاز نمی باشد. کدگذاری شبکه روش جدیدی برای ارسال داده‌ها در شبکه‌های مخابراتی است که فوایدی نظیر بهبود در گذردهی و کارآیی شبکه‌ها را به دنبال دارد. در این روش، گره‌های میانی ترکیبی کد شده از بسته‌های ورودی را به سمت مقصد ارسال می‌کنند. مسیریابی فرصت‌طلبانه نیز باعث افزایش گذردهی شبکه‌های بی‌سیم می‌شود. دراین روش، از ابتدا هیچ گره‌ای به عنوان گره میانی انتخاب نمی‌شود و هرگره‌ای که انتقال را به درستی دریافت کند، می‌تواند آن را به سمت مقصد ارسال کند. در این مقاله، روشی برای افزایش گذردهی شبکه‌های بی‌سیم با استفاده از مسیریابی فرصت‌طلبانه در کدگذاری شبکه پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی، از کدگذاری تصادفی خطی بسته‌های ارسالی از یک مبدأ استفاده شده و نیازی به کدگشایی در تمام گره‌های میانی نمی‌باشد. به‌علاوه، در مسیریابی از دریافت‌های شانسی استفاده شده و از ابتدا و قبل از شروع انتقال، مسیر ثابتی در نظر گرفته نمی‌شود. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌ساز *NS-2* و مقایسه‌ی آن با پروتکل‌های کدگذاری *COPE* و فرصت‌طلبانه *EXOR* نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانسته است گذردهی شبکه را بهبود دهد.

کلید واژه‌ها- کدگذاری شبکه، مسیریابی فرصت‌طلبانه، شبکه بی‌سیم، بسته ابتکاری

۱. مقدمه

یک شبکه بی‌سیم مش، شبکه‌ای از مسیریاب‌های بی‌سیم است که از طریق لینک‌های بی‌سیم چندپرشه به هم متصل شده‌اند. در اکثر شبکه‌های مش بی‌سیم، مسیریاب‌ها از رویه‌ی "ذخیره و ارسال" استفاده کرده و پس از بافر کردن بسته‌های دریافتی، آنها را دست نخورده به سمت مسیریاب بعدی ارسال می‌کنند[۴-۱].

در سال‌های اخیر کدگذاری شبکه به عنوان جایگزینی برای مسیریابی مطرح شده است. کدگذاری شبکه مزایای فراوانی نسبت به مسیریابی دارد که عبارتند از: دستیابی به نرخ گذردهی بیشتر، قابلیت اطمینان بالاتر در ارسال جریان‌های اطلاعاتی و مقاومت بیشتر در برابر تغییرات شبکه [۸-۵]. در محیط بی‌سیم، کدگذاری شبکه می‌تواند مزایایی نظیر افزایش عمر باتری،کاهش تاخیر و افزایش پهنای باند بی‌سیم را داشته باشد[۶]. ایده اصلی کدگذاری شبکه، کدکردن بسته‌ها توسط مسیریاب‌ها قبل از ارسال بسته‌ها است. در این حالت، مسیریاب‌ها می‌توانند اطلاعات بسته‌های مختلف را در یک بسته کد نمایند که این امر منجر به بهبود گذردهی[۱] می‌شود[۹].

کدگذاری شبکه ابتدا توسط Ahlswede و همکارانش [۹] در شبکه‌های سیمی مطرح شد. در روش پیشنهادی آنها هر گره در هر بازه از زمان بسته‌های داده‌ها را از یال‌های ورودی دریافت کرده و ترکیبی از آنها را روی یال‌های خروجی قرار می‌دهد. این ترکیب می‌تواند خطی یا غیر خطی باشد اما نشان داده شده است در حالت چندپخشی، کدگذاری خطی برای رسیدن به جواب بهینه کفایت می‌کند [۱۰].

[1] Throughput

پروتکل COPE روشی برای کدگذاری شبکه است که گذردهی شبکه‌های مش بی‌سیم را با چندین جریان تک‌پخشی بهبود می‌بخشد. با استفاده از روش COPE، یک مسیریاب از کدگذاری شبکه جهت فشرده‌سازی بسته‌های صف خروجی استفاده می‌کند و با هوشمندی بسته‌ها را با استفاده از عملگر XOR ساده ترکیب کرده و بسته‌های کد شده را در یک انتقال به چندین پرش بعدی هدایت می‌کند. پرش‌های بعدی، بسته کد شده را رمزگشایی کرده و همین پروسه را تا رسیدن بسته به مقصد ادامه می‌دهند[۱۲،۱۱].

در مسیریابی سنتی، بهترین مسیر جهت انتقال بسته‌ها انتخاب می‌شود. امّا در مسیریابی فرصت‌طلبانه چون از ابتدا هیچ گره خاصی به عنوان گره میانی انتخاب نمی‌شود، هرکدام از گره‌ها که بسته را به درستی دریافت کرده باشد، می‌توانند آن را به سمت مقصد ارسال کنند. در چنین شرایطی هرچند احتمال تحویل پائین است، به علّت وجود شانس بالا برای دریافت توسط گره‌های متعدد میانی، در کل احتمال تحویل بالا می‌رود[۱۵-۱۳].

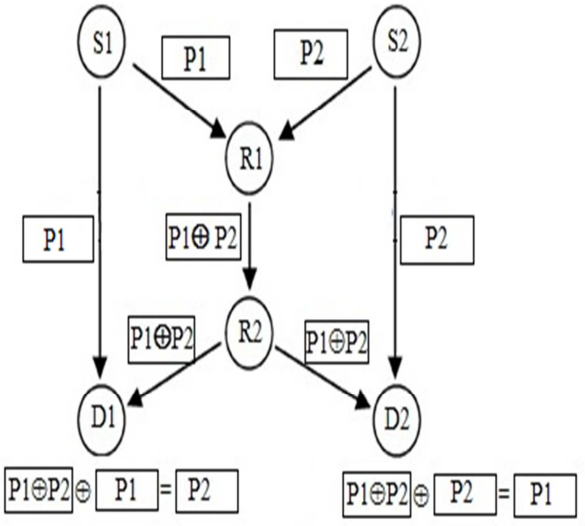
EXOR یک پروتکل مسیریابی فرصت‌طلبانه است[۱۳]. در این روش از بین گره‌هایی که بسته را دریافت می‌کنند، گره‌ای که بهترین مسیر را به مقصد دارد به عنوان ارسالگر بعدی انتخاب می‌شود. در این شیوه از شانس‌ها و فرصت‌ها صرف‌نظر نمی‌شود و از آنها جهت بهبود گذردهی استفاده خواهد شد.

