

بررسی تأخیر جدول جریان ایستگاه پایه

در شبکه‌های دسترسی رادیویی مبتنی بر نرم افزار

سیدحامد رستگار^۱، علی اعظم عباسفر^۲، وحید شاه‌منصوری^۳^۱پژوهشکده علوم کامپیوتر، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران
hrastegar@ipm.ir^۲دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران
abbasfar@ut.ac.ir^۳دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران
vmansouri@ut.ac.ir

چکیده

صنعت در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند. برخلاف روش رایج در شبکه‌های کامپیوتری که تجهیزات مختلف به صورت مستقل تصمیم‌گیری و عمل می‌کنند، در این دیدگاه گره‌های مختلف از فرامین یک واحد کنترل‌کننده مرکزی تبعیت می‌کنند [1]. یک مزیت مهم این دیدگاه، امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و روش‌های مختلف توسط مدیر شبکه از طریق واسط ایجاد شده توسط واحد مرکزی و بدون مراجعه به تجهیزات مختلف است. این نکته کلیدی، بنابراین آزمودن و بررسی ایده‌های نوین را به راحتی و با کمترین هزینه میسر می‌سازد.

از طرفی یکی از شاخه‌های بسیار مهم در نقشه‌راه شبکه‌های نسل آینده سلولی شامل 5G، انعطاف‌پذیری و چابکی است. این خصوصیت بدین معناست که اعمال تغییر در بخش‌های مختلف شبکه و نیز اضافه یا حذف کردن سرویس‌ها به راحتی، به سرعت و با کمترین هزینه امکان‌پذیر باشد. در عین حال با توجه به ویژگی‌های شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار، تطابق بسیار خوبی بین قابلیت‌های این دیدگاه و نیازمندی‌های طراحی شبکه سلولی آینده مشاهده می‌شود. به همین خاطر، SDN یکی از جذاب‌ترین فناوری‌ها جهت بکارگیری در شبکه‌های سلولی نسل آینده است به نحوی که در بسیاری از طرح‌های پیشنهادی به عنوان بخشی اصلی و مهم در نظر گرفته شده و همچنین ایده‌های مربوط به آن در محصولات زیادی نیز در عمل بکار گرفته شده است [2].

چنانچه در معرفی شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار گفته شد، گره‌ها و تجهیزات در آن از دستورات یک کنترل‌کننده مرکزی تبعیت می‌کنند. بنابراین لازم است به طور مستمر با این واحد مرکزی در رابطه بوده و به تبادل اطلاعات بپردازند. در عین حال این ارتباط مداوم نیازمند ردوبدل کردن حجم قابل توجهی ترافیک داده بوده و همچنین می‌تواند با توجه به فاصله، منجر به تأخیر قابل ملاحظه‌ای نیز شود. برای حل این چالش‌ها، روش متداول استفاده از یک جدول جریان^۱ در گره‌های مبتنی بر SDN و بنابراین ذخیره دستورات ارسالی از طرف کنترل‌کننده است. بدین ترتیب تنها کافی است برای اولین بسته ورودی مربوط به یک کاربر قانون مربوطه توسط آن گره از واحد مرکزی سوال شود و

شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار (SDN) یکی از مهم‌ترین فناوری‌های پیش‌ساز جهت افزایش انعطاف‌پذیری و چابکی شبکه‌های سلولی آینده است. در این دیدگاه، بخش قابل توجهی از تصمیمات توسط یک واحد کنترل‌کننده مرکزی انجام گرفته و به گره‌ها و تجهیزات مختلف برای پردازش بسته‌های ورودی‌شان ارسال می‌شود. این مساله نیازمند ارتباط مستمر این گره‌ها و کنترل‌کننده است که باعث تأخیر در عملکرد گره‌ها و نیز ترافیک بالای داده می‌شود. در این راستا و برای حل چالش فوق، از جداول جریان در گره‌ها استفاده می‌شود تا فرامین واحد مرکزی در آن ذخیره شود. در عین حال، سخت‌افزارهای مورد استفاده برای ساخت این جداول جریان موسوم به TCAM علیرغم داشتن سرعت پردازش بسیار بالا، مصرف توان قابل توجهی داشته و بسیار گران‌قیمت هستند. بنابراین گره‌ها می‌توانند تنها از منبع محدودی TCAM بهره ببرند. در این مقاله، یک ایستگاه پایه مبتنی بر SDN که دارای منبع محدودی از TCAM است را در یک سلول در نظر می‌گیریم. با فرض توزیع کاربران مطابق با یک فرآیند نقطه‌ای پواسن، عبارت تأخیر متوسط را برای پردازش بسته‌های یک کاربر می‌نویسیم. در نهایت با بکارگیری ابزار معادلات دیفرانسیل، فرمی بسته برای تأخیر متوسط به عنوان تابعی از مساحت سلول و چگالی کاربران ارائه می‌دهیم. در نهایت، نتایج عددی تأثیر پارامترهای مختلف را بر تأخیر متوسط پردازش مورد بررسی قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی

شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار، شبکه دسترسی رادیویی، محدودیت جدول جریان، متوسط تأخیر، معادله دیفرانسیل، فرآیند نقطه‌ای پواسن.

۱- مقدمه

شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار^۱ به عنوان انقلابی در حوزه شبکه‌های کامپیوتری معرفی شده‌اند و توجه زیادی را از طرف هر دو بخش دانشگاه و

حداقل کردن تاخیر انتها به انتها با در نظر داشتن فضای محدود جدول جریان گره‌های شبکه طراحی کرده اند.

محدودیت اخیر برای بکارگیری SDN در شبکه‌های بی‌سیم و دسترسی نیز وجود دارد. این مساله به ویژه با توجه به جایگاه شبکه‌های بی‌سیم در توسعه روزافزون اینترنت اشیاء با تعداد بسیار زیادی وسیله متصل حائز اهمیت است. در این رابطه، مولفان [12] الگوریتمی را برای ذخیره‌سازی قوانین در شبکه‌های دسترسی مبتنی بر SDN با در نظر داشتن کاربران متحرک پیشنهاد داده‌اند. [13] با بهره‌گیری از مجازی‌سازی شبکه در یک ساختار SDN، الگوریتمی را برای حداکثر کردن تعداد گروه‌های اجتماعی کاربران با در نظر داشتن محدودیت فضای جدول جریان پیشنهاد داده است. در [14]، با استفاده از مدل‌های ریاضی تحرک‌پذیری یک طرح پیشگو برای قراردادن قوانین در یک شبکه ترکیبی سلولی و اینترنت اشیاء با قابلیت SDN طراحی شده است. [15] یک الگوریتم مسیریابی و رد کردن^۴ هم‌زمان با در نظر گرفتن چالش مقیاس‌پذیری SDN و با هدف حداقل کردن تعداد تقاضاهای نصب قوانین در جداول جریان در یک شبکه مرکز داده ترکیبی سیمی و بی‌سیم پی‌ریزی کرده است. هم‌چنان روش‌هایی برای کاهش استفاده از منابع جدول جریان در شبکه‌های اینترنت نقلیه^۵ مبتنی بر SDN در [16] و [17] با در نظر داشتن بار شبکه و تحرک کاربران معرفی شده‌اند. در [18] مساله تخصیص منابع جدول جریان یک ایستگاه پایه به کاربران در یک سلول با فرض ارسال اطلاعات با نرخ ثابت فرمول‌بندی شده و روشی بهینه برای حل آن ارائه شده است. نویسندگان [19]، مساله اخیر را برای حالتی که تعداد زیاد کاربر ترافیک خود رو به صورت توده‌ای^۶ ارسال می‌کنند مورد بررسی قرار داده‌اند و الگوریتم موثری با عملکرد نزدیک به بهینه برای آن طراحی کرده‌اند.

۳- مدل سیستم و فرمول بندی مساله

در این بخش ابتدا مدل سیستم و اجزای آن را معرفی و تشریح می‌کنیم. سپس مساله مورد نظر در این پژوهش را بیان کرده، فرمول بندی اولیه آن را ارائه می‌دهیم.

