مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال پنجم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۳؛ ص ۱۴۵-۱۳۳

طراحی کانال پوششی زمانبندی‌دار ترکیبی و ارزیابی آن با استفاده از شبکه پتری رنگی

مهدی دهقانی[۱]، محمود صالح اصفهانی[۲*]

۱- کارشناس ارشد ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۳/۰۱/۲۹، پذیرش: ۹۳/۰۷/۱۶)

چکیده

کانال پوششی زمانبندی‌دار برای پنهان‌سازی و انتقال اطلاعات در پوشش شبکه‌های رایانه‌ای به‌کار می‌رود. برای کدبندی اطلاعات در این کانال‌ها از فنون «فاصله بین بستک‌ها» و «ترتیب بستک‌ها» به طور جداگانه استفاده شده است. برای ارزیابی ظرفیت و استحکام کانال‌های پوششی نیز چندین کار تحقیقی انجام‌گرفته که به روش اندازه‌گیری در محیط واقعی یا روش محاسباتی بوده‌اند. روش اندازه‌گیری در محیط واقعی، فاقد قابلیت تکرارپذیری آزمایش است و روش محاسباتی معمولاً آن‌قدر ساده است که امکان ارزیابی کانال در شرایط مطلوب را به محقق نمی‌دهد. در این مقاله روش کدبندی ترکیبی، با ترکیب روش‌های «فاصله بین بستک‌ها» و «بازترتیب بستک‌ها» ارائه شده و برای ارزیابی آن نیز مدلی برای کانال ارتباطی انتها تا انتها با استفاده از شبکه پتری رنگی ارائه شده است. مدل پیشنهادی قادر است انواع مختلف نویز همانند مفقود شدن، بازترتیب و لغزش زمان بین بستک‌ها را به ترافیک مورد نظر تزریق نماید. این مدل برای پیاده‌سازی کانال پوششی زمانبندی‌دار ترکیبی کنترل شده تحت سطوح نویز مطلوب استفاده شده است. سپس معیارهای ظرفیت و استحکام کانال پوششی پیشنهادی با استفاده از سناریوهای نویز متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج تحقیق با کارهای قبلی که به روش محاسباتی انجام گرفته، مقایسه شده است. نتایج تحقیق، ارتقای نسبی ظرفیت و استحکام کانال پیشنهادی را نشان می‌دهد. علاوه بر آن، مؤثر بودن مدل پیشنهادی برای ارزیابی کانال پوششی در شرایط مورد نظر نیز اثبات شده است.

کلید واژه‌ها: کانال پوششی زمانبندی‌دار، زمان بین بستک‌ها، ترتیب بستک‌ها، مفقود شدن بستک‌ها، مدل‌سازی، شبکه پتری رنگی.

Modeling and Evaluation of Hybrid Covert Timing Channel on Internet Using Coloured Petri net

M. Dehghani, M. Saleh Esfahani*

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 18/04/2014; Accepted: 08/10/2014)

Abstract

Covert timing channels are used to transmit information through computer networks in a seamless or secret way. Inter-packet gap and packet reordering are among techniques of encoding information in covert channels. Several reports on evaluating the capacity and the robustness of covert channels are published in which the channel is evaluated using real environment field tests or by means of computational methods. Real environment field experiment lacks the repeatability property of the test and computational method is normally too simple to enable one to evaluate the channel under desired circumstances. In this paper, a hybrid coding schema is proposed compounding inter-packet gap and packet reordering techniques, and also a model for an end to end communication channel in the Internet is proposed using Coloured Petri net. The model is able to inject different types of noises such as packet loss, packet reordering, and jitter to a given traffic. The model was used to implement a controlled hybrid covert timing channel under desired noise levels. Then, the capacity and robustness of the proposed covert channel was measured using different noise scenarios. The evaluation results demonstrate that capacity and robustness of the proposed covert channel is improved compared with the previous reports. Also it is proved that the proposed model is effective for further covert channel evaluation in given circumstances.

Keywords: Covert Timing Channel, Inter-Packet Gap, Packet Reordering, Packet Loss, Modeling Coloured Petri Net.

* Corresponding Author E-mail: msaleh@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

شبکه اینترنت به عنوان یک پدیده جدید در عصر اطلاعات، پدیده‌های متعددی را با خود به همراه آورده است که هر کدام تهدیدات و فرصت‌هایی را به دنبال دارند. یکی از فناوری‌های اصلی تشکیل دهنده اینترنت، پروتکل‌های ارتباطی شبکه‌های رایانه‌ای است که در انواع مختلف و برای کاربردهای متعدد طراحی و ایجاد شده است. پروتکل‌های ارتباطی با ویژگی‌های ساختاری، نحوه برقراری ارتباط، ظرفیت ارتباطی، سطح امنیت و کاربردهای متفاوت، دارای آسیب‌پذیری‌های متعددی نیز می‌باشند.

نشت اطلاعات[1] محرمانه یا حساس از طریق پروتکل‌های شبکه، جزء تهدیدات مهم امنیتی برای شبکه‌ها شناخته می‌شود. یکی از راه‌های اصلی که عمده نشت اطلاعات سازمان‌ها در اینترنت از طریق آن انجام می‌شود کانال‌های پوششی است [۱]. کانال پوششی درواقع یک ارتباط پنهان است که در پوشش یک ارتباط آشکار برقرار می‌گردد و اصل وجود ارتباط و طرفین ارتباط مخفی می‌ماند [۲]. کانال‌های پوششی منجر به نشت اطلاعات از یک کاربر با سطح دسترسی بالا به کاربر دیگر با سطح دسترسی پایین می‌گردند. کانال پوششی ممکن است بین دو پردازه در یک رایانه و یا سطوح دسترسی متفاوت یا بین دو رایانه در یک شبکه، برای انتقال اطلاعات به صورت پنهانی ایجاد شود. به کانال‌های پوششی که با بهره‌گیری از ویژگی‌های پروتکل ارتباطی شبکه، بین دو رایانه در یک شبکه ایجاد می‌شود کانال پوششی تحت شبکه گویند. در برخی مقالات، کانال‌های پوششی تحت شبکه را پنهان‌نگاری شبکه‌ای[2] نیز می‌نامند[۳]. این دسته محققین، کانال‌های پوششی را در کنار دیگر فنون پنهان‌نگاری در تصویر، صوت و متن، در تنه درخت پنهان‌سازی اطلاعات دسته‌بندی می‌نمایند [۴].

چون اصولاً کانال پوششی برای برقراری ارتباط پنهان استفاده می‌گردد، می‌تواند با دید فرصت نیز مورد بهره‌برداری قرار گیرد. برای مخفی ماندن ارتباط و طرفین ارتباط درحالی‌که شبکه ارتباطی کاملاً تحت نظارت است، از کانال پوششی می‌توان برای برقراری ارتباط امن و پنهان در شبکه استفاده نمود [۵].

کانال‌های پوششی زمانبندی‌دار از ویژگی‌های زمان‌بندی بستک‌های[3] شبکه شامل؛ بازترتیب بستک‌ها[4]، فاصله بین بستک‌ها[5]، نرخ بستک، زمان‌بندی توالی پیام، گم شدن بستک‌ها و تصادم فریم‌ها برای کدبندی اطلاعات پوششی استفاده می‌نمایند [۶]. کانال‌های ارتباطی که کانال پوششی بر آن سوار می‌شود، به دلیل دارا بودن خواص احتمالاتی و تصادفی، متناسب با هر یک از ویژگی‌های زمان‌بندی، همواره دارای نویزهایی چون لغزش زمانی[6]، گم شدن و بازترتیب بستک‌ها هستند. همواره غلبه بر این نویزها و افزایش ظرفیت، استحکام و نامحسوسی کانال پوششی به‌منظور برآوردن نیازهای کاربردهای موردنظر، همت محققین بوده است و این مهم با ارائه روش‌های کدبندی مناسب قابل‌دستیابی است.

پیش از این در حوزه ارزیابی کانال‌های پوششی نیز تحقیقات متعددی صورت گرفته است. ولی تمام ارزیابی‌های صورت گرفته در این حوزه، تاکنون مبتنی بر اندازه‌گیری در محیط واقعی یا روش محاسباتی بوده است. روش‌های محاسباتی و روش‌های اندازه‌گیری در محیط واقعی، امکان ایجاد شرایط خاص و ارزیابی کانال در آن شرایط را ندارند. هدف این تحقیق رفع این محدودیت و فراهم نمودن امکان آزمایش و مطالعه شرایط خاص و ارزیابی روش جدید کدبندی ترکیبی است. این امر با مدل‌سازی انتها تا انتهای[7] کانال ارتباطی در شبکه اینترنت که حاوی سه نویز مفقود شدن، بازترتیب و لغزش زمان بین بستک‌ها است و با استفاده از شبکه پتری رنگی[8] و ابزار CPNTools [۷] انجام‌شده است. سپس با استفاده از مدل ارائه شده ، معیارهای ظرفیت و استحکام کانال پوششی زمانبندی‌دار ترکیبی مورد ارزیابی قرارگرفته است.

در بخش دوم این مقاله به شرح پیشینه تحقیق شامل روش‌های کدبندی فاصله بین بستک‌ها، بازترتیب بستک‌ها و مدل‌های انتها تا انتهای هر یک از نویزهای کانال ارتباطی در شبکه اینترنت پرداخته و در بخش سوم، طرح کدبندی ترکیبی در کانال پوششی زمانبندی‌دار ارائه می‌گردد. در بخش چهارم مقاله مدل ترکیبی انتها تا انتهای کانال نویزی در شبکه اینترنت، حاوی سه نویز لغزش زمانی، بازترتیب بستک‌ها و مفقود شدن بستک‌ها ارائه می‌گردد. در بخش پنجم به تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی می‌پردازد. درنهایت بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از این تحقیق می‌پردازد.

۲. پیشینه تحقیق

کانال‌های پوششی تحت شبکه به دودسته انبارشی و زمانبندی‌دار تقسیم می‌شوند [۸]. کانال‌های انبارشی[9]، اطلاعات پوششی را در فیلدهای رزرو یا فیلدهای استفاده‌نشده یا در فیلدهایی که امکان استفاده از آن‌ها بدون تأثیر در عملکرد پروتکل وجود دارد، ذخیره می‌نمایند. فرستنده داده‌های موردنظر را در این فیلدها می‌نویسد و گیرنده آن‌ها را از این فیلدها می‌خواند. در کانال‌های زمانبندی‌دار، فرستنده اطلاعات پوششی را روی ویژگی‌های زمان‌بندی ارسال بستک‌ها سوار می‌کند. یعنی زمان‌بندی ارسال بستک‌ها را به نحوی دستکاری می‌کند که حامل اطلاعات موردنظر باشد. گیرنده از این نحوه دستکاری یا به‌بیان‌دیگر کدبندی اطلاعات آگاه است و می‌تواند اطلاعات را کدگشایی کند.