روش پیشنهادی این مقاله استفاده از مسیریابی فرصت طلبانه در کدگذاری شبکه است، به طوری‌که هیچ فرضی در مورد ترافیک و توپولوژی شبکه وجود ندارد. روش پیشنهادی، با شناسایی فرصت‌های کدگذاری، از آنها جهت بالابردن گذردهی و قابلیت اطمینان بهره می‌گیرد.

در بخش ۲، مروری بر کدگذاری شبکه و پروتکل COPE انجام می‌شود. بخش ۳ به توصیف مسیریابی فرصت‌طلبانه و پروتکل EXOR می‌پردازد. جزئیات روش پیشنهادی در بخش ۵ ارائه می‌شود. بخش۶ به توصیف چالش‌های عملی روش پیشنهادی می‌پردازد و در بخش ۷ نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. کدگذاری شبکه

در کدگذاری شبکه، گره‌ها به جای ذخیره و ارسال داده‌ها، می‌توانند چندین بسته ورودی را در قالب یک یا چند بسته خروجی ترکیب کنند. تکنیک کدگذاری شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است[۱۱].



شکل ۱: کدگذاری شبکه [۱۱]

در این شکل، مبدأ S_1 مایل به تحویل بسته‌ی P_1 به گیرنده‌های D_1 و D_2 و مبدأ S_2 مایل به تحویل بسته‌ی P_2 به همان دو گیرنده است. فرض کنید تمام اتصالات ظرفیت یک بسته در واحد زمان را دارند. اگر مسیریاب‌های R_1 و R_2 فقط ارسال بسته‌های دریافتی را به عهده داشته باشند، لینک وسط گلوگاه محسوب می‌شود و دو مسیریاب در هر ثانیه فقط می‌توانند P_1 را به D_2 یا P_2 را به D_1 تحویل دهند. در مقابل، اگر مسیریاب‌ها با استفاده از عملگر XOR ساده، دو بسته را ترکیب کرده و بسته‌ی کد شده‌ی $P_1 \oplus P_2$ را بفرستند، گیرنده‌های D_1 و D_2 می‌توانند هر دو بسته را به دست آورند. گیرنده D_1 می‌تواند با XOR کردن بسته P_1 (که با لینک مستقیم از S_1 به دست آورده) با $P_1 \oplus P_2$، بسته مطلوبش یعنی P_2 را بدست آورد و برای گیرنده D_2 هم به همین ترتیب P_1 قابل حصول است. بنابراین با فرستادن XOR شده P_1 و P_2 روی لینک وسط، می‌توان در هر واحد زمان دو پیغام را به هر دو گیرنده تحویل داد. در کدگذاری خطی، عملیات XOR با یک ترکیب خطی از داده‌ها جایگزین می‌شود که روی محدوده‌ی متناهی از اعداد تفسیر می‌شود. این کار اجازه‌ی درجه‌ی بالاتری از انعطاف‌پذیری را در ترکیب بسته‌ها می‌دهد. بنابراین، مسیریاب‌ها به جای ارسال بسته‌ها، ترکیب خطی از بسته‌های ورودی را به عنوان بسته کد شده تولید کرده و سپس آنها را به سمت لینک‌های خروجی ارسال می‌کنند.

پروتکل COPE [۱۱]، اولین روش کدگذاری شبکه جهت بهبود گذردهی بی‌سیم است که کدگذاری شبکه را برای کاهش

تعداد انتقال‌های لازم جهت تحویل دو بسته به کار می‌گیرد. این روش شبه لایه‌ای بین لایه‌های MAC و IP بوجود می‌آورد که فرصت‌های کدگذاری را شناسایی کرده و از آنها جهت ارسال چندین بسته در یک انتقال بهره می‌برد. COPE با استفاده از طبیعت انتشاری رسانه‌ی بی‌سیم، به گره‌های نزدیک به هم اجازه شنود بسته منتشره شده از یک گره را می‌دهد. البته تا قبل از این، چنین شنودهایی به عنوان مسأله‌ای مضر در نظر گرفته می‌شدند، زیرا گره‌های مجاور برای بسته‌های شنود شده مورد استفاده‌ای نداشته و به سادگی آنها را دور می‌انداختند و این کار باعث اتلاف پهنای باند می‌گردید. در آن زمان طبیعت انتشاری به عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی شبکه‌های بی‌سیم چندپرشه درنظر گرفته شده بود[۱۷،۱۶].

۳. مسیریابی فرصت‌طلبانه در شبکه‌های بی‌سیم

در مسیریابی سنتی جهت انتقال بسته‌ها، بهترین مسیر که مسیری با بالاترین احتمال تحویل و اطمینان جهت رساندن بسته‌ها به مقصد است، انتخاب می‌شود. در مسیریابی فرصت‌طلبانه از ابتدا هیچ گره‌ای به عنوان گره میانی انتخاب نمی‌شود و از بین گره‌هایی که بسته را دریافت می‌کنند، گره‌ای که بهترین مسیر را به مقصد دارد به عنوان ارسالگر بعدی انتخاب می‌شود. در این شیوه از شانس‌ها و فرصت‌ها صرف‌نظر نمی‌شود و از آنها جهت بهبود گذردهی استفاده خواهد شد[۱۵-۱۳].

EXOR [۱۳] یک پروتکل مسیریابی فرصت‌طلبانه است که با مجتمع‌سازی تکنیک MAC و مسیریابی، گذردهی انتقالات بزرگ تک‌پخشی در شبکه‌های بی‌سیم چند پرشه را افزایش می‌دهد. در EXOR، ابتدا مبدأ بسته را منتشر کرده و بعد از دانستن مجموعه گره‌های فعال دریافت‌کننده‌ی بسته، یکی از گیرنده‌ها را جهت ارسال انتخاب می‌کند. EXOR می‌تواند از اتصالات طولانی با نرخ‌های اتلاف بالا که در مسیریابی سنتی از آنها اجتناب می‌شود، بهره برد. EXOR گذردهی یک اتصال را افزایش می‌دهد ولی نسبت به مسیریابی سنتی هیچ ظرفیت بیشتری را از شبکه استفاده نمی‌کند.

EXOR [۱۳] برای کاهش هزینه‌ی توافق، به جای کار روی بسته‌های تکی، روی دسته‌ای از بسته‌ها کار می‌کند. هر بسته شامل یک سرآیند است که تمام ارسالگرهای بالقوه و کاندید را برحسب فاصله‌شان از مقصد لیست می‌کند. فاصله از مقصد به صورت تابعی از احتمال تحویل بسته اندازه‌گیری می‌شود. ارسالگرهای کاندید، بسته‌های دریافتی را بافر کرده و منتظر انتهای دسته می‌مانند. با اتمام انتقال بسته‌های یک دسته توسط مبدأ، ارسالگرها براساس ترتیبشان در لیست ارسال، اقدام به ارسال بسته‌های داخل بافر خود می‌کنند.