۱-۳- اجزا و مدل سیستم

در این پژوهش بخش شبکه دسترسی رادیویی از یک شبکه سلولی مبتنی بر SDN را مطابق شکل (۱) در نظر می‌گیریم. به طور کلی در یک شبکه سلولی مبتنی بر SDN اجزا و گره‌های مختلف شبکه با واحدی مرکزی در ارتباط هستند. این واحد از لحاظ منطقی مرکزی که خود می‌تواند شامل چندین بخش مختلف در مکان‌های مجزا باشد، معادل کنترل کننده در معماری متداول SDN است. بدین ترتیب گره‌های شبکه، اطلاعات مختلف را به واحد مرکزی ارسال کرده و در مقابل دستورهای لازم جهت اعمال را از آن دریافت می‌کنند. با این توضیحات گره‌های مختلف لازم است در تعامل با واحد مرکزی باشند و با ورود هر بسته فرمان مربوطه را جهت اعمال دریافت کنند. چنانچه در بخش ۲ توضیح داده‌شد، برای مواجهه با مشکلات ناشی از این مساله، فرامین مربوطه در جدول جریان در آن گره ذخیره می‌شود. این جداول جریان برای عملکرد مناسب، از ساختارهایی TCAM با سرعت بالا استفاده می‌کنند. حال آنکه که به دلیل گرانی و مصرف توان بالای آن‌ها، گره‌های شبکه‌های مبتنی بر SDN معمولاً دارای ظرفیت محدودی از TCAM هستند. این

برای بسته‌های بعدی با مراجعه به جدول جریان از هزینه مربوطه اجتناب خواهد شد. در پیاده‌سازی جداول جریان و با هدف پردازش سریع بسته‌های ورودی، از ساختار TCAM³ [3] استفاده می‌شود که سرعت خواندن و تطبیق^۳ بسیار بالایی دارد. علیرغم این مزایا، این ساختار دارای مصرف توان قابل توجهی بوده و هم‌چنین بسیار گران قیمت است [4]. به همین دلیل گره‌ها می‌توانند منابع محدودی از TCAM در اختیار داشته باشند. بنابراین تخصیص موثر آن برای ذخیره قوانین مربوط به کاربران مختلف از اهمیت بسزایی برخوردار است. از طرفی با توجه به این محدودیت، تاخیر اجتناب‌ناپذیری نیز در پردازش بسته‌ها به وجود خواهد آمد. این مساله به ویژه برای شبکه‌های 5G که هدف آن پشتیبانی از اینترنت اشیاء با تعداد اشیاء متصل بسیار زیاد است نیز مساله بسیار مهمی است [2].

اگرچه پژوهش‌های مختلفی به بحث محدودیت TCAM در جداول جریان تجهیزات مبتنی بر SDN پرداخته‌اند، کارهای بسیار محدودی به بررسی میزان تاخیر گره‌ها و اثر آن در شبکه‌های سلولی پرداخته‌اند. در این راستا و در این مقاله، یک ایستگاه پایه^۵ را در بخش شبکه دسترسی رادیویی^۶ یک شبکه سلولی مبتنی بر SDN در نظر گرفته‌ایم. فرض شده که این BS مجهز به جدول جریانی با ظرفیت محدودی از TCAM است و بنابراین قادر به ذخیره قوانین مربوط به تمامی کاربران موجود در سلول تحت پوشش خود نیست. با در نظر گرفتن توزیع کاربران در سلول مطابق با یک فرآیند نقطه‌ای بواسن^۷، مقدار تاخیر متوسط را نوشته و عبارتی به فرم بسته برای آن ارائه می‌دهیم. این پژوهش علاوه بر اینکه با توجه به بررسی‌ها و دانش مولفان تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است، یک مسیر تحقیقاتی جدید و چالشی نوین را جهت بررسی توسط محققان معرفی می‌کند.

ساختار مقاله در ادامه به صورت زیر است. در بخش دوم به معرفی و بررسی کارهای مرتبط می‌پردازیم. سپس مدل سیستم و فرمول بندی مساله ارائه می‌شود. در بخش چهارم فرمی بسته برای تاخیر متوسط بدست می‌آید. در نهایت نتایج عددی و نتیجه‌گیری به ترتیب در بخش‌های پنجم و ششم تشریح می‌شوند.