[1] Information leakage
[2] Network Steganography
[3] Packets
[4] Reordering
[5] Inter-Packet Gaps
[6] Jitter
[7] End to End
[8] Coloured Petri net
[9] Covert Storage Channel

۲-۱. کانال پوششی زمانبندی‌دار

کانال‌های پوششی زمانبندی‌دار[1] از ویژگی‌های زمان‌بندی بستک‌های شبکه برای سوار کردن اطلاعات استفاده می‌کنند و داده‌های پوششی را در زمان‌بندی فریم‌ها، بستک‌ها یا پیام‌هایی که مستقیماً بین فرستنده و گیرنده مبادله می‌شوند کدبندی می‌نمایند. کانال‌های زمانبندی‌دار به دلیل عدم دقت زمان‌بندی در فرستنده و گیرنده و لغزش زمانی شبکه، همیشه دارای نویز هستند. ظرفیت کانال‌های زمانبندی‌دار اغلب کمتر از کانال‌های انبارشی عاری از نویز است، اما در عوض، تشخیص و حذف آن‌ها سخت‌تر است. روش‌هایی که برای کدبندی در این دسته کانال‌ها استفاده‌شده است شامل؛ بازترتیب بستک‌ها، فاصله بین بستک‌ها، نرخ بستک، زمان‌بندی توالی پیام، گم شدن بستک‌ها، تصادم فریم‌ها است [۶]. کانال‌های پوششی دارای سه معیار ارزیابی کارایی ظرفیت، نامحسوسی و استحکام هستند که تعریف آن‌ها به شرح زیر است [۶]:

ظرفیت: حداکثر نرخ ارسال بدون خطا از کانال پوششی را ظرفیت یا پهنای باند کانال می‌نامند. ظرفیت معمولاً با واحد بیت بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود؛ اما ظرفیت کانال‌های پوششی شبکه به صورت بستک بر ثانیه نیز بیان می‌گردد که در اینجا منظور از بستک همان بستک‌های کانال آشکار/حامل است.

نامحسوسی: نامحسوسی نشانگر میزان دشواری تشخیص کانال پوششی است که با مقایسه مشخصه‌های ترافیک کانال پوششی با ترافیک مجاز انجام می‌گردد. روش‌های تشخیص کانال‌های پوششی مبتنی بر تحلیل آماری ترافیک شبکه و تشخیص ناهنجاری رفتاری پایه‌گذاری شده‌اند. برای تشخیص کانال‌های پوششی زمانبندی‌دار از آزمون‌های خاص روی زمان‌بندی ترافیک شبکه استفاده می‌شود که این آزمون‌ها به دودسته کلی تقسیم می‌شوند [۹]: آزمون‌های شکل[2] و آزمون‌های قاعده‌مندی[3]. شکل ترافیک با آمارهای مرتبه اول مثل میانگین، واریانس و توزیع، توصیف می‌گردد. قاعده‌مندی ترافیک توسط آمارهای مرتبه دوم یا بالاتر مثل آنتروپی یا آنتروپی شرطی اصلاح‌شده[4] توصیف می‌شود.

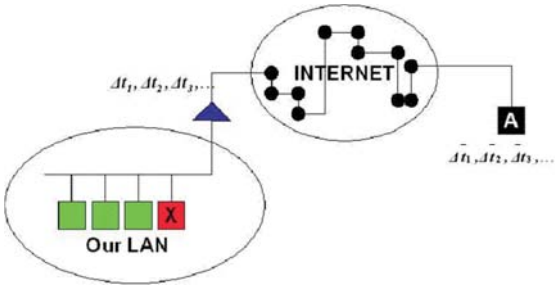
استحکام: استحکام بیانگر میزان دشواری حذف کانال پوششی یا محدود کردن ظرفیت کانال توسط نویز است. با بهره‌گیری از روش‌های کدبندی برای تشخیص یا تصحیح خطا، با نویزهایی چون مفقود یا تکرار شدن داده‌ها در کانال پوششی مقابله شده و استحکام کانال بهبود داده می‌شود.

ظرفیت، نامحسوسی و استحکام، به عنوان معیارهای ارزیابی اهداف متضادی هستند. معمولاً حداکثر کردن هم‌زمان هر سه معیار غیرممکن است و کاربران باید برای هر وضعیت خاصی، مصالحه کنند که کدام بهترین است. مثلاً ارسال داده‌های کمتر، موجب بهبودی نامحسوسی کانال می‌شود و افزایش افزونگی داده‌ها استحکام کانال را بهبود می‌بخشد؛ اما هردوی این‌ها، یعنی ارسال کمتر داده‌ها و افزایش افزونگی داده‌ها، ظرفیت کانال را کاهش می‌دهند. از سوی دیگر، استحکام می‌تواند به‌سادگی با افزایش دامنه سیگنال افزایش داده شود، اما این امر نامحسوسی را کاهش می‌دهد. روش کدبندی در دستیابی به مقادیر قابل‌قبول هریک از معیارهای سه‌گانه مذکور از اهمیت بالایی برخوردار است. محققین بر اساس تأکید خود بر هر یک از این معیارها یا برای ایجاد تعادل بین آن‌ها، روش طراحی خاصی برای کدبندی پیشنهاد می‌دهند.

در این مقاله، ترکیبی از دو روش بازترتیب بستک‌ها و فاصله بین بستک‌ها برای کدبندی استفاده‌شده است. ارزیابی این روش کدبندی نیز برای دو معیار ظرفیت و استحکام انجام پذیرفته است.

۲-۲. کانال پوششی زمانبندی‌دار مبتنی بر فاصله زمانی بین بستک‌ها

در این روش، اطلاعات پوششی در فواصل زمانی بین بستک‌های متوالی کدبندی یا سوار می‌شوند (شکل ۱). فواصل زمانی بین بستک‌های متوالی می‌تواند به صورت دودویی یعنی صرفاً دو مقدار t_0 و t_1 برای نمایش مقادیر «صفر» و «یک» در نظر گرفته شود، یا مقادیر فواصل زمانی $t_1,t_2,\ldots,t_n$ در نظر گرفته شده و کدبندی خاصی برای سوار کردن داده‌های پوششی روی این n مقدار مختلف طراحی و اجرا نمود.



شکل ۱. کانال پوششی زمانبندی‌دار مبتنی بر فواصل زمانی بین بستک‌ها [۱۰]

جیان‌وچیو و همکارانش [۱۱] یک نوع بهبودیافته کانال زمانبندی‌دار را بر اساس فاصله بین بستک توسعه دادند و کارایی آن را ارزیابی کردند. این طرح که کانال زمانبندی‌دار پوششی مدل-محور نامیده شده، بر اساس مدل ترافیک مجاز، رفتار آن را تقلید می‌کند. کانال مدل- محور یک نمونه از ترافیک مجاز را با چندین مدل شناخته‌شده همانند نمایی، ویبول[5]، ... مطابقت داده و مدلی که بهترین تطبیق را دارد انتخاب می‌کند. سپس از تابع توزیع معکوس و تابع توزیع جمعی به عنوان توابع کدبندی و کدگشایی برای مدل انتخاب شده استفاده می‌کند. ازاین‌رو چون تأخیرهای بین بستکی شبه تصادفی، بر اساس مدلی منطبق بر ترافیک مجاز تولید می‌گردد، توزیع آن‌ها به ترافیک مجاز بسیار شبیه است. اگر زمان‌های بین

[1] Covert Timing Channel
[2] Shape Tests
[3] Regularity Tests
[4] Corrected Conditional Entropy
[5] Weibull

بستکی ترافیک عادی، دارای توزیع مستقل و یکسان[1] (iid) باشد، تشخیص این کانال دشوار است. ولی زندر [۶] نشان داده که هیچ ترافیکی زمان‌های بین بستکی دارای توزیع مستقل و یکسان ندارد و بخش بزرگی از ترافیک دارای زمان‌های بین بستکی همبسته[2] است. روش جیان‌وچیو خود-همبستگی موجود در فاصله زمانی بین بستک‌ها را خراب می‌کند و موجب سهولت تشخیص کانال می‌گردد.

سلکه و همکارانش [۱۲] طرح دیگری برای کدبندی داده‌های پوششی در زمان‌های بین بستکی پیشنهاد داده و نرخ بیت قابل‌دستیابی و نرخ خطا را بر اساس آزمایش‌های عملی روی اینترنت ارزیابی کرده‌اند. ایشان نشان دادند که با ترافیک دارای توزیع مستقل و یکسان به عنوان پوشش، ایجاد کانال زمانبندی‌دار پوششی که به طور محاسباتی غیرقابل تشخیص باشد امکان‌پذیر است.

زندر و همکارانش [۶] با مرور طرح‌های کدبندی جیان‌وچیو و سلکه، مدل بهبودیافته‌ای ارائه دادند که همبستگی در فاصله زمانی بین بستک‌ها را تأمین نماید. ایشان با ارائه دو روش کدبندی کم‌پشت[3] و کدبندی زیرباند[4]، میزان مخفی بودن و نامحسوسی کانال را با قربانی کردن ظرفیت کانال بهبود دادند.

احمدزاده [۱۳] در پایان‌نامه دکترای خود، استفاده از رفتار تصادفی پروتکل‌های ارتباطی و محیط‌های شبکه را به عنوان منابعی برای ایجاد کانال پوششی رفتاری (زمانبندی‌دار) مدنظر قرار داده است. او دو طرح برای ایجاد کانال پوششی در شبکه‌های بی‌سیم و شبکه عمومی اینترنت ارائه داده که هرکدام به طور مجزا از رفتارهای تصادفی ایستگاه‌های کاری شبکه و پروتکل‌های ارتباطی استفاده می‌نماید.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که روش فاصله زمانی بین بستک‌ها به عنوان یک روش کدبندی پرکاربرد و مؤثر برای ایجاد کانال پوششی زمانبندی‌دار پذیرفته‌شده است.

۲-۳. کانال پوششی زمانبندی‌دار مبتنی بر بازترتیب بستک‌ها

در این روش ترتیب بستک‌ها مبنای کدبندی داده‌های پوششی قرار می‌گیرد. کندور و همکارانش [۱۴] یک کانال پوششی از طریق بازترتیب بستک‌ها پیاده‌سازی کردند. این روش بر این اساس طراحی شده که یک مجموعه n بستکی می‌تواند در !n حالت مرتب شود. بدین ترتیب در چنین کانالی حداکثر تعداد $\log_2 n!$ بیت می‌تواند ارسال گردد. در روش‌های بازترتیب بستک‌ها برای هر بستک یک شماره توالی لازم است تا ترتیب اصلی بستک‌ها را بتوان تعیین کرد. از اعداد توالی AH[5] یا ESP[6] یا سایر اعداد توالی مثل عدد توالی TCP می‌توان برای این منظور استفاده کرد.

