

مدل سازی و ارزیابی کارایی شبکه‌های نرم‌افزار محور با چند کنترلر توزیع شده

فرنوش ستاری^۱، بهادر بخشی سراسکانرود^۲

^۱ {farnoosh.satari, bbakhshi}@aut.ac.ir، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

چکیده

شبکه‌های نرم‌افزار محور (SDN) یکی از راه‌کارهای نوین و مورد توجه در راستای بهبود شبکه‌های سنتی به شمار می‌آیند که به جداسازی سطح کنترل از سطح داده می‌پردازند و OpenFlow به عنوان شناخته شده ترین پروتکل ارتباطی میان این دو سطح به کار می‌رود. در این شبکه‌ها، چالش‌های زیادی در زمینه‌ی قابلیت اطمینان، مقیاس‌پذیری و کارایی وجود دارند که باید بررسی شوند. یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در این شبکه‌ها بحث مقیاس‌پذیری آن‌هاست که بسیار وابسته به ارتباطات بین کنترلر و سوئیچ است و به شدت کارایی شبکه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هم‌چنین شناخت کارایی و محدودیت‌های شبکه‌های SDN مبتنی بر OpenFlow یکی از پیش‌نیازهای طراحی و توسعه آن‌ها محسوب می‌گردد. از این رو، در این مقاله ما به بررسی رفتارهای شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر و ارزیابی کارایی آن‌ها با استفاده از تئوری صف می‌پردازیم. بر این اساس سوئیچ‌های OpenFlow را به صورت صف $M^K/M/1$ و کنترلرهای SDN را بر اساس صف $M/G/1$ مدل می‌کنیم و سپس با استفاده از این مدل‌های صف، متوسط زمان جلورانی بسته‌ها یا به عبارت دیگر، متوسط مدت زمان اقامت بسته‌ها در هر سوئیچ OpenFlow را به دست می‌آوریم. سپس با استفاده از تحلیل‌های عددی بر اساس پارامترهای مختلف کارایی، به ارزیابی شبکه‌ی OpenFlow مقیاس‌پذیر می‌پردازیم و تعداد کنترلرهای مورد نیاز را در یک شبکه مقیاس‌پذیر تعیین می‌کنیم.

کلمات کلیدی

ارزیابی کارایی، مدل صف، شبکه‌های نرم‌افزار محور، کنترلرهای توزیع شده، SDN، OpenFlow

۱- مقدمه

از آنجایی که توسعه و پیشرفت شبکه‌های سنتی به بیش از ۳۰ سال پیش بازمی‌گردد، مدیریت آن‌ها بسیار سخت و پیچیده شده و از انعطاف‌پذیری لازم جهت رفع نیازهای امروز برخوردار نمی‌باشد. اما در طول چند سال گذشته، طراحی و مدیریت شبکه‌ها با خلاقیت و نوآوری بیشتری همراه بوده که این امر به کمک شبکه‌های نرم‌افزار محور (SDN) محقق گشته است که محصول سال‌ها تلاش برای دستیابی به شبکه‌های قابل برنامه‌ریزی و انعطاف‌پذیر است [۱].

شبکه‌های نرم‌افزار محور، که به جداسازی سطح کنترل از سطح داده در شبکه‌ها می‌پردازد، یک انقلاب در راستای بهبود شبکه‌های سنتی به شمار می‌آید. با وجود آنکه شبکه‌های نرم‌افزار محور در ابتدا تنها در حوزه‌های

پژوهشی مطرح شدند، اما در حال حاضر این ایده، راه خود را به برنامه‌های تجاری کاربردی باز کرده است. با این وجود هم‌چنان چالش‌های زیادی در زمینه‌ی مقیاس‌پذیری و کارایی شبکه‌های نرم‌افزار محور وجود دارند که باید بررسی شوند. یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در این شبکه‌ها بحث مقیاس‌پذیری آن‌هاست که بسیار وابسته به ارتباطات بین کنترلر (به عنوان سرویس‌دهنده سطح کنترل) و سوئیچ (به عنوان سرویس‌دهنده سطح داده) است و به شدت کارایی شبکه را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲].