۲- کارهای مرتبط

چالش محدودیت فضای جدول جریان موضوع پژوهش‌های مختلفی البته با تمرکز بیشتر بر شبکه‌های سیمی بوده است. در این رابطه در [5]، نویسندگان الگوریتم‌های ابتکاری برای بهینه‌سازی همزمان قراردادن قوانین و مهندسی ترافیک در شبکه مبتنی بر نرم‌افزار با محدودیت TCAM را طراحی کرده‌اند. هم‌چنین [6] تاخیر ارتباط با کنترل کننده SDN را به عنوان هزینه نداشتن قانون مربوطه در جدول جریان در نظر گرفته و الگوریتم‌هایی برای حداقل کردن این هزینه پیشنهاد داده است. چالش دیگری که در این حوزه در نظر گرفته شده است، حملات سرریز^۸ به جدول جریان است به نحوی که با ارسال تعداد بسته نامربوط بسیار زیاد و پر کردن ظرفیت آن، امکان ارائه سرویس به کاربران حقیقی را از بین برده و بنابراین باعث مختل شدن شبکه شوند. مطالعات مختلفی، این مساله را در نظر گرفته [7-9] و با طراحی روش‌های قراردادن قوانین در تجهیزات شبکه براساس تحلیل آمارگان بسته‌های ورودی به مقابله با این دست از حملات پرداخته‌اند. هم‌چنین بازیابی خطا با در نظر داشتن منابع TCAM در [10] مطالعه شده است. نویسندگان [11] الگوریتمی را برای

در جدول جریان ایستگاه پایه تشکیل نمی‌شود و به همین خاطر در فرمول‌بندی نیز تأخیر ناشی از آن لحاظ نشده است. در عین حال پارامتر تعداد کاربران (N) در یک سلول مقداری تصادفی است. بنابراین برای متوسط تأخیر کاربر در یک سلول با فرض توزیع تصادفی تعداد کاربران به صورت می‌توان نوشت:

$$E[Delay] = \sum_{n=C+1}^{\infty} \left(1 - \frac{C}{n}\right) \times d_{RAM} \times \Pr\{N = n\} \quad (2)$$

۴- محاسبه تأخیر متوسط

در بخش ۳ عبارت متوسط تأخیر مطابق رابطه (۲) ارائه شد. در عین حال برای نوشتن کامل این عبارت به توزیع تصادفی کاربران نیاز است. در این رابطه یک مدل ریاضی بسیار متداول و معتبر جهت بیان توزیع تعداد کاربران در شبکه های سلولی فرآیند نقطه‌ای پواسن است [20]. در این مدل، برای چگالی کاربران در مساحت واحد برابر با λ_u احتمال وجود n کاربر در یک فضای دو بعدی با مساحت A برابر است با:

$$\Pr\{N = n\} = \frac{(\lambda_u A)^n}{n!} \exp(-\lambda_u A) \quad (3)$$

بنابراین و با جایگذاری رابطه (۳) در (۲)، عبارت متوسط تأخیر را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$E[Delay] = \sum_{n=C+1}^{\infty} \left(1 - \frac{C}{n}\right) \times d_{RAM} \times \Pr\{N = n\} = d_{RAM} \times \left[(1 - \Pr\{N \leq C\}) - C \sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{(\lambda_u A)^k}{k!} \exp(-\lambda_u A) \right] \quad (4)$$

که در آن $\Pr\{N \leq C\}$ تابع توزیع تجمعی (CDF) متغیر تصادفی N بوده و برابر با $\frac{\Gamma(C+1, \lambda_u A)}{C!}$ است که $\Gamma(m, z)$ تابع گامای ناکامل است و به صورت زیر تعریف می‌شود [21]:

$$\Gamma(m, d) \triangleq \int_z^{\infty} t^{m-1} e^{-t} dt. \quad (5)$$

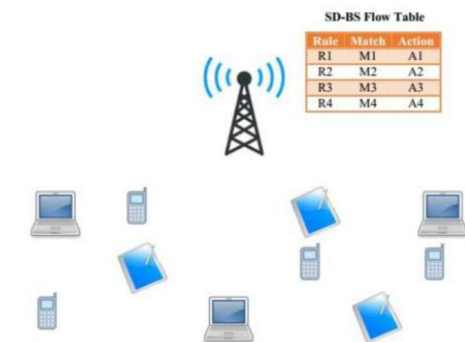
بنابراین چالش باقی مانده برای بدست آوردن متوسط تأخیر، محاسبه عبارت جمع در (۴) است که آن را به عنوان تابعی از متغیر جدید $b = \lambda_u A$ به صورت زیر می‌توان بازنویسی کرد:

$$E_C(b) = \sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{b^k}{k!} \exp(-b) \quad (6)$$