آتاوی و همکارانش [۱۵] یک کانال پوششی بر مبنای بازترتیب بستک‌ها توسعه دادند. ایشان روی علل و درصد بروز بازترتیب بستک‌ها در ترافیک شبکه تحقیق کرده و اظهار نمودند که بازترتیب بستک‌ها به عنوان یک پدیده در شبکه‌های مدرن رایانه‌ای نیز وجود دارد و بهره‌برداری از آن برای ایجاد کانال پوششی، روی کارایی شبکه تأثیر نمی‌گذارد. ایشان هر k بستک را به عنوان یک کلمه‌کد[7] یا همان سمبل در نظر گرفتند و روی بهترین انتخاب کلمه‌کد (یعنی الگوی جایگشت) برای دستیابی به ظرفیت بالاتر کانال، پایداری و استحکام بیشتر در برابر خطاهای کانال و تقلید ترافیک واقعی و افزایش نامحسوسی کانال تحقیق کردند. آن‌ها برای نیل به این اهداف، دو عامل عمق بازترتیب و حجم بازترتیب را برای محاسبه میزان بازترتیب مناسب بستک‌ها در نظر گرفتند. عمق بازترتیب نشان‌دهنده دورترین بستکی است که جابه‌جا شده است یا گستره‌ای که بستک می‌تواند در آن جابه‌جا شود و حجم بازترتیب نشان‌دهنده درصد بستک‌هایی است که نامرتب هستند. ایشان از ترافیک IP برای پیاده‌سازی کانال پوششی پیشنهادی خود استفاده کردند.

نگارندگان این مقاله با مطالعه و مقایسه دو روش کدبندی فاصله بین بستک‌ها و بازترتیب بستک‌ها و ایده گرفتن از فنون مدولاسیون در شبکه‌های ارتباطی، ترکیب آن‌ها و دستیابی به ظرفیت و نامحسوسی بالاتر را امکان‌پذیر یافتند.

۲-۴. مدل‌های انتها تا انتهای ویژگی‌های رفتاری شبکه اینترنت

در این تحقیق با توجه به طرح کدبندی ترکیبی که برای ایجاد کانال پوششی استفاده می‌شود، سه ویژگی رفتاری لغزش زمانی، مفقود شدن و بازترتیب بستک‌ها به عنوان نویزهای مطرح و تأثیرگذار در کانال، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در اینجا مدل‌های رفتاری شبکه به صورت انتها تا انتها در نظر گرفته می‌شود، بدین معنی که صرفاً رفتار کانال ایجادی، در دو سر آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد و تجهیزات و مسیرهای متعدد تشکیل‌دهنده این کانال ارتباطی به صورت مجزا مطالعه نمی‌شوند. مدل‌های رفتار انتها تا انتهای شبکه اینترنت برای هر یک از سه نویز مورد نظر، به صورت جداگانه برای کاربردهایی نظیر ارتباطات صوتی یا تصویری بی‌درنگ در منابع تحقیقاتی یافت می‌شود که به شرح زیر است.

مدل لغزش زمانی: بستک‌های ارسالی در طول مسیر از فرستنده تا گیرنده با تأخیر مواجه می‌شوند. این تأخیر دارای دو مؤلفه قطعی یا ثابت و تصادفی یا متغیر است. مؤلفه قطعی به دلیل تأخیر انتشار بیت‌ها روی کانال ارتباطی بوده و متناسب با ظرفیت و مسافت فیزیکی کانال ثابت است. مؤلفه تصادفی به دلیل تأخیر در صف‌بندی و پردازش بستک‌ها در گره‌های شبکه در طول مسیر ارتباطی بوده و دارای مقداری متغیر است. این مؤلفه متغیر تأخیر را لغزش زمانی می‌نامند که روی فاصله زمانی بین بستک‌ها تأثیر گذاشته و در کانال

[1] Independent and Identically-Distributed
[2] Correlated
[3] Sparse
[4] Sub-Band
[5] IPSec Authentication Header
[6] Encapsulating Security Payloads
[7] CodeWord

پوششی ما به عنوان نویز در نظر گرفته می‌شود. اگر اندازه لغزش زمانی بسیار زیاد شود، گیرنده ممکن است در کدگشایی فاصله زمانی بین بستک‌ها دچار خطا شده و بجای «صفر»، «یک» یا بالعکس را دریافت کند. تحقیقات نشان داده که لغزش زمانی از یک تابع توزیع مشخصی تبعیت می‌کند. هومن صدر [۱۶] در بخشی از رساله خود اقدام به مطالعه مدل لغزش زمانی کرده و نشان داده که مدل لغزش زمانی ترافیک شبکه، از توزیع لاپلاس تبعیت می‌کند. دانیل [۱۷] در موردسنجش رفتار لغزش زمانی شبکه مطالعات گسترده‌ای نموده است. وی در شبیه‌سازی خود با تعداد ۱۰۰۰۰ بستک، نشان داده است که مدل لغزش زمانی از توزیع لاپلاس تبعیت می‌کند. دومینگوئز و همکارانش [۱۸] نشان داده‌اند که برای مدل لغزش زمانی، Alpha-Stable مدل مناسبی بوده و در مواردی توزیع کوشی[1] نتایج با تقریب قابل قبولی را ارائه می‌دهد. پی و همکارانش [۱۹] در مطالعه خود مدل دانیل [۱۷] را موردبررسی قرار داده و آن را مدل مناسبی تشخیص داده است. بندهوپادیا و همکارانش [۲۰] نشان داده‌اند که لغزش زمانی را می‌توان بر اساس توزیع alpha-stable که خود شامل توزیع‌های گوسی، کوشی و لوی[2] است، مدل نمود. از جمع‌بندی کارهای بررسی‌شده می‌توان نتیجه گرفت که تابع توزیع لاپلاس مدل مناسبی برای لغزش زمانی است.

مدل گم شدن بستک‌ها: اگر یک بستک در مسیر انتقال بین فرستنده و گیرنده در شبکه گم شود، دو فاصله مجاور یکدیگر باهم جمع شده و یک فاصله جدید ایجاد می‌کنند که موجب خطا در کدگشایی می‌شود. مطالعات گسترده‌ای در زمینه تشخیص مدل گم شدن بستک‌ها پیش از این صورت گرفته است. عبدالعظیمی و همکارانش [۲۱] در مطالعه خود، مدل گم شدن بستک‌ها را به دو دسته گم شدن بستک‌ها به صورت تصادفی و گم شدن بستک‌ها بر اساس مدل گیلبرت تقسیم‌بندی نموده‌اند. در مطالعات صورت گرفته توسط انجمن صنایع ارتباطی، دو مدل سیل‌آسا و مدل ناشی از خرابی اتصالات برای گم شدن بستک‌ها ارائه شده است [۲۲]. در مطالعات شرکت سیسکو سامانه، به مدل گم شدن بستک برنولی و مدل دو وضعیتی زنجیره مارکوف که بنام مدل گیلبرت شناخته می‌شود اشاره شده است [۲۳]. فلین و همکارانش [۲۴]، موچاناک [۲۵] نیز در مطالعات در این حوزه نتایجی مشابه فوق را کسب نموده است.

جمع‌بندی کارهای بررسی شده، در جدول (۱) به طور خلاصه ارائه شده است.

جدول ۱. انواع مدل‌های گم شدن بستک در شبکه اینترنت

ردیف	رفتار گم شدن بستک‌ها	مدل
۱	گم شدن بستک به صورت تکی	مدل تصادفی برنولی
۲	گم شدن بستک به صورت سیل‌آسا	مدل دو وضعیتی گیلبرت

[1] Cauchy
[2] Levy

مدل بازترتیب بستک‌ها: پدیده بازترتیب بستک‌ها هنوز در شبکه‌های مدرن انتقال داده‌ها وجود دارد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در حدود ۹۰٪ از ارتباطات عملاً ترتیب بستک‌ها در مقصد برهم‌خورده و به میزان ۱٪ تا ۳٪ بستک‌های ارسالی نامرتب شده‌اند [۲۶]. وقتی بخواهیم از بازترتیب بستک‌ها برای کدبندی و انتقال پوششی اطلاعات استفاده کنیم، وجود پدیده بازترتیب در شبکه به عنوان یک نویز محسوب می‌شود که در کدگشایی در گیرنده باعث ایجاد خطا می‌گردد. چندین روش برای مدل‌سازی بازترتیب بستک‌ها ارائه شده که می‌توان آن‌ها را به سه دسته تقسیم کرد. دسته اول از مدل‌ها، هر بار با تعویض جای دو بستک مجاور در صف، درواقع فقط یک بستک را بازترتیب می‌کنند [۲۷]؛ اما در عمل ممکن است بلوکی از بستک‌ها به طور یکجا بازترتیب شوند. دسته دوم مدل‌ها، با توسعه مدل خطای NS-2 به‌نحوی‌که یک درصد قابل تنظیمی از بستک‌ها را با تأخیر مواجه کند [۲۸] یا با تغییر دوره‌ای تأخیر خط ارتباطی [۲۹]، هر بار بازترتیب چندتایی بستک‌ها را تولید می‌کنند. این دسته اخیر مدل‌ها، قابلیت تولید ترافیک بازترتیب واقعی‌تر را دارند. دسته سوم مدل‌های بازترتیب بستک‌ها، عوامل بیشتری را در مدل در نظر می‌گیرند. فنگ سه عامل را به شرح زیر برای مدل کردن پدیده بازترتیب پیشنهاد داده و مولد بازترتیب بستک‌ها را با توسعه مدل خطا در NS-2 پیاده‌سازی کرده است [۳۰]:

- دوره بازترتیب: دوره زمانی بین دو رخداد بازترتیب متوالی.
- مدت تأخیر بازترتیب: دوره زمانی از اولین بستک بازترتیب شده (به تأخیر افتاده) در یک رخداد بازترتیب تا اولین بستک پیش افتاده دارای شماره توالی بالاتر.
- اندازه بلوک بازترتیب: تعداد بستک‌هایی که به عنوان یک موجودیت، بازترتیب شده‌اند.

در این مدل هر سه عامل می‌تواند متغیرهای تصادفی دارای توزیع خاص باشند. پیراتلا [۳۱] مطالعه گسترده‌ای روی پدیده بازترتیب بستک‌ها در شبکه اینترنت انجام داده و معیارهایی برای اندازه‌گیری بازترتیب بستک‌ها ارائه داده و ویژگی‌های لازم برای این معیارها را تحلیل نموده است. درصد بستک‌های بازترتیب شده اغلب به عنوان معیاری برای ارزیابی بازترتیب استفاده می‌شود. پیراتلا معیار چگالی بازترتیب[3] یا RD را به عنوان معیاری که ویژگی‌های لازم را دارا است را برای اندازه‌گیری میزان بازترتیب معرفی می‌نماید. چگالی بازترتیب درواقع هیستوگرام مقادیر میزان جابه‌جایی بستک‌ها در ترتیب رسیدن به مقصد است. این معیارها صرفاً برای توصیف بازترتیبی که در جریان ترافیک واقعی دیده می‌شود مناسب است ولی برای تولید بازترتیب بستک مناسب نیست.