۴. روش پیشنهادی: به کارگیری مسیریابی فرصت‌طلبانه در کدگذاری شبکه

در روش کدگذاری COPE [۱۱]، فرآیند پیداکردن مسیر برعهده‌ی مسیریابی سنتی است و پرش بعدی از ابتدا برای بسته‌ها مشخص است. در این روش فرآیند یافتن فرصت کدگذاری کاملاً از فرآیند مسیریابی جدا شده است، بنابراین بسیاری از فرصت های کدگذاری از دست می‌روند. از طرف دیگر هرچند مسیریابی فرصت‌طلبانه نیز گذردهی را بهبود می‌بخشد امّا این روش نیز دارای ضعف‌هایی است. در این روش، به علّت اجباری که برای وجود هماهنگی و توافق بین ارسالگرها وجود دارد، امکان استفاده مجدد از فضا وجود ندارد. به‌علاوه ارسالگرهایی که بعد از ایجاد لیست ارسالگر، کیفیت پائینی در لینکشان به وجود می‌آید، ناگهان اتصال را از دست می‌دهند، در ادامه‌ی کار پروتکل اختلال ایجاد کرده و می‌توانند باعث عدم دریافت اعلام وصول اولویت‌های بالا شده که این امر موجب انتقال مجدد و کاهش بهره می‌شود [۱۸].

با توجه به معایب روش‌های COPE و EXOR، در این مقاله از روش مسیریابی فرصت طلبانه برای بهبودگذردهی کدگذاری شبکه‌های بی‌سیم استفاده شده است. روش پیشنهادی به عنوان یک پروتکل مسیریابی برای مش‌های بی‌سیم ساکن مانند شبکه‌های بی‌سیم ارتباطی در نظر گرفته می‌شود. این پروتکل همانند پروتکل COPE پایین لایه‌ی IP و بالای IEEE 802.11 MAC قرار گرفته و انتقال قابل اعتمادی[۲] را فراهم می‌آورد. این روش برای تحویل فایل‌های متوسط تا بزرگ (یعنی ۸ بسته به بالا) مناسب می‌باشد و برای فایل‌های کوچکتر یا بسته‌های کنترلی، از مسیریابی بهترین مسیر[۳] استفاده می‌شود. روش پیشنهادی از کدگذاری خطی استفاده می‌کند، بدین‌صورت که بسته‌های یک جریان خاص که مبدأ و مقصد یکسانی دارند با ضرایب تصادفی باهم ترکیب می‌شوند. اجزای روش پیشنهادی شامل مبدا، ارسالگر و مقصد می‌باشد که در ادامه شرح داده

[2] reliable
[3] Best path routing

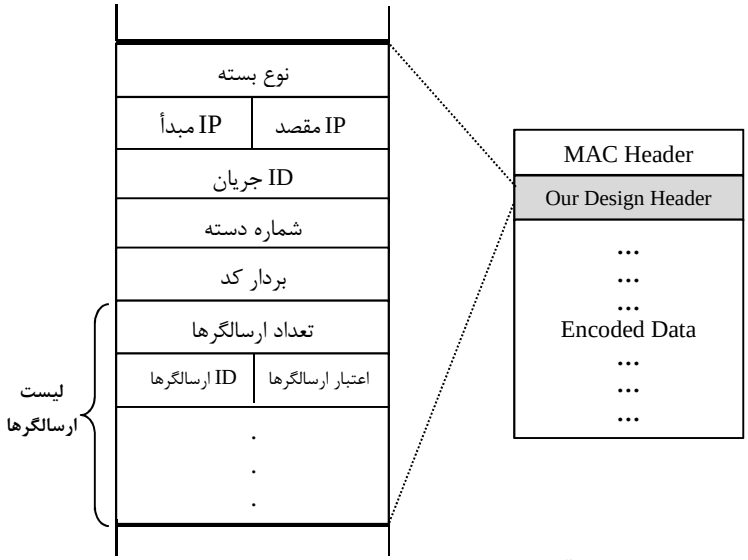
می‌شوند.

۴.۱. مبدأ

مبدأ فایل را به دسته‌های k بسته‌ای می‌شکند، که ممکن است تعداد k از دسته‌ای به دسته‌ای دیگر متفاوت باشد. این k بسته‌ی کدنشده، بسته‌های خام نامیده می‌شوند. هنگامی‌که IEEE 802.11 MAC آماده ارسال باشد، مبدأ یک ترکیب خطی تصادفی از k بسته‌ی خام داخل دسته‌ی جاری تولید کرده و آنها را انتشار می‌دهد. یک بسته‌ی کد شده یعنی $P' = \sum_i c_i p_i$ که c_iها ضرایب تصادفی انتخابی توسط گره می‌باشند و p_iها بسته‌های خام از یک دسته‌اند. $\vec{C} = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_k)$ بردار کد[4] نامیده می‌شود که نشان‌دهنده چگونگی تولید بسته کد شده از بسته‌های خام می‌باشد.

مبدأ سرآیندی با طول متغیر را به هر بسته داده اضافه می‌کند. سرآیند بردار کد در رمزگشایی مورد استفاده قرار خواهد گرفت و شامل شناسه‌ی دسته، آدرس IP مبدأ و مقصد و لیست گره‌هایی‌که قادرند در ارسال مشارکت کنند، می‌باشد. شکل ۲ سرآیند طراحی شده جهت قرارگیری در بسته را نشان می‌دهد. این سرآیند مانند سرآیند پروتکل COPE در زیر سرآیند MAC قرار می‌گیرد. برای محاسبه‌ی لیست ارسالگرها در روش پیشنهادی از معیار ETX[5] [۱۹] استفاده می‌شود. برای این منظور، گره‌ها متناوباً یکدیگر را Ping کرده و احتمال تحویل هر اتصال تخمین زده می‌شود. گره‌ها از این احتمالات جهت محاسبه‌ی فاصله‌ی ETX نسبت به مقصد استفاده می‌کنند. فاصله ETX، تعداد انتقال مورد انتظار جهت تحویل یک بسته از هر گره به مقصد می‌باشد. در لیست ارسالگر، گره‌هایی که نسبت به مبدأ به مقصد نزدیکتر هستند، قرار می‌گیرند. بنابراین، گره‌ها در این لیست برحسب مجاورتشان به مقصد مرتب شده‌اند.