برای محاسبه جمع فوق، از دو طرف رابطه مشتق می‌گیریم که بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$\frac{dE_C(b)}{db} = \sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{kb^{k-1}}{k!} \exp(-b) - \sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{1}{k!} b^k \exp(-b) = \quad (7)$$

مساله باعث می‌شود که ایستگاه پایه بکارگرفته شده در بخش دسترسی رادیویی شبکه های سلولی مبتنی بر SDN با توجه به ظرفیت محدود جدول جریان خود قادر به ذخیره قوانین مربوط به تمامی کاربران متناظر خود نباشد. بدین ترتیب این ایستگاه مجبور می‌شود برای بخشی از کاربران از حافظه‌هایی ارزان‌تر اما با سرعت پایین‌تر و معمولاً از نوع RAM استفاده کند که منجر به تأخیر بسیار بیشتر پردازش می‌شود. با این انگیزه و در این پژوهش در صدد هستیم تأخیر متوسط ناشی از این محدودیت در پردازش بسته‌های ورودی به یک ایستگاه پایه در یک سلول را بدست آوریم.



شکل (۱): یک ایستگاه پایه با قابلیت SDN و کاربران متناظر آن

۲-۳- فرمول بندی مساله

با توجه به توضیحات زیربخش قبل، یک ایستگاه پایه مبتنی بر SDN را در نظر می‌گیریم که دارای جدول جریانی شامل TCAM با ظرفیت C است. این ایستگاه پایه به تعداد N کاربر در یک سلول خدمت‌رسانی می‌کند. برای امکان‌پذیر بودن دنبال کردن مسئله فرض می‌کنیم در هر بازه زمانی منابع موجود TCAM به طور تصادفی و با احتمال یکسان به تعداد C کاربر از بین N کاربر (با فرض $N > C$) تخصیص داده شود. بنابراین تأخیر متوسط پردازش یک بسته ناشی از محدودیت ظرفیت جدول جریان را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$Delay = \begin{cases} \left(1 - \frac{C}{N}\right) \times d_{RAM}, & \text{if } N > C \\ 0, & \text{if } N \leq C \end{cases} \quad (1)$$

که در آن d_{RAM} بیانگر تأخیر بخشی از جدول جریان به جز TCAM است که به صورت RAM پیاده‌سازی شده و دارای تأخیر قابل‌ملاحظه‌ای است. در این عبارت در صورتی که تعداد کاربران کمتر از ظرفیت بخش TCAM باشد، تأخیر بسیار ناچیزی در پردازش بسته‌ها خواهیم داشت. در عین حال در این تحلیل با توجه به سرعت بسیار بالای TCAM از تأخیر پردازش آن در مقابل RAM صرف‌نظر می‌کنیم و به همین دلیل میزان تأخیر در حالت $N \leq C$ برابر با صفر قرار داده شده است. از طرف دیگر، برای حالت تعداد کاربران بیشتر از ظرفیت و با توجه به تخصیص تصادفی با احتمال مساوی TCAM، به احتمال $1 - \frac{C}{N}$ منبع RAM با تأخیر d_{RAM} به یک کاربر تخصیص داده می‌شود. بنابراین تأخیر متوسط پردازش بسته یک کاربر در جدول جریان برابر با $\left(1 - \frac{C}{N}\right) \times d_{RAM}$ خواهد بود. لازم به ذکر است که در این تحلیل فرض می‌شود حجم ترافیک کاربران به نحوی است که صفی

بسته‌های کاربری با استفاده از یک ایستگاه پایه با ظرفیت جدول جریان مبتنی بر TCAM برابر با C ، به صورت زیر خواهد بود:

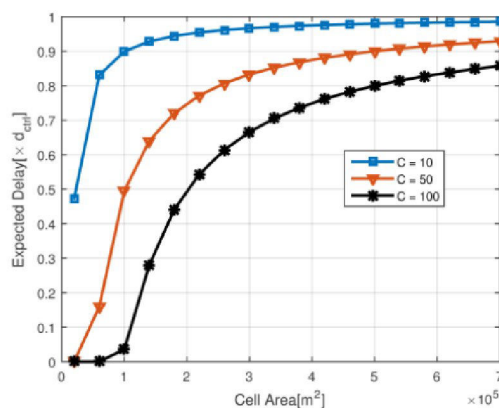
$$E\{Delay\} = \left(1 - \frac{\Gamma(C+1, \lambda_u A)}{C!} - C \left\{ Ei(\lambda_u A) - Ei(1) - \ln(\lambda_u A) - \sum_{k=1}^C \frac{(\lambda_u A)^k}{k \times k!} - 1 \right\} e^{-\lambda_u A} \right) d_{RAM} \quad (13)$$

۵- نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی را برای عبارت تأخیر متوسط حاصل در بخش ۴ ارائه می‌دهیم. لازم به ذکر است که تمامی توابع مورد استفاده در بخش‌های قبل در نرم‌افزارهای متداول محاسبات عددی هم‌چون MATLAB به صورت از پیش تعریف شده قابل استفاده است. هم‌چنین در این محاسبات و بررسی‌ها با توجه به اینکه تمامی عبارت به صورت حاصل ضربی از پارامتر تأخیر حافظه RAM (d_{RAM}) هستند، مقادیر را به صورت نرمالیزه به این پارامتر لحاظ می‌کنیم.

در بررسی اول، یک سلول را که در آن کاربران با توزیع PPP و با چگالی $\lambda_u = 10^{-3}/m^2$ توزیع شده‌اند، در نظر می‌گیریم. در این حالت، متوسط تأخیر را برحسب مساحت سلول (A) و برای سه ظرفیت مختلف TCAM برابر با $C = 10, 50, 100$ در شکل (۲) رسم کرده‌ایم. مطابق این شکل متوسط تأخیر با افزایش مساحت سلول و نیز کاهش ظرفیت جدول جریان افزایش می‌یابد.

در بررسی دوم، پارامتر ظرفیت جدول جریان را برابر با $\lambda_u A$ با $C = E[N]$ قرار داده و مقدار متوسط تأخیر را برحسب آن در شکل (۳) رسم کرده‌ایم. با توجه به این شکل برای تا مقادیر $C = 10$ کاهش قابل‌توجهی در مقدار متوسط تأخیر رخ داده است و پس از آن از شیب این کاهش کاسته شده است. شایان ذکر است که با توجه به نوع وابستگی پارامترهای λ_u و A به C و نیز نقش آن‌ها در عبارت متوسط تأخیر، در صورت ثابت نگه‌داشتن یکی، نمودار متوسط تأخیر برحسب پارامتر دیگر مشابه آن‌چه برای C حاصل شده، بدست خواهد آمد.



شکل (۲): نمودار متوسط تأخیر برحسب مساحت سلول

در عین حال با توجه به اینکه برای تابع توزیع در (۳) داریم $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{b^n}{n!} \exp(-b) = 1$ ، می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$\sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{b^{k-1}}{k!} \exp(-b) = \frac{1}{b} \left(1 - \sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{b^k}{k!} \exp(-b) \right) \quad (8)$$

حال با کنار هم قراردادن دو رابطه اخیر معادله دیفرانسیل زیر را تشکیل می‌دهیم:

$$\frac{dE_c(b)}{db} - E_c(b) = \frac{1}{b} \left(1 - \sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{b^k}{k!} \exp(-b) \right) \quad (9)$$

$$E_c(b=0) = 0$$

که شرط مرزی در فوق با قراردادن $b=0$ در رابطه (۶) حاصل می‌شود. برای حل معادله دیفرانسیل فوق، هر دو طرف رابطه را در $\exp(b)$ ضرب می‌کنیم:

$$\exp(b) \frac{dE_c(b)}{db} - \exp(b) E_c(b) = \frac{1}{b} \left(\exp(b) - \sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{b^k}{k!} \exp(-b) \right) \quad (10)$$