از جمع‌بندی کارهای بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت که یک مدل مناسب بازترتیب دارای سه عامل تصادفی «دوره بازترتیب»، «مدت تأخیر بازترتیب» و «اندازه بلوک بازترتیب» است.

[3] Reorder density

۲-۵. شبکه‌های پتری رنگی

نظریه شبکه‌های پتری توسط کارل آدام پتری در سال ۱۹۶۲ ارائه شد [۳۲]. یک شبکه پتری یا شبکه مکان/گذر[1] یکی از چندین زبان مدل‌سازی ریاضی برای تشریح سامانه‌های توزیع‌شده است و یک ابزار مدل‌سازی ریاضی و گرافیکی محسوب می‌گردد.

خصوصیات شبکه‌های پتری رنگی: شبکه‌های پتری علاوه بر آنکه دارای ساختار و تعاریف ریاضی هستند از نمایش گرافیکی نیز برخوردارند. این قابلیت ارائه گرافیکی مدل، درک شبکه‌های پتری را تسهیل و افزایش می‌دهد. شبکه‌های پتری ابزار مناسبی برای مدل‌سازی ریاضی و گرافیکی به‌حساب می‌آیند. از این ابزار می‌توان برای مدل‌سازی، توصیف و تحلیل سامانه‌هایی که دارای ماهیتی هم‌زمان، غیر هم‌زمان، توزیع‌شده، موازی، نامعین و اتفاقی هستند استفاده نمود. درواقع شبکه‌های پتری جزء مدل‌هایی هستند که قادرند به صورت هم‌زمان حالت و عملکرد یک سامانه را نشان دهند. یکی دیگر از خصوصیات مهم شبکه پتری قابل‌اجرا بودن آن‌ها است که از همین ویژگی می‌توان برای ارزیابی رفتار و کارایی یک سامانه بهره برد.

شبکه‌های پتری رنگی توسط کارت ینسن[2] به عنوان یک مدل توسعه‌یافته از شبکه‌های پتری معرفی‌شده است. علاوه بر مکان‌ها، گذرها و نشان‌ها[3]، در این شبکه مفاهیم عبارت، محافظ[4] و رنگ نیز مطرح است.

شبکه‌های پتری رنگی، از توانایی‌های شبکه‌های پتری ساده و زبان برنامه‌نویسی استفاده می‌کنند. مقادیر داده‌ای در این شبکه‌ها توسط نشان‌ها حمل می‌شوند. در این شبکه‌ها برخلاف شبکه‌های پتری ساده، نشان‌ها از یکدیگر قابل‌تمایز هستند، زیرا هر یک از نشان‌ها دارای صفتی به نام رنگ است.

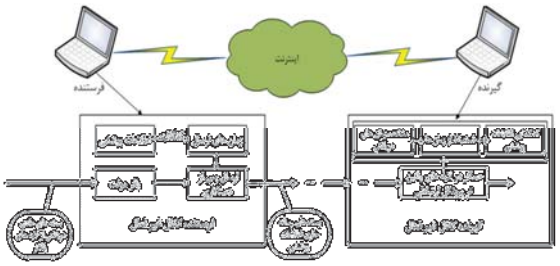
یکی از مفاهیمی که در ارزیابی کارایی باید موردتوجه قرار گیرد، زمان است. در شبکه‌های پتری رنگی مفهوم زمان از طریق عنصری به نام ساعت سرتاسری معرفی می‌شود. مقادیری این ساعت بیان‌کننده‌ی زمان مدل است. همان‌طور که می‌توان به هر نشان مقداری منتسب کرد، می‌توان به هر نشان مقدار زمانی نیز نسبت داد. امروزه نرم‌افزارهای قوی مدل‌سازی وجود دارند که بر اساس شبکه‌های پتری کار می‌کنند و CPN Tools یکی از آن‌ها است.

دلایل استفاده از شبکه پتری رنگی و CPN Tools: دلایل استفاده از شبکه پتری رنگی و ابزار CPN Tools را می‌توان به شرح زیر دانست:

- دارا بودن نمایش گرافیکی
- پشتیبانی از ساختارهای سلسله مراتبی و امکان ترکیب یا استفاده مجدد از مدل‌ها
- پشتیبانی از مفهوم زمان برای هر گذر و نشان و امکان ارزیابی کارایی و دیگر مسائل مرتبط با زمان
- امکان نمایش اطلاعات پیچیده در مقادیر نشان‌ها
- امکانات قوی برای ساخت، تحلیل و شبیه‌سازی شبکه‌های پتری رنگی
- دارا بودن روش‌های متعدد تحلیل صوری برای اثبات خواص مدل
- دارا بودن قابلیت برآورد میزان کارایی برای سامانه‌های پیچیده و نداشتن مشکل انفجار فضای حالت

۳. طرح کدبندی ترکیبی برای ایجاد کانال پوششی زمانبندی‌دار

طرح کلی ایجاد ارتباط در کانال پوششی زمانبندی‌دار در شکل (۲) دیده می‌شود.



شکل ۲. طرح کلی ایجاد ارتباط در کانال‌های پوششی زمانبندی‌دار [۴]

ما در طرح کدبندی ترکیبی روش فاصله زمانی بین بستک‌ها که توسط سلکه و همکارانش ارائه شده را مبنا قرارداده‌ایم [۱۲]. ایشان L بیت رشته دودویی را در دنباله‌ای از n فاصله زمانی بین بستک به نام‌های $(T_1, T_2 \quad \cdots \quad , T_n)$ کدبندی کرده و آن را طرح L-بیت به n-بستک نامیده‌اند. T_i از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$T_i = \Delta + k_i \cdot \delta \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، Δ حداقل فاصله زمانی بین ارسال دو بستک متوالی است به نحوی‌که اطلاعات زمانی کدبندی، به دلیل تأخیر انتشار کانال، از بین نرود (یعنی $T_i \geq \Delta$). δ حداقل اختلاف زمانی بین دو کلمه‌کد متفاوت است به نحوی‌که در اثر لغزش زمانی بین فرستنده و گیرنده، تداخلی بین آن‌ها به وجود نیامده و دو کلمه‌کد در گیرنده قابل‌تمایز باشند. اگر ε را متغیر تصادفی نشان‌دهنده لغزش زمانی کانال بدانیم، به طوری‌که $-\varepsilon_{max} < \varepsilon < \varepsilon_{max}$ باشد، مقاله نشان داده که باید:

$$\delta > 4\varepsilon_{max} \qquad (۲)$$

باشد. k_i نیز عناصر بردار $(k_1, k_2, \quad \cdots \quad , k_n)$ را تشکیل می‌دهند. جدول (۲)، جدول کلمه‌کد ترکیبی حاصل از ترکیب روش‌های بازترتیب بستک‌ها و فاصله زمانی بین بستک‌ها را نشان می‌دهد. در

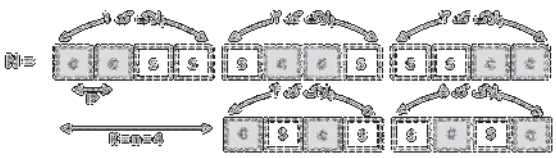
[1] Place/Transition
[2] Kurt Jensen
[3] Token
[4] Guard

این جدول، هر کلمه‌کد از ۴- بیت به ۲- بستک تشکیل‌شده و اعداد داخل کروشه نشان‌دهنده فاصله زمانی بین دو بستک متوالی در کلمه‌کد است. اعداد بالای کروشه نیز ترتیب بستک‌ها را نشان می‌دهد. در این طرح جهت بهبود نامحسوسی کانال، با بهره‌گیری از روش کدبندی کم‌پشت [۶]، فقط از بخشی از بستک‌هایی که در کانال مجاز در جریان هستند، برای کدبندی استفاده می‌شود؛ یعنی از تعداد چهار بستکی که در هر بلوک قرار دارد، فقط از دو بستک برای کدبندی استفاده می‌شود و دو بستک دیگر بدون هیچ تغییری به مقصد ارسال می‌گردد. بدین ترتیب پنج حالت مختلف برای کدبندی وجود دارد. شکل (۳) این حالات را نشان می‌دهد. انتخاب هر یک از این پنج حالت برای کدبندی، به صورت تصادفی انجام می‌شود.

نکته قابل‌توجه این‌که در سمت گیرنده کانال، ضرورت دارد زمان‌های وصول کلیه بستک‌های دریافتی تحت نظر قرار گیرد تا بتوان بستک‌های حاوی اطلاعات پوششی را مشخص کرده و اطلاعات پوششی را از آن‌ها استخراج نمود.

جدول ۲. جدول کد ترکیبی روش‌های بازترتیب و فاصله زمانی بین بستک‌ها

۲-بستک نامرتب $T_1^{p1}\ T_2^{p2}$	۴-بیت	۲-بستک مرتب $T_1^{p2}\ T_2^{p1}$	۴-بیت
$50]^1\ [50]^2$	1000	$[50]^2\ [50]^1$	0000
$[50]^1\ [60]^2$	1001	$[50]^2\ [60]^1$	0001
$[60]^1\ [50]^2$	1010	$[60]^2\ [50]^1$	0010
$[60]^1\ [60]^2$	1011	$[60]^2\ [60]^1$	0011
$[50]^1\ [70]^2$	1100	$[50]^2\ [70]^1$	0100
$[70]^1\ [50]^2$	1101	$[70]^2\ [50]^1$	0101
$[60]^1\ [70]^2$	1110	$[60]^2\ [70]^1$	0110
$[70]^1\ [60]^2$	1111	$[70]^2\ [60]^1$	0111



شکل ۳. حالات مختلف کدبندی کم‌پشت فاصله زمانی بین بستک‌ها

۴. مدل‌سازی انتها تا انتهای کانال نویزی تحت شبکه اینترنت

همان‌طور که در بخش ۲-۴ تشریح شد، برای هر یک از سه ویژگی رفتاری شبکه اینترنت، مدل‌های انتها تا انتهای جداگانه‌ای در پیشینه تحقیق آمده است. در این بخش از مقاله، برای هر یک از نویزهای لغزش زمانی، مفقود شدن و بازترتیب بستک‌ها، با توجه به جمع‌بندی مطالعات محققین و درستی‌سنجی عملی که در این تحقیق انجام‌شده، یک مدل مناسب اتخاذ می‌گردد. سپس این سه مدل مجزای سه نویز، به نحو مناسبی با همدیگر ترکیب شده و مدل ترکیبی کانال حاوی سه نویز ارائه می‌گردد.