فرستنده، انتقال بسته‌های کد شده دسته‌ی فعلی را تا اعلان وصول مقصد ادامه می‌دهد. در لحظه‌ی اعلان وصول، فرستنده کار را با دسته‌ی بعدی ادامه می‌دهد.



شکل ۲: سرآیند طراحی شده جهت قرارگیری در بسته

۴.۲. ارسالگرها

گره‌ها به تمام انتقال‌ها گوش می‌دهند و با شنیدن یک بسته، کنترل می‌کنند که آیا در لیست ارسالگر بسته قرار دارند یا خیر. در صورت قرار داشتن گره در لیست ارسالگر، وجود اطلاعات جدید در بسته بررسی می‌شود. در صورت وجود اطلاعات جدید ، بسته یک بسته‌ی ابتکاری[6] نامیده می‌شود. به زبان ریاضی، یک بسته در صورتی ابتکاری است که از بسته‌های دریافت شده همین دسته توسط گره مستقل خطی باشد. کنترل استقلال با استفاده از عملیات جبری حذف گاوسی انجام می‌شود. گره از تمام بسته‌های غیرابتکاری صرف نظر نموده و فقط بسته‌های ابتکاری دسته جاری را ذخیره می‌نماید.

اگر گره در لیست ارسالگر باشد، دریافت یک بسته جدید، گره را برای انتشار یک بسته کد شده تحریک می‌کند. برای انجام چنین کاری گره یک ترکیب خطی از بسته‌های کد شده‌ی دسته‌ی جاری ایجاد کرده و آن را انتشار می‌دهد. یک ترکیب خطی از بسته‌های کد شده نیز دوباره یک ترکیب خطی از بسته‌های خام متناظر می‌باشد. فرض کنید که ارسالگر بسته‌های کد شده‌ای به شکل $P_j' = \sum_i C_{ji} P_i$ را شنود کرده است، که P_iها بسته‌های خام هستند، دوباره گره این بسته‌های کد شده را با هم ترکیب می‌کند تا بسته‌های کد شده جدیدتری به صورت $P'' = \sum_j r_j P_j'$ بدست آید که r_jها عددهای تصادفی هستند. بسته‌های کد شده حاصل P'' را می‌توان به صورت مشتقی از

[4] Code Vector

[5] Expected transmission count metric

[6] Innovative packet

بسته‌های خام مطابق رابطه (۱) تعریف کرد.

$$P'' = \sum_j \left(r_j \sum_i C_{ji} P_i\right) = \sum_i \left(\sum_j r_j C_{ji}\right) P_i \quad (۱)$$

بنابراین بسته‌های P'' نیز یک ترکیب خطی از بسته‌های خام می‌باشند.

۴.۳. مقصد

مقصد برای کلیه‌ی بسته‌های دریافتی، کنترل ابتکاری بودن بسته یعنی استقلال خطی از بسته‌های دریافتی قبلی را انجام می‌دهد. مقصد نیز هیچ بسته غیرابتکاری را نمی‌پذیرد، زیرا شامل اطلاعات جدیدی نمی‌باشند. هنگامی‌که مقصد k بسته ابتکاری دریافت نمود، شروع به رمزگشایی کل دسته با استفاده از یک عمل معکوس‌یابی ساده‌ی ماتریسی مطابق رابطه‌ی (۲) می‌کند. با اینکار اصل بسته‌های خام حاصل می‌شود.

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ . \\ . \\ . \\ P_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & \dots & C_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{k1} & \dots & C_{kk} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} P'_1 \\ . \\ . \\ . \\ P'_k \end{pmatrix} \quad (۲)$$

در این رابطه، P_i بسته‌ی خام، P'_i بسته کد شده و $\overrightarrow{C_i} = C_{i1}, \dots, C_{ik}$ بردار کد می‌باشند. به محض رمزگشایی دسته توسط مقصد، تصدیقی[۷] به مبدأ برای ارسال دسته بعدی فرستاده می‌شود. تصدیق‌ها با استفاده از بهترین مسیر فرستاده می‌شوند که اینکار به علّت وجود همزمان 802.11 استاندارد در کنار روش پیشنهادی ممکن است. تصدیق‌ها همچنین نسبت به بسته‌های داده‌ای در هر گره اولویت دارند.

۵. چالش‌های عملی

در بخش ۴ روش پیشنهادی بررسی شد ولی برای عملی شدن این روش با سه چالش به شرح زیر مواجه خواهیم بود.

۵.۱. تعداد ارسال یک بسته توسط ارسالگر

در مسیریابی سنتی بهترین مسیر، یک گره به انتقال یک بسته تا دریافت آن توسط پرش بعدی یا تا بالاتر رفتن تعداد انتقال‌ها از یک آستانه ادامه می‌دهد. امّا در مسیریابی فرصت‌طلبانه، هیچ پرش بعدی خاصی وجود ندارد و تمام گره‌هایی که نسبت به ارسال‌کننده فعلی به مقصد نزدیکترند به صورت بالقوه می‌توانند پرش بعدی باشند و ممکن است در ارسال بسته همکاری کنند.

عموماً نادرترین منبع در یک شبکه پهنای باند است. بنابراین، روش طبیعی برای افزایش استفاده از پهنای باند، کاهش تعداد انتقال‌های لازم جهت تحویل یک بسته از مبدأ به مقصد می‌باشد [۱،۱۳،۱۹]. فاصله‌ی گره i تا مقصد d به عنوان ETX گره i و به صورت تعداد انتقال‌های لازم برای تحویل یک بسته از گره i به گره d و از طریق بهترین مسیر تعریف می‌شود. روش پیشنهادی این مقاله برای مسیریابی یک بسته از مبدأ S به مقصد d به صورت زیر عمل می‌کند. زمانی‌که یک گره بسته‌ای را ارسال می‌کند، نزدیکترین گره به مقصد در مقیاسETX در بین گره‌هایی که بسته را دریافت کرده‌اند باید ارسال بسته را به عهده بگیرد. این روش، تعداد انتقال‌های لازم برای تحویل بسته را کاهش داده و به این ترتیب گذردهی کلی را افزایش می‌دهد. بنابراین در روش پیشنهادی، برای هر گره ارسالگر i یک شمارنده اعتباری در نظر گرفته می‌شود. این شمارنده در آغاز برابر ETX گره است که توسط مبدأ و در سرآیند پشته در کنار شناسه‌ی ارسالگر به همه‌ی گره‌ها از جمله خود ارسالگر، ارسال می‌شود. با دریافت هر بسته از سمت گره‌های بالادست‌تر، شمارنده گره i افزایش می‌یابد. زمانی‌که IEEE 802.11 MAC اجازه‌ی انتقال را به گره بدهد، مثبت یا منفی بودن شمارنده توسط گره بررسی می‌شود. اگر مقدار شمارنده مثبت باشد، گره یک بسته کد شده تولید کرده و سپس شمارنده را کم می‌کند. اگر مقدار شمارنده منفی باشد، گره انتقالی انجام نمی‌دهد. این شمارنده در شکل ۲ با نام اعتبار ارسالگر مشخص شده است.