مطالعاتی که در زمینه ارزیابی کارایی شبکه‌های نرم‌افزار محور صورت گرفته است، برای طراحی و معماری این شبکه‌ها بسیار ضروری است. اگرچه در کارهای موجود، بررسی میدانی و آزمایشات شبیه‌سازی بسیار بیشتر از دیگر تکنیک‌های ارزیابی کارایی به چشم می‌خورد، اما مدل‌سازی‌های ریاضی و تحلیل‌های مبتنی بر آن مزایای خود را دارند. در اختیار داشتن یک فرم بسته از بیان یک مسئله یا به عبارت دیگر مدل ریاضی از یک سیستم، راه را برای

طراحان شبکه بسیار هموار خواهد کرد، چرا که بدون نیاز به صرف میزان قابل توجهی از زمان و هزینه برای مطالعات و راه‌اندازی شبیه‌سازی، یک برآورد از کارایی شبکه را در اختیار قرار میدهد.

تاکنون مطالعات بسیار کمی در زمینه مدل‌سازی و ارزیابی و تحلیل کارایی شبکه‌های نرم‌افزار محور و مشخصاً مبتنی بر پروتکل OpenFlow صورت گرفته است. برخی از این مطالعات با بهره‌گیری از تئوری محاسبات شبکه‌ای، یک مدل ریاضی برای یافتن مرزهای کارایی در کنترلرها و سوئیچ‌ها ارائه دادند. مقاله [۳] به بررسی ارتباطات میان یک سوئیچ و یک کنترلر در شبکه OpenFlow پرداخته و توانسته تخمینی از بالاترین حد تاخیر بسته‌ها و اندازه بافر سوئیچ ارائه دهد، سپس در مقاله [۴] به تحلیل رفتار شبکه‌های مقیاس‌پذیر پرداخته شد که توانست حد بالایی از تاخیر بسته‌ها و اندازه طول صف در کنترلرها را در شبکه‌های مقیاس‌پذیر با چند سوئیچ و چند کنترلر به دست آورد.

در کنار این دو مقاله، مطالعات دیگری در زمینه ارزیابی و تحلیل متوسط کارایی شبکه‌های OpenFlow با استفاده از تئوری صف و بر اساس معادلات حالت پایدار صورت گرفته است. مقاله [۵] یک مدل ساده از ارتباط بین کنترلر و سوئیچ ارائه داد که در آن از رویکرد تئوری صف و بر اساس صف $M/M/1$ برای مدل کردن ارتباط میان تنها یک سوئیچ و یک کنترلر استفاده شد تا مدت زمان اقامت و احتمال از دست رفتن بسته‌ها را تخمین بزند؛ همچنین به عنوان گام بعدی در مقاله [۶] بر آن شدند تا این بار با استفاده از شبکه صف چکسون ارتباطات میان چند سوئیچ با یک کنترلر را بر اساس صف $M/M/1$ مدل کنند. در مقاله [۷] با مدل‌سازی صفی با چند ورودی و یک خروجی به ارزیابی تاخیر صف ورودی در کنترلر یا به عبارتی صف درخواست‌های تنظیم جریان در کنترلر پرداخته است اما نتوانست به یک تخمین دقیق از تاخیر صف ورودی کنترلر دست یابد. همچنین مقاله [۸] درخواست‌های تنظیم جریان را در صف ورودی به کنترلر، با فرآیندهای ورود دسته‌ای مدل کرد تا کارایی کنترلر را بر اساس مدل صف $M^K/M/1$ تحلیل کند؛ با این حال فرآیند ورود دسته‌ای نتوانست الگوی درخواست‌های تنظیم جریان را که از چند سوئیچ به یک کنترلر وارد می‌شود، به طور دقیق توصیف کند.

در ادامه مقاله [۹] مدلی بهتر از کارایی شبکه OpenFlow با یک کنترلر ارائه داد که در آن ورود بسته‌ها به سوئیچ‌ها را با $M^K/M/1$ و ورود بسته‌های Pkt-in به کنترلر و سرویس دهی به آن‌ها را بر اساس صف $M/G/1$ مدل کرد و همچنین مدل صفی برای تحلیل کارایی جلورانی بسته‌ها در شبکه OpenFlow ارائه داد. با این وجود مدل صف ارائه شده برای شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر با چند کنترلر قابل استفاده نیست و تنها می‌توان برای تحلیل شبکه OpenFlow با یک کنترلر از آن بهره برد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در زمینه‌ی مدل‌سازی شبکه‌های نرم‌افزار محور، درمی‌یابیم که در اکثر مطالعات، مدل‌های ریاضی ارائه شده بسیار ساده و ابتدایی در نظر گرفته شده‌اند و همچنین قابل استفاده در شبکه‌های نرم‌افزار محور مقیاس‌پذیر با چندین کنترلر توزیع شده نیستند. از آن جای که امروزه مقیاس‌پذیری یکی از نیازهای اساسی در شبکه‌هاست، از این رو در این مقاله سعی داریم تا با مطالعه‌ی رفتار شبکه‌های نرم‌افزار محور مقیاس‌پذیر مبتنی بر OpenFlow و تعمیم مدل ارائه شده برای یک کنترلر