۴-۱. مدل اتخاذ شده برای لغزش زمانی

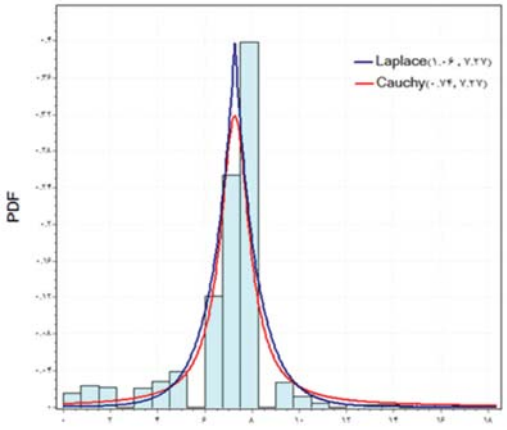
از جمع‌بندی کارهای بررسی‌شده در بخش ۲-۴ می‌توان نتیجه گرفت که تابع توزیع لاپلاس مدل مناسبی برای لغزش زمانی است.

به‌منظور درستی‌سنجی این جمع‌بندی، یک آزمایش عملی بدین‌صورت انجام پذیرفت که مقادیر لغزش‌های زمانی بین بستک‌ها، در ۱۰۰ مجموعه داده‌ای که هر مجموعه شامل ۵۰۰۰ بستک بود در بازه‌های زمانی متفاوتی از شبانه‌روز ثبت و گردآوری گردید. شرایط آزمایش و نتایج آزمون نکویی برازش در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- شرایط و نتایج آزمون نکویی برازش بر روی داده‌های لغزش زمانی با ۱۰۰ مجموعه داده‌ای و هر مجموعه دارای ۵۰۰۰ بستک

آزمون‌ها	نوع ترافیک	گام‌های مسیر	نوع آزمون	نتیجه آزمون
آزمون ۱	FTP	۱۶	مربع خی	لاپلاس
آزمون ۲	FTP	۱۹	مربع خی	لاپلاس
آزمون ۳	HTTP	۱۶	مربع خی	لاپلاس
آزمون ۴	HTTP	۱۹	مربع خی	لاپلاس

شکل (۴) نتایج کسب شده از آزمون نکویی برازش را نشان می‌دهد. در این بررسی مشاهده گردید که مدل لغزش زمانی در شبکه‌های مبتنی بر IP به طور معمول از توزیع لاپلاس تبعیت می‌نماید. آزمون نکویی برازش بر روی برخی داده‌ها نشان داد که گاهی اوقات لغزش زمانی از توزیع کوشی تبعیت می‌نماید. بنابراین تابع توزیع لاپلاس به عنوان مدل لغزش زمانی اتخاذ می‌گردد.



شکل ۴. نتیجه آزمون نکویی برازش توزیع لاپلاس

۴-۲. مدل اتخاذشده برای گم شدن بستک

جمع‌بندی کارهای بررسی‌شده در بخش ۲-۴ در جدول (۱) ارائه شده است. به منظور درستی‌سنجی این جمع‌بندی، یک مجموعه آزمایش عملی بدین صورت انجام گردید که ترافیک جریان بستک‌های دو مسیر ارتباطی در شبکه اینترنت، در ۱۰۰ مجموعه داده‌ای که هر مجموعه شامل ۵۰۰۰ بستک بود ثبت و گردآوری گردید. شرایط

آزمایش و نتایج آزمون نکویی برازش در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. شرایط انجام آزمون نکویی برازش برای تعیین مدل رفتار گم شدن بستک‌ها در شبکه اینترنت با ۱۰۰ مجموعه داده‌ای و هر کدام دارای ۵۰۰۰ بستک

آزمون‌ها	نوع ترافیک	گام‌های مسیر	نوع آزمون	نتیجه آزمون
آزمون ۱	FTP	۱۶	KS	برنولی
آزمون ۲	FTP	۱۹	KS	برنولی
آزمون ۳	HTTP	۱۶	KS	برنولی
آزمون ۴	HTTP	۱۹	KS	برنولی

در آزمایش‌های انجام‌شده، با توجه به این‌که دو مسیر ارتباطی ایجادشده در اینترنت از نوع ارتباطات باسیم است، مدل گم شدن بستک‌ها از نوع سیل‌آسا مشاهده نمی‌شود. از طرفی نتایج عملی آزمون نکویی برازش در جدول ۴، نشان می‌دهد که مدل رفتاری گم شدن بستک‌ها در این داده‌ها از توزیع مستقل برنولی تبعیت می‌کند. بنابراین توزیع تصادفی برنولی به عنوان مدل گم شدن بستک‌ها اتخاذ می‌شود.

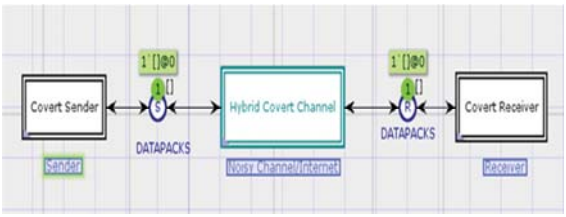
۴-۳. مدل اتخاذشده برای بازترتیب بستک‌ها

از جمع‌بندی کارهای بررسی‌شده در بخش ۲-۴ می‌توان نتیجه گرفت که یک مدل مناسب بازترتیب دارای سه عامل تصادفی «دوره بازترتیب»، «مدت تأخیر بازترتیب» و «اندازه بلوک بازترتیب» است. بنابراین می‌توان مدل بازترتیب را این‌طور در نظر گرفت که بستک‌ها به ترتیب وارد یک صف می‌شوند و برای به وجود آوردن بازترتیب به هنگام بستک‌های موجود در این صف، در هر «دوره بازترتیب» به تعداد «اندازه بلوک بازترتیب» از بستک‌ها برای «مدت‌زمان تأخیر بازترتیب» به تأخیر انداخته می‌شوند که به این یک «رخداد بازترتیب» می‌گوییم. بقیه بستک‌ها بدون تأخیر از صف خارج می‌شوند. با توجه به نتایج آزمایش‌های عملی روی داده‌های ترافیک ذکرشده در بخش قبل، هر یک از این سه عامل را متغیرهای تصادفی با توزیع برنولی در نظر می‌گیریم.

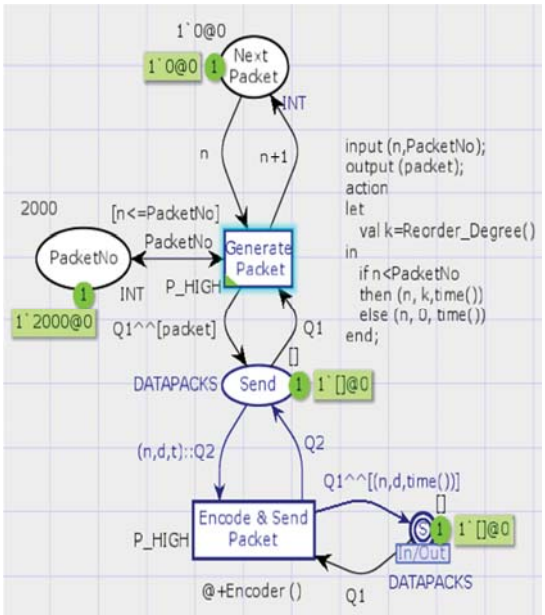
۴-۴. مدل‌سازی کانال پیشنهادی حاوی هر سه نویز

برای مدل‌سازی کانال از ابزار CPN Tools استفاده‌شده است. این ابزار یکی از ابزارهای مدل‌سازی صوری[1] شبکه پتری رنگی است. در شکل (۵) شمای سطح ۱ مدل کانال پوششی در شبکه اینترنت که دارای هر سه نویز هست نمایش داده‌شده است. این مدل شامل ۳ زیرمدل اصلی فرستنده، کانال نویزی یا شبکه اینترنت و گیرنده کانال است.

شکل (۶) زیرمدل فرستنده شامل تولید، کدبندی و ارسال بستک‌ها را نشان می‌دهد. در زیرمدل فرستنده ابتدا گذر Generate Packet به تعداد مشخص‌شده از بستک‌ها تولید می‌شود. در مرحله تولید بستک‌ها، مقدار شماره توالی بستک (n) و درجه بازترتیب هر بستک (k) بر اساس تابع توزیع تصادفی برنولی مشخص و در ساختار بستک قرار داده می‌شود. گذر Encode & Send Packet وظیفه کدبندی داده‌های پوششی بر اساس روش کدبندی ترکیبی تشریح شده در بخش ۳ را بر عهده دارد. تابع Encoder() این فرایند کدبندی را انجام می‌دهد. پیامی که باید بر روی فاصله بین بستک‌ها سوار شود، با استفاده از برنامه دیگری و بر اساس روش کدبندی که در قبل شرح داده شد، تبدیل به داده‌هایی از نوع و رفتار ترافیک عادی شبکه می‌گردد. این داده‌ها به عنوان ورودی تابع Encoder، به زیرمدل فرستنده وارد می‌گردد. در فرآیند کدبندی، برای بستک‌هایی که کدبندی نمی‌شوند فاصله زمانی بر اساس توزیع ویبول ایجاد می‌گردد تا رفتار ترافیک تولیدشده شباهت زیادی به رفتار ترافیک مجاز داشته باشد و نامحسوسی آن افزایش یابد.



شکل ۵. شمای سطح ۱ مدل پیشنهادی کانال پوششی دارای سه نویز در شبکه اینترنت با استفاده از ابزار CPN Tools



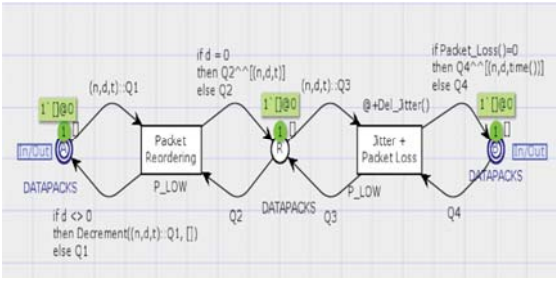
شکل ۶. زیرمدل فرستنده شامل تولید، کدبندی و ارسال بستک‌ها

شکل (۷) زیرمدل کانال نویزی در شبکه اینترنت را نشان می‌دهد که ما در آن، سه مدل رفتاری انتها تا انتهای نویزهای لغزش زمانی، گم شدن و بازترتیب بستک‌ها ترکیب نموده‌ایم. در زیرمدل کانال نویزی، گذر Packet Reordering و توابع و شروطی که روی کمان‌های متصل به آن قرار داده شده است عمل بازترتیب بستک‌ها را بر عهده دارد. بازترتیب بستک‌ها با توجه به مقدار درجه بازترتیب

[1] Formal

بستک‌ها که در هنگام تولید بستک مشخص شده و به عنوان پارامتر d درون بستک قرار داده شده است انجام می‌گردد. بستک‌هایی که وارد کانال می‌شوند در یک صف بازترتیب قرار می‌گیرند که اگر مقدار درجه بازترتیب صفر به معنای عدم نیاز به بازترتیب باشد، آن بستک فوراً از صف خارج و به مکان بعدی در مدل ارسال می‌گردد. ولی اگر مقدار درجه بازترتیب غیر صفر باشد، ارسال بستک به اندازه مقدار درجه بازترتیب به تأخیر انداخته می‌شود.