۵.۲. قانون توقف

در روش پیشنهادی، ترافیک شبکه از طریق مبدأ تزریق می‌شود. ارسالگرها تا زمانی‌که بسته جدیدی را دریافت نکرده‌اند ترافیکی را تولید نمی‌کنند. بنابراین بسیار مهم است که به محض آنکه مقصد بسته‌های کافی جهت رمزگشایی دسته دریافت کرد، جلوی ارسال مبدأ گرفته شود تا ترافیک بی‌جهت بالا نرود. برای این کار، با دریافت k اُمین بسته ابتکاری توسط مقصد و قبل از رمزگشایی کامل دسته، تصدیق (ACK) برای مبدأ فرستاده می‌شود. برای تسریع در تحویل تصدیق‌ها، آنها از طریق کوتاهترین مسیر بین مبدأ و مقصد ارسال می‌شوند. به علاوه، در

[7] Acknowledgment

تمام گره‌ها، تصدیق نسبت به بسته‌های داده‌ای اولویت بالاتری داشته و با استفاده از انتقال مجدد محلی در هر پرش به صورت مطمئنی تحویل داده می‌شود. هنگامی‌که مبدأ تصدیق دسته جاری را دریافت کند، ارسال این دسته متوقف می‌شود. اگر انتقال مورد نظر پایان نیافته باشد، مبدأ به انتقال بسته‌های دسته بعدی ادامه می‌دهد.

۵.۳. کدگذاری شبکه سریع

کدگذاری شبکه ساده ممکن است بسیار هزینه‌بر باشد. همانگونه که پیش از این نیز مطرح شد، مسیریاب‌ها ترکیبات خطی بسته‌های دریافتی خود را ارسال می‌کنند. ترکیب N بسته با سایز S بایت مستلزم NS ضرب و جمع است. به علّت طبیعت انتشاری رسانه‌ی بی‌سیم، مسیریاب‌ها می‌توانند چندین بسته از یک دسته را دریافت کنند. اگر یک مسیریاب تمام این بسته‌ها را با هم کد کند، ممکن است هزینه کدگذاری بسیار زیاد شده و یک گلوگاه برای CPU به وجود آورد.

روش پیشنهادی برای کدگذاری مؤثر از دو تکنیک کد کردن بسته‌های ابتکاری و عملیات روی بردار کد استفاده می‌کند تا تضمین کند که مسیریاب‌ها به نرخ بالایی دست می‌یابند.

الف) کد کردن بسته‌های ابتکاری

هزینه کدگذاری متناسب با تعداد بسته‌هایی است که با هم کد می‌شوند. کدگذاری شبکه، مسیریاب‌ها را مجبور به ارسال ترکیبات خطی بسته‌های دریافتی می‌کند. امّا کد کردن بسته‌های غیرابتکاری مفید نیست زیرا هیچ اطلاعات جدیدی را به محتوای هیچ گره‌ای اضافه نمی‌کنند. بنابراین، هنگامی‌که ارسالگر یک بسته کد شده جدید را دریافت می‌کند، تنها بسته‌های ابتکاری را نگه می‌دارد و بسته‌های غیرابتکاری را دور می اندازد. عدم پذیرش بسته‌های غیرابتکاری باعث محدود شدن دو فاکتور غیرمفید می‌شود:

محدود شدن تعداد بسته‌های بافرشده از هر دسته توسط ارسالگر

محدود شدن تعداد بسته‌های ترکیب شده برای تولید بسته کد شده

ب) عملیات روی بردار کد

همانگونه که قبلاً بیان شد، با دریافت یک بسته، بررسی ابتکاری بودن آن انجام می‌گیرد. بررسی استقلال تمام بایت‌های داده‌ای خیلی هزینه‌بر است. خوشبختانه چنین کاری را می‌توان با بررسی استقلال خطی بردار کد انجام داد.

برای کاهش هزینه، بردار کد بسته‌ها در بافر هر گره به شکل یک ردیف پله‌ای[8] نگهداری می‌شود. به طور خاص، بردارهای کد در یک ماتریس مثلثی به نام M با k سطر ذخیره می‌شوند که بعضی از ردیف‌ها خالی می‌باشند. بنابراین، برای هر ردیف ذخیره شده، کوچکترین اندیس از عنصر غیرصفرش مشخص (متمایز) می‌باشد. برای بررسی استقلال خطی بردار کد بسته‌ای که به تازگی دریافت شده، سطرهای دارای محتوا در ضریب‌های مناسب ضرب شده و سپس به منظور صفر کردن پشت سرهم عناصر بردار، با آنها جمع می‌شود. اگر بردار استقلال خطی داشته باشد، حداقل یکی از عناصر به علت یک سطر خالی (از دست رفته) صفر نخواهد شد و بردار تغییر یافته از همین شکاف خالی می‌تواند به ماتریس اضافه شود. شبه کد الگوریتم بررسی استقلال خطی بردار u در ادامه بیان شده است.

```
for i=1… k do
        if u[i]≠0 then
                if M[i] exists then
                   u ← u - M[i]u[i]
                else
                   { پذیرش و وارد کردن بلاک تغییر یافته}
        M[i] ← u/u[i]
                Return True {رتبه افزایش می‌یابد}
return False {بسته پذیرفته نمی‌شود}
```