با این حال سمت چپ رابطه فوق را می‌توان به صورت $\frac{d(E_c(b) \exp(b))}{db}$ نوشت. با گرفتن انتگرال از دو طرف رابطه (۱۰)، پاسخ معادله دیفرانسیل به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$E_c(b) = \left[\int_1^b e^t t^{-1} dt - \ln(b) - \sum_{k=1}^C \frac{b^k}{k \times k!} + \beta \right] e^{-b}, \quad (11)$$

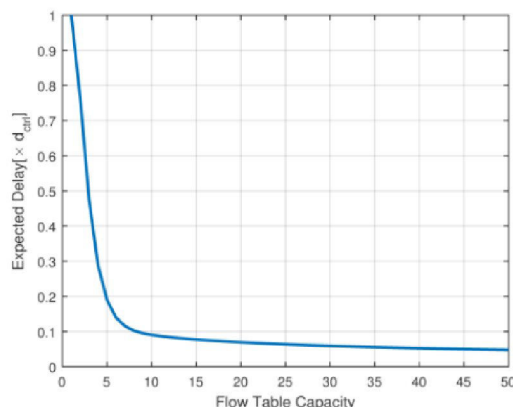
که در آن β یک پارامتر ثابت است. برای محاسبه β ، لازم است از شرط مرزی $b(0) = 0$ استفاده کرد. برای این هدف با توجه به اینکه عبارت $\int_1^b e^t t^{-1} dt - \ln(b)$ در اطراف $b=0$ نامعین است، از قاعده هوییتال استفاده می‌کنیم که بنابراین خواهیم داشت $\beta = -1$. برای نوشتن عبارت حاصل در (۱۱) از تابع انتگرال نمایی^{۲۱} مطابق تعریف زیر بهره می‌بریم [21]:

$$Ei(z) \triangleq \int_{-\infty}^z e^t t^{-1} dt, \quad (12)$$

که تابعی مشهور و البته موجود در بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری محاسباتی است. بدین ترتیب انتگرال در رابطه (۱۱) را می‌توان به صورت $\int_1^b e^t t^{-1} dt = Ei(b) - Ei(1)$ نوشت.

در نهایت و با در کنار هم دادن یافته‌های فوق می‌توانیم نتیجه زیر را بیان کنیم: برای یک سلول با مساحت A که کاربران در آن براساس یک فرآیند نقطه‌ای پواسن (PPP) با چگالی λ_u توزیع شده‌اند، متوسط تأخیر پردازش

- [6] H. Huang, S. Guo, P. Li, W. Liang, and A. Y. Zomaya, "Cost minimization for rule caching in software defined networking," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 1007–1016, 2016.
- [7] T. Xu, D. Gao, P. Dong, C. H. Foh, and H. Zhang, "Mitigating the table overflow attack in software-defined networking," *IEEE Transactions on Networks and Service Management*, vol. 14, no. 4, pp. 1086–1097, Dec 2017.
- [8] B. Yuan, D. Zou, S. Yu, H. Jin, W. Qiang, and J. Shen, "Defending against flow table overloading attack in software-defined networks," *IEEE Transactions on Services Computing*, vol. 12, no. 2, pp. 231–246, March 2019.
- [9] T. Cheng, K. Wang, L.-C. Wang, and C.-W. Lee, "An in-switch rule caching and replacement algorithm in software defined networks," in *Proc. of IEEE ICC*, 2018, pp. 1–6.
- [10] P. M. Mohan, T. Truong-Huu, and M. Gurusamy, "Fault tolerance in tcam-limited software defined networks," *Computer Networks*, vol. 116, pp. 47–62, 2017.
- [11] L. Luo, R. Chai, Q. Yuan, J. Li, C. Mei, "End-to-End Delay Minimization-Based Joint Rule Caching and Flow Forwarding Algorithm for SDN," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 145227–145241, 2020.
- [12] M. Dong, H. Li, K. Ota, and J. Xiao, "Rule caching in sdn-enabled mobile access networks," *IEEE Network*, vol. 29, no. 4, pp. 40–45, 2015.
- [13] H. Li, M. Dong, and K. Ota, "Radio access network virtualization for the social internet of things," *IEEE Cloud Computing*, no. 6, pp. 42–50, 2015.
- [14] S. Bera, S. Misra, and M. S. Obaidat, "Mobi-flow: Mobility-aware adaptive flow-rule placement in software-defined access network," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 18, no. 8, pp. 1831–1842, Aug 2019.
- [15] C.-C. Chuang, Y.-J. Yu, and A.-C. Pang, "Flow-aware routing and forwarding for sdn scalability in wireless data centers," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 15, no. 4, pp. 1676–1691, 2018.
- [16] X. Wang, C. Wang, J. Zhang, M. Zhou, and C. Jiang, "Improved rule installation for real-time query service in software-defined internet of vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 225–235, 2017.
- [17] L. Mendiboure, M. Aymen Chalouf, F. Krief, "Load-Aware and Mobility-Aware Flow Rules Management in Software Defined Vehicular Access Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 167411–167424, 2020.
- [18] S. H. Rastegar, A. Abbasfar and V. Shah-Mansouri, "On Fair Rule Caching in Software Defined Radio Access Networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 460–463, June 2018.
- [19] S. H. Rastegar, A. Abbasfar and V. Shah-Mansouri, "Rule Caching in SDN-Enabled Base Stations Supporting Massive IoT Devices With Bursty Traffic," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 9, pp. 8917–8931, Sept. 2020.
- [20] J. G. Andrews, R. K. Ganti, M. Haenggi, N. Jindal and S. Weber, "A primer on spatial modeling and analysis in wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 11, pp. 156–163, November 2010.
- [21] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables*. Dover Publications, 1965.