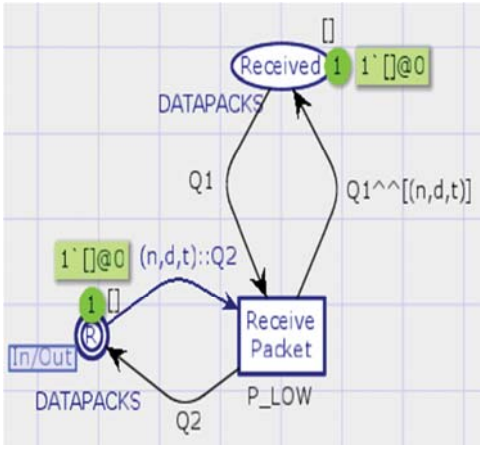
گذر Jitter+Packet Loss در زیرمدل کانال، وظیفه ایجاد رفتار تأخیر ثابت، لغزش زمانی و مفقود شدن بستک‌ها را بر عهده دارد. تابع Del_Jitter() تأخیر ثابت انتقال بستک‌ها در کانال را با خروجی تابع معکوس توزیع تصادفی لاپلاس جمع نموده و ارسال بستک‌ها را به مقدار تأخیر به علاوه لغزش زمانی به تأخیر می‌اندازد. مقدار تأخیر ثابت تأخیر انتشار و مقادیر μ و λ در تابع لاپلاس برای ایجاد شرایط مورد نظر در آزمایش‌ها قابل تنظیم است. به هنگام ارسال بستک‌ها به مکان خروجی این گذر، تابع Packet_Loss() بر اساس مقدار تابع توزیع تصادفی برنولی، بستک‌ها را به خروجی گذر ارسال نموده یا آن را گم می‌کند. نرخ گم شدن بستک‌ها نیز قابل تنظیم است تا امکان ایجاد شرایط مورد نظر برای کانال ارتباطی شبکه فراهم باشد.



شکل ۷. زیرمدل کانال حاوی سه نویز لغزش زمانی، گم شدن و بازترتیب بستک‌ها در شبکه اینترنت

شکل (۸) زیرمدل گیرنده را نشان می‌دهد. گیرنده وظیفه دریافت بستک‌ها و ثبت فاصله زمانی و ترتیب وصول آن‌ها را بر عهده دارد.

در خاتمه، درستی‌سنجی[1] مدل با استفاده از قابلیت تحلیل فضای حالت ابزار CPN Tools انجام شده و مورد تأیید قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل طراحی‌شده دارای خصوصیات رفتاری لازم برای درستی عملکرد منطقی است. خصوصیات رفتاری مدل طراحی‌شده این است که نشان‌گذاری آغازین از تمام نشان‌گذاری‌های دیگر قابل‌دسترس است (دسترس‌پذیری[2]) و مدل از هر حالتی می‌تواند دوباره به حالت شروع بازگردد (برگشت‌پذیری[3]). گذر مرده‌ای در سامانه وجود ندارد (زنده‌بودن[4]) و هر گذری شانس فعال شدن خواهد داشت (انصاف[5]). مدل خاتمه‌پذیر بوده و دنباله نامتناهی رخدادها در آن وجود ندارد (کران‌دار[6]).



شکل ۸. زیرمدل گیرنده

۵. ارزیابی مدل کانال پیشنهادی و تحلیل نتایج

در این بخش آزمایش‌هایی که با استفاده از مدل پیشنهادی انجام شده و نتایج حاصله ارائه می‌گردد.

۵-۱. شرایط و نحوه انجام آزمایش‌ها

با استفاده از مدل طراحی‌شده در بخش ۴، یک مجموعه آزمایش برای ارزیابی مدل انجام پذیرفت. در هر بار آزمایش تعداد ۲۰۰۰ بستک در زیرمدل فرستنده تولید شده و پس از کدبندی از طریق مسیر کانال ارتباطی حاوی نویز برای گیرنده ارسال می‌گردد. در این آزمایش‌ها هدف ارزیابی دو معیار ظرفیت و استحکام کانال بوده است. ظرفیت کانال از تقسیم تعداد بستک‌هایی که بدون خطا و قابل کدگشایی به گیرنده رسیده، بر کل مدت‌زمان اجرای مدل (شبیه‌سازی) به دست می‌آید. تبدیل ظرفیت به بیت بر ثانیه با لحاظ نمودن یک ضریب ثابت بیت بر سمبل که از ویژگی‌های روش کدبندی است به دست می‌آید. استحکام کانال به معنای میزان مقاومت کانال در برابر خطای ناشی از نویزهای مختلف است. به‌عبارت‌دیگر، معیار استحکام کانال پوششی با نرخ خطای بستک‌ها نسبت معکوس دارد. نرخ خطای بستک‌ها، نسبت تعداد بستک‌های دارای خطا در گیرنده به تعداد کل بستک‌های ارسالی است. مشخص است که ارزیابی هر دو معیار نیازمند ارزیابی دقیق انواع خطاهای رخداده در کانال ارتباطی دارای نویز است. ازاین‌رو، فاصله زمانی بین بستک‌های متوالی و ترتیب بستک‌های واصله در زیرمدل گیرنده ثبت می‌شود. سپس تعداد بستک‌های بازترتیب شده، تعداد بستک‌های مفقودشده، تعداد خطای حاصل از لغزش زمانی خارج از محدوده (تعداد بستک‌هایی که به دلیل لغزش زمانی مقدار فاصله زمانی بین آن‌ها از محدوده قابل کدگشایی خارج‌شده) و درنهایت مجموع بستک‌های دارای خطا محاسبه می‌گردد. خطای لغزش زمانی خارج از

[1] Verification
[2] Reachability
[3] Reversibility
[4] Liveness
[5] Fairness
[6] Boundedness

محدوده با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد. ازآنجاکه ما تابع توزیع تصادفی لاپلاس را به عنوان مدل نویز لغزش زمانی اتخاذ کرده‌ایم، مقدار حداکثر لغزش زمانی را دو برابر انحراف معیار مقدار تابع لاپلاس در نظر می‌گیریم. یعنی:

$$\varepsilon_{max} = 2 * stdv \qquad (۳)$$

نتایج آزمایش‌های ما نشان می‌دهد که اتخاذ این مقدار به عنوان حداکثر لغزش زمانی از دقت لازم برخوردار است. انحراف معیار (stdv) مقدار تابع لاپلاس برای هر مقدار پارامتر λ متفاوت است. روابط (۲) و (۳) نشان می‌دهد که باید $\delta > 8 * stdv$ باشد. بنابراین محدوده قابل کدگشایی برای لغزش زمانی از رابطه (۴) به دست می‌آید:

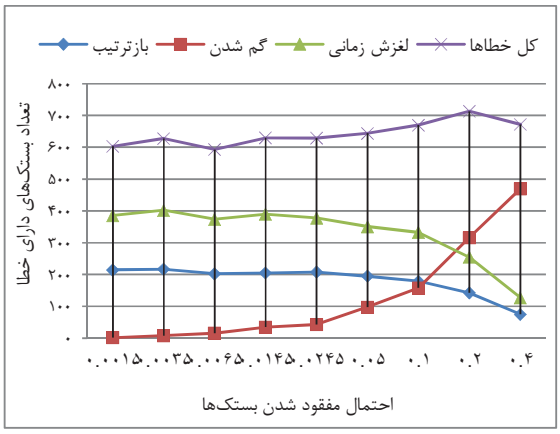
$$|\text{Decoding Range}| < 4 * stdv \qquad (۴)$$

آزمایش‌ها در دو دسته تغییر و ارزیابی تأثیر پارامترهای گم شدن بستک‌ها و تغییر و ارزیابی تأثیر پارامترهای لغزش زمانی در معیارهای ظرفیت و استحکام کانال انجام‌شده‌اند.

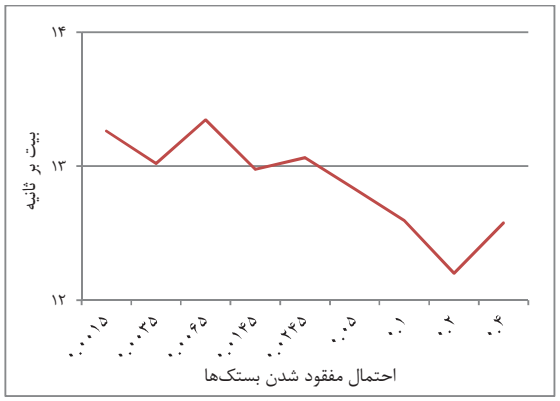
۵-۲. ارزیابی تأثیر مفقود شدن بستک‌ها در ظرفیت و استحکام کانال

شکل (۹) نتایج مجموعه آزمایش‌هایی را نشان می‌دهد که در آن‌ها مقدار احتمال بازترتیب بستک‌ها برابر ۰/۱۲۵ و مقدار λ در تابع لغزش زمانی برابر ۰/۲ در نظر گرفته‌شده و مقدار احتمال مفقود شدن بستک‌ها بین ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۴ تغییر داده‌شده و تأثیرات آن در تعداد خطاها، ظرفیت و استحکام کانال ارزیابی‌شده است. شکل (۹) تعداد انواع خطاها را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد خطای گم شدن بستک‌ها، تعداد خطای حاصل از لغزش زمانی خارج از محدوده و تعداد خطای بازترتیب کاهش می‌یابد. این پدیده به این دلیل مشاهده می‌شود که ما تعداد هر نوع خطا را به طور مستقل و فقط یک بار می‌شماریم. یعنی اگر دو نوع خطا برای یک بستک رخ دهد ما یک بار آن بستک را دارای خطا می‌شماریم و نوع دوم خطا را نمی‌شماریم. بنابراین وقتی خطای تعداد مفقودی بالا می‌رود، عملاً بقیه بستک‌های گم نشده دارای تعداد کمتری از دیگر انواع خطاها خواهند بود. این پدیده سبب شده که حتی با افزایش زیاد احتمال مفقود شدن بستک‌ها، تعداد کل خطاها افزایش قابل‌توجهی پیدا نکند.