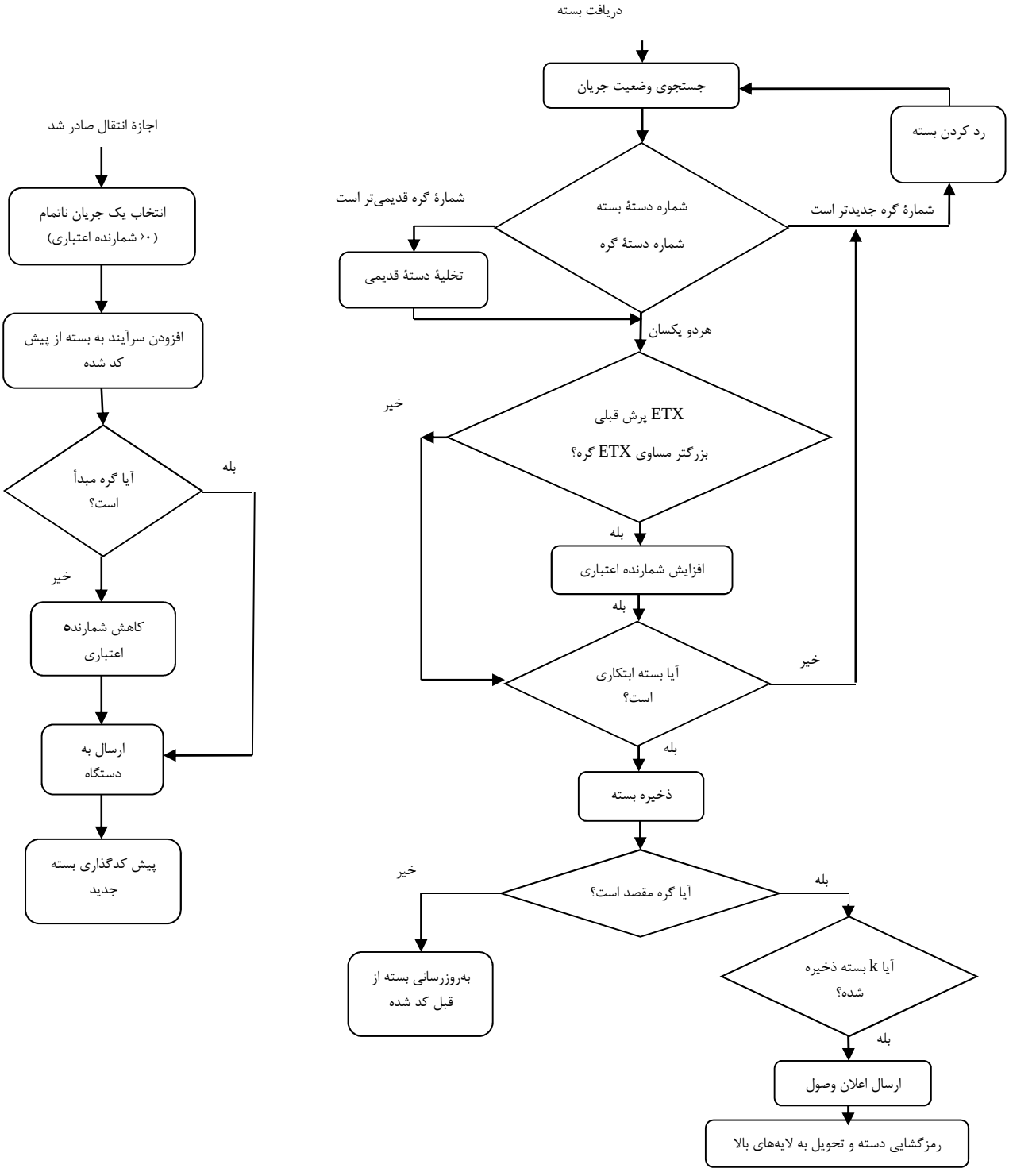
الگوریتم ۱: شبه کد الگوریتم بررسی استقلال خطی بردار u

پروسه بررسی استقلال خطی تنها NK ضرب به ازای هر بسته لازم دارد، که N تعداد ردیف‌های غیرخالی بوده و توسط K محدود می‌شود. رمزگشای داخل مقصد، مشابه چنین الگوریتمی را برای هرکدام از بسته‌های دریافتی تکرار می‌کند. رمزگشایی نیز به نوبه خود مستلزم $2NS$ ضرب برای هر بسته است (S اندازه‌ی بسته را مشخص می‌کند) تا در نهایت ماتریس واحدی حاصل شود.

عملیات روی بایت‌های داده‌ای، تنها در زمان کدگذاری یا رمزگشایی و در گره‌های مبدأ یا مقصد انجام می‌شود. در مقابل، بررسی ابتکاری بودن برای تمام بسته‌های شنود شده انجام می‌شود که نسبتاً کم هزینه است.

فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.

[8] Row echelon form



ب) سمت گیرنده

الف) سمت فرستنده

شکل ۳: فلوچارت روش پیشنهادی

۶. شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

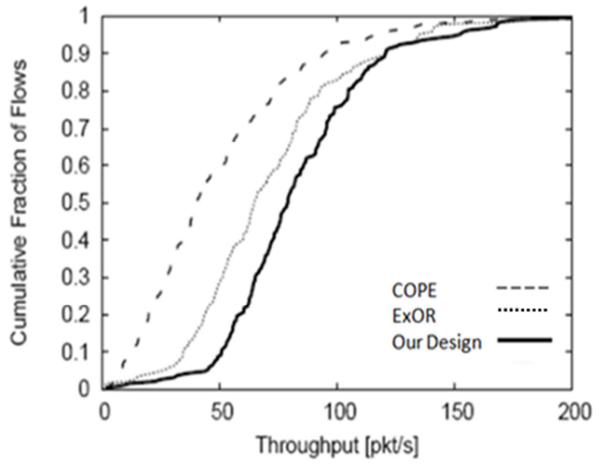
برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی و مقایسه با پروتکل‌های COPE و EXOR، شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از نرم‌افزار NS-2 برای مش‌های بی‌سیم ساکن انجام می‌شود. محیط در نظرگرفته شده در آزمایشات شامل بیست گره ثابت با طول مسیر ۵-۱ پرش بین گره‌ها است. نرخ اتلاف اتصالات در این مسیرها از صفر تا ۶۰٪ تغییر کرده و متوسط نرخ اتلاف برابر ۲۷٪ است. پارامترهای در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی‌ها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. جهت اندازه‌گیری احتمال تحویل لینک از معیار ETX استفاده می‌شود. به این ترتیب که قبل از اجرای هر آزمایش، ماژول اندازه‌گیری ETX اجرا می‌شود تا احتمالات تحویل بین هر جفت گره بدست آید، سپس اندازه‌های ETX متناظر هر جفت گره بدست می‌آید.