شکل (۳): نمودار متوسط تاخیر برحسب ظرفیت جدول جریان

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک شبکه دسترسی رادیویی مبتنی بر SDN که ایستگاه‌های پایه در آن به جداول جریان برای ذخیره قوانین ارسال با ظرفیت محدود TCAM مجهز هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. به طور ویژه یک ایستگاه پایه را با ظرفیت محدود از TCAM در یک سلول یا مساحت مشخص و با توزیع کاربران طبق فرآیند نقطه‌ای پواسن در نظر گرفته‌ایم. در این رابطه متوسط تاخیر پردازش ناشی از محدودیت TCAM برای بسته‌های ورودی کاربران به این ایستگاه پایه را فرمول‌بندی کرده و رابطه‌ای به فرم بسته برای آن ارائه کردیم. یافته‌های حاصل در این مقاله می‌تواند توسط یک طراح برای میزان ظرفیت مورد نیاز جدول جریان جهت دستیابی به یک تاخیر هدف مورد استفاده قرار گیرد. در عین حال، هم‌چنان مسائل قابل توجهی برای بررسی وجود دارد. در این مقاله تخصیص جدول جریان را به صورت تصادفی به کاربران فرض کرده‌ایم. یک پژوهش می‌تواند مسأله را برای روش‌های تخصیص دیگر مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد و یا اینکه با توجه به عبارت متوسط تاخیر، تخصیص مناسب را فرمول‌بندی کرده و بدست آورد.

مراجع

- [1] D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey," *Proceeding of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, 2015.
- [2] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [3] K. Pagiamtzis and A. Sheikholeslami, "Content-addressable memory (cam) circuits and architectures: A tutorial and survey," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 3, pp. 712–727, 2006.
- [4] N. Katta, O. Alipourfard, J. Rexford, and D. Walker, "Infinite cache flow in software-defined networks," in *Proc. of HotSDN*. ACM, 2014, pp. 175–180.
- [5] H. Huang, S. Guo, P. Li, B. Ye, and I. Stojmenovic, "Joint optimization of rule placement and traffic engineering for QoS provisioning in software defined network," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 64, no. 12, pp. 3488–3499, 2015.



پانویس ها

- | | | | |
|-------------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|
| Poisson Point Process (PPP) | ^۷ | Software Defined Network (SDN) | ^۱ |
| Overflow Attacks | ^۸ | Flow Table | ^۲ |
| Forwarding | ^۹ | Ternary Content Addressable Memory | ^۳ |
| Internet of Vehicles (IoV) | ^{۱۰} | Matching | ^۴ |
| Bursty | ^{۱۱} | Base Station (BS) | ^۵ |
| Exponential Integral Function | ^{۱۲} | Radio Access Network (RAN) | ^۶ |