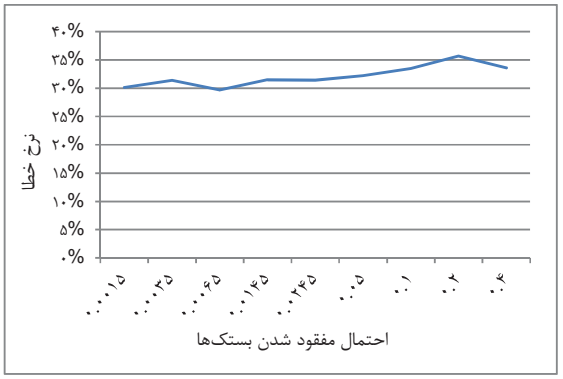
شکل (۱۰) تأثیر احتمال مفقود شدن بستک‌ها در ظرفیت کانال را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود همان‌طور که تشریح شد، افزایش زیاد احتمال مفقود شدن بستک‌ها تا حد ۴۰٪، فقط ۸٪ در کاهش ظرفیت کانال تأثیر دارد و ظرفیت در حد یک بیت در ثانیه کاهش می‌یابد. شکل (۱۱) تأثیر احتمال مفقود شدن بستک‌ها در نرخ خطا را نشان می‌دهد و به‌تبع آن تأثیر در استحکام کانال که نسبت معکوس با نرخ خطا دارد قابل‌مشاهده است.



شکل ۹. تأثیر احتمال مفقود شدن بستک‌ها در تعداد خطاها



شکل ۱۰. تأثیر احتمال مفقود شدن بستک‌ها در ظرفیت کانال

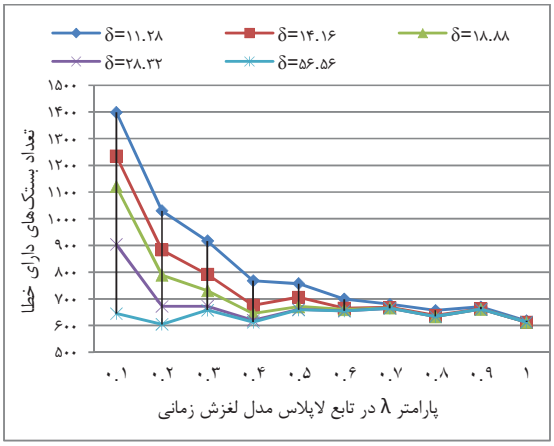


شکل ۱۱. تأثیر احتمال مفقود شدن بستک‌ها در نرخ خطا و به‌تبع آن در استحکام کانال

هر چه نرخ خطا افزایش یابد استحکام کانال کاهش می‌یابد. در اینجا مشاهده می‌شود که با افزایش زیاد احتمال مفقود شدن بستک‌ها تا حد ۴۰٪، نرخ خطا با افزایش ناچیز ۵٪ مواجه شده و درنتیجه، استحکام کانال نیز به نسبت همین ۵٪ کاهش می‌یابد.

۵-۳. ارزیابی تأثیر لغزش زمانی در ظرفیت و استحکام کانال

در مجموعه آزمایش‌های مربوط به نویز لغزش زمانی، مقدار احتمال بازترتیب بستک‌ها برابر ۰/۱۲۵ و مقدار احتمال مفقود شدن بستک‌ها برابر ۰/۰۰۶۵ و مقدار λ در تابع لاپلاس مدل لغزش زمانی در بازه ۰/۱ تا ۱/۰ تغییر داده‌شده و تأثیرات آن در تعداد خطاها، ظرفیت و استحکام کانال ارزیابی‌شده است.در این دسته از آزمایش‌ها تأثیر لغزش زمانی را با اتخاذ پنج مقدار متفاوت برای δ ارزیابی کرده‌ایم. پارامتر δ همان حداقل فاصله لازم برای تمایز کلمه‌کدهای مختلف در طرح کدبندی ترکیبی است که در بخش ۳ تشریح شد و تأثیر آن در تعیین خطای لغزش زمانی خارج از محدوده قابل کدگشایی است.

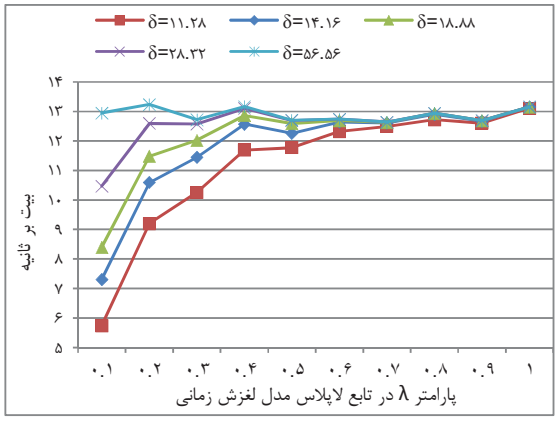


شکل ۱۲. تأثیر لغزش زمانی و δ (فاصله کلمه‌کدها) در تعداد خطاها

شکل (۱۲) تأثیر لغزش زمانی و δ در تعداد کل خطاها را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که برای یک مقدار δ مشخص، با افزایش پارامتر λ در تابع لاپلاس مدل لغزش زمانی، تعداد کل خطاها کاهش می‌یابد. پارامتر λ در تابع لاپلاس به نام مقیاس شناخته می‌شود که محدوده مقادیر خروجی تابع لاپلاس را توسعه داده و با انحراف معیار مقادیر خروجی تابع لاپلاس نسبت معکوس دارد. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که برای مقادیر λ کوچک، هرچقدر مقدار δ کوچک‌تر باشد تعداد خطا نیز بیشتر است. ولی برای مقادیر بزرگ‌تر λ، تفاوت مقادیر δ در تعداد کل خطاها تأثیر ندارد.

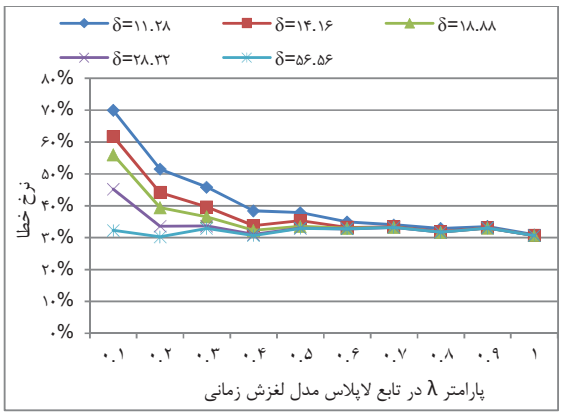
این بدین معناست که هر چه مقدار لغزش زمانی کانال بیشتر باشد (λ کوچک‌تر باشد)، برای کاهش خطا باید فاصله بین کلمه‌کدها (δ) را بزرگ‌تر در نظر گرفت. ولی این امر باعث کاهش ظرفیت کانال می‌شود. به‌عبارت‌دیگر باید بین میزان خطا و ظرفیت کانال مصالحه‌ای انجام شود. از سوی دیگر، هر چه مقدار لغزش زمانی کانال کمتر باشد (λ بزرگ‌تر باشد)، تعداد کل خطا در پایین‌ترین میزان قرار دارد و مقدار δ در آن مؤثر نیست. بنابراین می‌توان δ را در طرح کدبندی در پایین‌ترین مقدار اتخاذ نموده و به ظرفیت حداکثر کانال پوششی دست‌یافت.

شکل (۱۳) تأثیر لغزش زمانی و مقدار δ را در ظرفیت کانال نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار λ یعنی کاهش میزان لغزش زمانی در کانال، ظرفیت کانال پوششی افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که کاهش مقدار δ برای کانال دارای لغزش زمانی بالا موجب کاهش ظرفیت کانال پوششی می‌گردد. بنابراین باید برای کانال با لغزش زمانی بالا، مقدار δ را بزرگ‌تر اتخاذ کرد تا ظرفیت کانال افزایش یابد.



شکل ۱۳. تأثیر لغزش زمانی و δ در ظرفیت کانال

شکل (۱۴) تأثیر لغزش زمانی و δ در نرخ خطا را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هرچقدر مقدار λ کوچک‌تر (لغزش زمانی بیشتر) باشد نرخ خطا بالاتر بوده و به‌تبع آن استحکام کانال کمتر شده است. بنابراین با اتخاذ مقادیر بزرگ‌تری برای δ، می‌توان استحکام کانال را بهبود بخشید. علاوه بر آن مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار λ (کاهش لغزش زمانی)، نرخ خطا در پایین‌ترین حد قرار داشته و کانال از بالاترین استحکام برخوردار است. در این حالت مقدار δ تفاوتی در استحکام کانال ندارد و بدین سبب می‌توان با اتخاذ پایین‌ترین مقدار برای δ، از ظرفیت بالا و استحکام بالا برای کانال پوششی برخوردار شد.



شکل ۱۴. تأثیر لغزش زمانی و δ در نرخ خطا و به‌تبع آن در استحکام کانال

۵-۴. مقایسه نتایج تحقیقات

همان‌طور که در پیشینه تحقیق ذکر شد، تحقیقات قبلی بر ارائه روش جدید کدبندی تمرکز داشته و ارزیابی آن را به روش‌های محاسباتی یا آزمایش عملی انجام داده‌اند. ولی رویکرد مقاله حاضر ابداع روش ارزیابی جدید برای کانال‌های پوششی بوده و تمرکز آن بر مدل‌سازی کانال ارتباطی تحت شبکه اینترنت است. با استفاده از این مدل ارائه شده ، هر روش کدبندی در کانال پوششی قابل ارزیابی است و در اینجا به منظور انسجام فعالیت‌های تحقیقاتی نویسندگان، روش کدبندی ترکیبی مورد ارزیابی قرارگرفته است.

در تحقیق قبلی نویسندگان، ظرفیت کانال پوششی با روش کدبندی ترکیبی، به صورت محاسباتی برابر ۱۳/۳۳ بیت بر ثانیه محاسبه گردیده است. این ظرفیت بدون در نظر گرفتن شرایط کانال واقعی و درواقع برای کانال عاری از نویز محاسبه شده است. شکل (۱۰) ارزیابی ظرفیت کانال را با استفاده از مدل پیشنهادی و در حضور نویز مفقود شدن بستک‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شرایطی که احتمال مفقود شدن بستک‌ها پایین است تقریباً به همین ظرفیت ۱۳ بیت بر ثانیه دست می‌یابیم ولی در شرایط افزایش احتمال مفقود شدن بستک‌ها، ظرفیت کانال کاهش می‌یابد. برای شبکه‌های ارتباطی باسیم و با تعداد گام[1] کم، احتمال مفقود شدن بستک‌ها خیلی کم است؛ ولی در شبکه‌های بی‌سیم یا شبکه‌های با تعداد گام زیاد احتمال مفقود شدن بستک‌ها بسیار بالاست.

مقایسه ظرفیت کانال به دو روش محاسباتی و مدل‌سازی، در حضور نویز لغزش زمانی در جدول (۵) نشان داده شده است. در اینجا نویز لغزش زمانی برای یک شرایط طبیعی با پارامتر $\lambda=0.2$ در نظر گرفته‌شده است که مقادیر را می‌توانید با شکل (۱۳) مقایسه نمایید. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش δ (فاصله کلمه‌کدها) ظرفیت کانال بدون نویز که به روش محاسباتی به دست آمده کاهش می‌یابد. ولی به‌عکس، با افزایش δ ظرفیت کانال دارای نویز که با مدل‌سازی به دست آمده افزایش یافته است. مشاهده این پدیده به دلیل افزایش استحکام کانال با افزایش δ و جبران اثر نویز لغزش زمانی و در نهایت افزایش ظرفیت است. این مقایسه، ارزشمندی مدل‌سازی و در نظر گرفتن شرایط واقعی در مدل را نسبت به روش محاسباتی که شرایط را ساده کرده و اثرات نویز را نادیده گرفته نشان می‌دهد.