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
تعداد گره‌ها	۲۰
طول مسیرهای بین گره‌ها	۵-۱ پرش
نرخ اتلاف اتصالات در مسیرها	صفر تا ۶۰٪
متوسط نرخ اتلاف	۲۷٪
اندازه فایل مورد انتقال	۵ مگابایت
اندازه بسته‌ها	۱۵۰۰ بایت
k	۳۲
تعداد دفعات اجرای شبیه سازی	۴۰

۶.۱ گذردهی

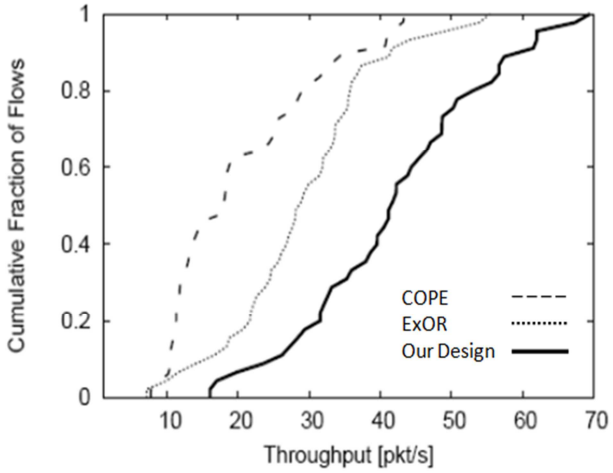
هدف اصلی روش پیشنهادی، بهبود گذردهی در مقایسه با پروتکل‌های EXOR و COPE است. شکل ۴، تابع توزیع تجمعی گذردهی تک‌پخشی حاصل از روش پیشنهادی، پروتکل EXOR و پروتکل COPE را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمودار گذردهی تک‌پخشی

همانگونه که از شکل ۴ مشخص است، روش پیشنهادی، گذردهی تک‌پخشی را نسبت به پروتکل‌های EXOR و COPE بهبود داده است. استفاده مجدد فضایی، دلیل اصلی برای بهبود گذردهی روش پیشنهادی نسبت به EXOR است. EXOR از دسترسی همزمان چندین ارسالگر به رسانه جلوگیری می‌کند، بنابراین از قابلیت استفاده مجدد فضایی بهره‌ای نمی‌گیرد.

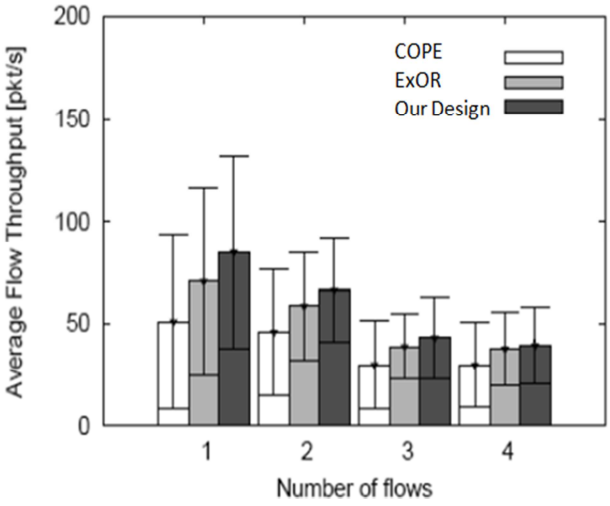
شکل ۵، تابع توزیع تجمعی گذردهی تک‌پخشی روش پیشنهادی و پروتکل‌های EXOR و COPE را برای جریاناتی که در بین چهار پرش جابجا می‌شوند، نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است، برای جریانات چهار پرشه با امکان استفاده مجدد فضایی، گذردهی روش پیشنهادی نسبت به روش‌های EXOR و COPE بهبود یافته است.



شکل ۵: نمودار استفاده مجدد فضایی

۶.۲. جریان‌های چندگانه

شکل ۶، متوسط گذردهی هر جریان را به عنوان تابعی از تعداد جریانات همزمان برای سه پروتکل نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است، بهره گذردهی روش پیشنهادی و پروتکل EXOR نسبت به پروتکل COPE بالاتر است، زیرا مسیریابی فرصت‌طلبانه از شانس‌های دریافت برای بهبود گذردهی بهره می‌گیرد و این شانس‌ها نقشی در افزایش ظرفیت شبکه ندارند.



شکل۶: گذردهی متوسط هر جریان در زمان حضور چندین جریان

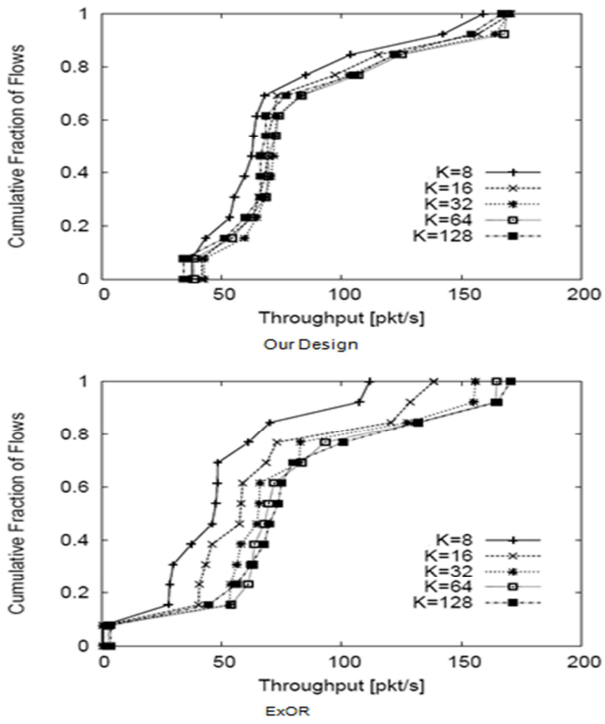
۶.۳. اندازه دسته

شکل ۷، گذردهی روش پیشنهادی و پروتکل EXOR را برای دسته‌هایی با اندازه ۸، ۱۶، ۳۲، ۶۴ و ۱۲۸ بسته نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است، کارآیی EXOR با دسته‌های کوچک ۸ بسته‌ای به طور قابل توجهی پائین‌تر از دسته‌های بزرگ است. در مقابل، روش پیشنهادی حساسیتی درباره‌ی اندازه‌ی دسته‌ها ندارد.

۶.۴. سربارهای روش پیشنهادی

در این بخش، سربارهای روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) سربار کدینگ: اصلی‌ترین هزینه در روش پیشنهادی، کدگذاری و کدگشایی است. برای بهینه‌سازی عملیات ضرب بسته در یکسری عدد تصادفی (در میدان محدودی به اندازه 2^8) و کم کردن هزینه، از یک جدول ۶۴ کیلوبایتی استفاده می‌شود که شاخص آن یک جفت عدد هشت بیتی است که عملوندهای ضرب محسوب می‌شوند.



شکل ۷: تأثیر اندازه دسته بر گذردهی در روش پیشنهادی و EXOR

این جدول۶۴ کیلوبایتی، تمام نتایج حاصل‌ضرب را در خود ذخیره می‌کند. بنابراین، ضرب هر بایت از یک بسته در یک عدد تصادفی تبدیل به یک عمل ساده جستجوی سریع در جدولی با شاخص دوگانه خواهد شد.