جدول ۵. مقایسه ظرفیت کانال در حضور نویز لغزش زمانی

مقدار δ	۱۱/۲۸	۱۴/۱۶	۱۸/۸۸	۲۸/۳۲	۵۶/۵۶
ظرفیت کانال بدون نویز (محاسباتی)	۱۳/۰۵	۱۲/۴۷	۱۱/۶۱	۱۰/۲۱	۷/۵۱
ظرفیت کانال دارای نویز (مدل‌سازی)	۹/۲	۱۰/۶	۱۱/۵	۱۲/۶	۱۳/۲

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌منظور افزایش ظرفیت کانال، طرح کدبندی ترکیبی با بهبود و ترکیب روش‌های «بازترتیب بستک‌ها» و «فاصله بین بستک‌ها» ارائه گردید. برای ارزیابی کانال پوششی ترکیبی پیشنهادی نیز سه ویژگی رفتاری شبکه اینترنت شامل مفقود شدن، بازترتیب و لغزش زمان بین بستک‌ها به صورت انتها تا انتها در محیط مدل‌سازی صوری شبکه پتری مدل شد. سپس با ترکیب این سه ویژگی رفتاری، مدل کانال ارتباطی انتها تا انتها در شبکه اینترنت ایجاد شد. از دیدگاه کانال پوششی زمانبندی‌دار، این سه ویژگی رفتاری به عنوان سه نویز عمل می‌کنند که روی معیارهای ارزیابی کانال پوششی تأثیر می‌گذارند. با استفاده از مدل کانال نویزی ایجاد شده، طرح کدبندی و ایجاد کانال پوششی زمانبندی‌دار ترکیبی از دیدگاه معیارهای ظرفیت و استحکام کانال، در شرایط موردنظر مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج ارزیابی کانال پوششی زمانبندی‌دار ترکیبی نشان می‌دهد که افزایش زیاد احتمال مفقود شدن بستک‌ها تا حد ۴۰٪، فقط ۸٪ در کاهش ظرفیت کانال تأثیر دارد و ظرفیت در حد یک بیت در ثانیه کاهش می‌یابد. نرخ خطا نیز با افزایش ناچیز ۵٪ مواجه شده و درنتیجه، استحکام کانال نیز به نسبت همین ۵٪ کاهش می‌یابد. ازنظر نویز لغزش زمانی، هر چه مقدار لغزش زمانی کانال بیشتر باشد، برای کاهش خطا باید فاصله بین کلمه‌کدها (δ) را بزرگ‌تر در نظر گرفت. ولی این امر باعث کاهش ظرفیت کانال می‌شود. به‌عبارت‌دیگر باید بین میزان خطا و ظرفیت کانال مصالحه‌ای انجام شود. از سوی دیگر، هر چه مقدار لغزش زمانی کانال کمتر باشد مقدار δ در آن مؤثر نیست و می‌توان δ را در طرح کدبندی در پایین‌ترین مقدار اتخاذ نموده و به ظرفیت حداکثر کانال پوششی دست‌یافت. هرچقدر مقدار لغزش زمانی بیشتر باشد نرخ خطا بالاتر بوده و به‌تبع آن استحکام کانال کمتر می‌شود. بنابراین با اتخاذ مقادیر بزرگ‌تری برای δ، می‌توان استحکام کانال را بهبود بخشید. علاوه بر آن با کاهش لغزش زمانی، نرخ خطا در پایین‌ترین حد قرار داشته و کانال از بالاترین استحکام برخوردار است. در این حالت مقدار δ تفاوتی در استحکام کانال ندارد و بدین سبب می‌توان با اتخاذ پایین‌ترین مقدار برای δ، از ظرفیت بالا و استحکام بالا برای کانال پوششی برخوردار شد.

در پایان با مقایسه نتایج تحقیق با تحقیقات قبلی که به روش محاسباتی انجام شده، ارزشمندی روش مدل‌سازی برای در نظر گرفتن شرایط موردنظر در مدل نسبت به روش محاسباتی که شرایط را ساده کرده و اثرات نویز را نادیده گرفته، نشان داده شد.

در تحقیقات بعدی می‌توان تأثیر پارامترهای کدترکیبی در معیارهای ظرفیت و استحکام کانال پوششی را ارزیابی نمود.

[1] Hop

۷. مراجع

[1] Dehghani, M.; Saleh-Esfahani, M. "Network Covert Channels: An Information Leakage Flow"; J. Passive Defence Sci. Tech. 2012, 3, 1, 37-44 (In Persian).

[2] Alís, J. B. "Information Leakage and Steganography : Detecting and Blocking Covert Channels"; Ph.D. Thesis, Computer Science Department, Carlos III University, Madrid, 2012.

[3] Zielinska, E.; Mazurczyk, W.; Szczypiorski, K. "Trends in Steganography"; Communications of the ACM 2014, 57, 86-95.

[4] Zi, X.; Yao, L.; Pan, L.; Li, J. "Implementing a Passive Network Covert Timing Channel"; Elsevier Computers & Security 2010, 29, 686–696.

[5] Dehghani, M.; Saleh-Esfahani, M. "Network Covert Channels: A Secure Comunication Protocol for Hidden Networks"; Presented at the National Conf. on Clandestine Network Conduct in Cyber Space, Imam Hadi College, Tehran, 2012 (In Persian).

[6] Zander, S. "Performance of Selected Noisy Covert Channels and Their Countermeasures in IP Networks"; Ph.D. Thesis, Centre for Advanced Internet Architectures Faculty of Information and Communication Technologies, Swinburne University of Tech., Melbourne, 2010.

[7] AIS, Group "CPN Tools"; The Eindhoven University of Tech. Netherlands, Available: http://CPNTools.org, 2014.

[8] Zander, S.; Armitage, G.; Branch, P. "A Survey of Covert Channels and Countermeasures in Computer Network Protocols"; IEEE Commun. Surv. Tut. 2007, 9, 44-57.

[9] Gianvecchio, S.; Wang, H. "An Entropy-Based Approach to Detecting Covert Timing Channels"; IEEE T Depend. Secure 2011, 8, 785-797.

[10] Giani, A. "Detection of Attacks on Cognitive Channels"; Ph.D. Thesis, Dartmouth College, Hanover, NH, 2006.

[11 Gianvecchio, S.; Wang, H.; Wijesekera, D.; Jajodia, S. "Model-Based Covert Timing Channels: Automated Modeling and Evasion"; In Proc. of RAID, Boston, 2008.

[12] Sellke, S. H.; C. C.Wang; Bagchi, S.; Shroff, N. B. "Covert TCP/IP Timing Channels: Theory to Implementation"; In Proc. of INFOCOM, Brazil, 2009, 2204 – 2212.

[13] Ahmadzadeh, S. A. "Behavioral Mimicry Covert Communication"; Ph.D. Thesis, Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Canada, 2013.

[14] Kundur, D.; Ahsan, K. "Practical Internet Steganography: Data Hiding in IP"; In Proc. of Texas Workshop on Security of Information Systems, Texas, 2003.

[15] El-Atawy, A.; Al-Shaer, E. "Building Covert Channels over the Packet Reordering Phenomenon"; In Proc. of IEEE INFOCOM, Brazil, 2009, 2186-2194.

[16] Houmansadr, A. "Design, Anlysis, and Implementation of Effective Network Flow Watermarking Schemes"; Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2012.

[17] Daniel, E. J.; White, C. M.; Teague, K. A. "An Inter-Arrival Delay Jitter Model using Multi-Structure Network Delay Characteristics for Packet Networks"; In Proc. of 37th Asilomar Conf. on Signal, Systems, and Computers, New York, 2003, 1738-1742.

[18] Rizo-Dominguez, L.; Torres-Roman, D.; Munoz-Rodriguez, D.; Vargas-Rosales, C. "Jitter in IP Networks: A Cauchy Approach"; IEEE Commun. Lett. 2010, 14, 190-192.

[19] Pi, Z.; Kwon, E.; Kim, D.; Kim, D. "Forward Link Voip Packet Delay Jitter Model"; Samsung Electronics Co. C30-20060719-006, 2006.

[20] Bandhopadhya, T .K.; Saxena, M.; Tiwari, A. "Jitter's Alpha Stable Distribution Behavior"; International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE) 2013, 3, 13-16.

[21] Abdolazimi, A.; Mohamadi, M.; Naser-Sharif, B.; Akbari, A. "Combination of Several Methods for the Recovery of Lost Packets and its Application in Distributed Speech Recognition"; Presented at the Third Int. Conf. on Information and Knowledge Technology, Ferdowsi University of Mashhad, 2007 (In Persian).

[22] Association, Telecommunications Industry "Network Model for Evaluating Multimedia Transmission Performance Over Internet Protocol"; Vol. PN-3-0062-RV1, ed. to be Published as ANSI/TIA 921 A, 2007.

[23] Cisco Systems, Inc, "Packet Loss Model"; Vol. TR41.3.3/00-02-005, Ed: Ram Jagadeesan, 2000.

[24] Flynn, R.; Jones, E. "Robust Distributed Speech Recognition in Noise and Packet Loss Conditions"; Digital Signal Processing 2010, 20, 1559-1571.

[25] Mochinac, J.; Kocan, P.; Hrusovsky, B. "Packet Loss Modeling"; In Proc. of 10th Scientific Conf. of Young Researchers, Slovakia, 2010.

[26] Bennett, J. C. R.; Partridge, C.; Shectman, N. "Packet Reordering is not Pathological Network Behavior"; IEEE ACM T Network 1999, 7, 789–798.

[27] Blanton, E.; Allman, M. "Using TCP DSACKs and SCTP Duplicate TSNs to Detect Spurious Retransmissions"; RFC 3708, 2004.

[28] Zhang, M.; Karp, B.; Floyd, S.; Peterson, L. "RR-TCP: A Reordering Robust TCP with DSACK"; In Proc. of IEEE ICNP, Georgia, 2003, 95–106.

[29] Ma, C.; Leung, K. "Improving TCP Robustness under reordering Network Environment"; In Proc. of GLOBECOM, USA, 2004, 828-832.

[30] Feng, J.; Ouyang, Z.; Xu, L.; Ramamurthy, B. "Packet Reordering in High-Speed Networks and its Impact on High-Speed TCP Variants"; Comput. Commun. 2009, 32, 62-68.

[31] Piratla, N. M.; Jayasumana, A. P. "Metrics for Packet Reordering-a Comparative Analysis"; Int. J. Commun. Sys. 2007, 21, 99–113.

[32] Wikipedia, "Petri net"; Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Petri_net, 2014.