جدول ۲، متوسط هزینه محاسباتی برای عملیات کدگذاری و کدگشایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها، روی یک ماشین با پردازندهٔ Celeron و سرعت ۸۰۰ مگاهرتز انجام گرفته است. اعداد نشان می‌دهند که کدگذاری و کدگشایی تقریباً هزینه برابری دارند. کدگذاری و کدگشایی به‌طور متوسط، مستلزم انجام k عمل ضرب روی دو عدد است که هر عدد در یک بایت ذخیره شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، اندازه دسته K=32 است و کدگذاری به‌طور متوسط برای هر بسته ۱۵۰۰ بایتی به اندازه ۲۷۰ میکروثانیه طول کشیده است. همین تأخیر، گذردهی مؤثر را به 44 Mb/s محدود می‌کند.

جدول ۲: متوسط هزینه محاسباتی برای عملیات روی بسته در روش پیشنهادی

عملیات	زمان متوسط (برحسب میکروثانیه)	انحراف استاندارد (برحسب میکروثانیه)
کنترل استقلال	۱۰	۵
کدکردن در مبدأ	۲۷۰	۱۵
کدگشایی	۲۶۰	۱۵۰

ب) سربار حافظه: در روش پیشنهادی، مشابه پروتکل EXOR، مسیریاب‌ها صف خروجی ندارند. در عوض در این دو روش، دسته جاری از هر جریان ذخیره می‌شود. این مسأله باعث مصرف حافظه شده تا گره، بسته‌های ابتکاری دسته جاری را ذخیره کند، که این بسته‌ها به K=32 محدود می‌شوند. به‌علاوه، همان‌گونه که گفته شد این روش برای تسریع در امر کدگذاری و کدگشایی یک جدول ۶۴ کیلوبایتی نیاز دارد. امّا با دانستن آنکه تعداد جریان‌های همروند در یک شبکه مش نسبتاً کم است پس سربار حافظه خیلی زیاد نیست و قابل قبول است.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای بهبود گذردهی کدگذاری شبکه‌های بی‌سیم با استفاده از مسیریابی فرصت‌طلبانه پیشنهاد شد. روش پیشنهادی از کدگذاری تصادفی خطی بسته‌های ارسالی از یک مبدأ استفاده می‌کند. با این‌کار نه تنها کدگشایی در تمام گره‌های میانی لازم نیست، بلکه انواع توپولوژی را پوشش می‌دهد. علاوه بر این، در مسیریابی روش پیشنهادی از ابتدا و قبل از شروع انتقال، مسیر ثابت در نظر گرفته نمی‌شود و از دریافت‌های شانسی نیز بهره‌برداری می‌شود. در ضمن، در روش پیشنهادی توافقات دست و پاگیر مسیریابی فرصت‌طلبانه هم وجود ندارد، زیرا هیچ زمانبندی و اعلام وصولی لازم نیست. تنها در صورتی‌که مقصد بتواند کدگشایی را انجام دهد، تصدیق را به سمت مبدأ ارسال می‌نماید. شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از شبیه‌ساز NS-2 و مقایسه‌ی روش پیشنهادی و پروتکل کدگذاری COPE و پروتکل فرصت طلبانه EXOR نشان می‌دهد که روش پیشنهادی گذردهی شبکه را به طور قابل توجهی بهبود می‌دهد.

مراجع

[1] Aguayo , D., Bicket, J., Biswas, S., Judd , G., and Morris, R., 2004, Link–level measurements from an 802.11b mesh network, In *Proceedings of the ACM SIGCOMM, Portland, Oregon.*

[2] Benyamina, D., Hafid, A., & Gendreau, M. (2012). Wireless mesh networks design—a survey. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, *14*(2), 299-310.

[3] Akyildiz, I. F., Wang, X., & Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: a survey. *Computer networks*, *47*(4), 445-487.

[4] Pathak, P. H., & Dutta, R. (2011). A survey of network design problems and joint design approaches in wireless mesh networks. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, *13*(3), 396-428.

[5] Fragouli, C., & Soljanin, E. (2007). *Network coding fundamentals*. Now Publishers Inc.

[6] Fragouli, C. (2011). Network coding: Beyond throughput benefits. *Proceedings of the IEEE*, *99*(3), 461-475.

[7] Agarwal, A., & Charikar, M. (2004, October). On the advantage of network coding for improving network throughput. In *Information Theory Workshop, 2004. IEEE* (pp. 247-249). IEEE.

[8] Chekuri, C., Fragouli, C., & Soljanin, E. (2006). On average throughput and alphabet size in network coding. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, *14*(SI), 2410-2424.

[9] Ahlswede, R., Cai, N., Li, S. Y., & Yeung, R. W. (2000). Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, *46*(4), 1204-1216.

[10] Li, S. Y., Yeung, R. W., & Cai, N. (2003). Linear network coding. *IEEE Transactions on Information Theory*, *49*(2), 371-381.

[11] Katti, S., Rahul, H., Hu, W., Katabi, D., Médard, M., & Crowcroft, J. (2006, September). XORs in the air: practical wireless network coding. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (Vol. 36, No. 4, pp. 243-254). ACM.

[12] Katti, S., Rahul, H., Hu, W., Katabi, D., Médard, M., & Crowcroft, J. (2008). XORs in the air: practical wireless network coding. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, *16*(3), 497-510.

[13] Biswas, S., & Morris, R. (2004). Opportunistic routing in multi-hop wireless networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, *34*(1), 69-74.

[14] Chachulski, S., Jennings, M., Katti, S., & Katabi, D. (2007). *Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing* (Vol. 37, No. 4, pp. 169-180). ACM.

[15] Zhong, Z., & Nelakuditi, S. (2007, June). On the efficacy of opportunistic routing. *4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2007. SECON'07.* (pp. 441-450). IEEE.

[16] Gupta, P., & Kumar, P. R. (2003). Towards an information theory of large networks: An achievable rate region. *IEEE Transactions on Information Theory*, *49*(8), 1877-1894.

[17] Li, J., Blake, C., De Couto, D. S., Lee, H. I., & Morris, R. (2001, July). Capacity of ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking* (pp. 61-69). ACM.

[18] Chau, C. K., Seetharam, A., Kurose, J., & Towsley, D. (2013, January). Opportunism vs. cooperation: Comparing forwarding strategies in multihop wireless networks with random fading. In *Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2013 Fifth International Conference on* (pp. 1-10). IEEE.

[19] De Couto, D. S., Aguayo, D., Bicket, J., & Morris, R. (2005). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks*, *11*(4), 419-434.