در مقاله [۹]، یک مدل صف دقیق برای تحلیل کارایی جلورانی بسته‌ها در شبکه‌ای مقیاس‌پذیر با چند سوئیچ و چند کنترلر ارائه دهیم.

ادامه‌ی مقاله به ترتیب زیر سازماندهی شده است؛ در بخش ۲ معماری و ساختار شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر و نحوه کارکرد آن‌ها را بررسی می‌کنیم. در بخش ۳ نرخ ورود و زمان پردازش در سوئیچ و کنترلر و همچنین مدل صف هر یک را به طور مجزا بررسی می‌کنیم. در بخش ۴ مدل صفی از جلورانی بسته‌ها در شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر ارائه می‌دهیم و مدت زمان اقامت بسته‌ها در سوئیچ OpenFlow را به دست می‌آوریم. در بخش ۵ به تحلیل‌های عددی و ارزیابی مدل صف بر اساس پارامترهای مختلف کارایی می‌پردازیم و در نهایت در بخش ۶ این مقاله جمع‌بندی می‌شود.

۲- ساختار و معماری شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر

شبکه نرم‌افزار محور با جداسازی سطح کنترل از سطح داده، طراحی و مدیریت شبکه‌های سنتی را به کلی تغییر داد. در این شبکه‌ها اتصال میان دو سطح کنترل و سطح داده از طریق پروتکل ارتباطی OpenFlow محقق می‌گردد، به طوری که از طریق این پروتکل، کنترلر تعدادی از عناصر سطح داده (سوئیچ‌ها) را مدیریت می‌کند. در شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر، برای افزایش توان پاسخ‌گویی به هزاران سوئیچ سریع و قدرتمند و جلوگیری از ایجاد گلوگاه در شبکه، از چند کنترلر توزیع شده استفاده می‌شود که هر کنترلر مسئول پاسخ‌گویی و مدیریت چندین سوئیچ متصل به خود است [۱۰].

در یک شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر تمامی سوئیچ‌ها به صورت مستقیم یا غیر مستقیم به یک کنترلر نرم‌افزار محور متصل شده‌اند. در این شبکه هر کدام از کنترلرها نیز، با برقراری ارتباط با یکدیگر، دید جامعی از توپولوژی کل شبکه دارند. هنگامی که یک بسته، به اولین سوئیچ متصل به کنترلر می‌رسد، سوئیچ مورد نظر شروع به جستجو در جدول جریان‌های خود می‌کند و اگر بسته ورودی با سطر از این جدول منطبق شد، اقدام مناسب را جهت جلورانی یا حذف بسته انجام می‌دهد؛ در غیر این صورت، اگر سطر یافت نشد، به این معنی است که بسته متعلق به یک جریان جدید است و سوئیچ اقدام به فرستادن یک پیغام Pkt-in به کنترلر متصل به خود می‌کند که این پیغام Pkt-in می‌تواند شامل تمام و یا اطلاعاتی از بسته اصلی باشد. سپس کنترلر مربوطه، بر اساس دید جامعی که از توپولوژی کل شبکه دارد، مسیریابی را انجام می‌دهد و قواعد مناسب را تعیین و آن‌ها بر روی تمامی سوئیچ‌های موجود در مسیر جریان مورد نظر نصب می‌کند. از آن پس تمامی بسته‌های متعلق به آن جریان بدون نیاز به فرستادن درخواست به کنترلر، به سمت مقصد هدایت می‌شوند.

در شبکه‌های OpenFlow، جریان‌های جدید، باعث ایجاد توالی از پیغام‌های Pkt-in می‌شود که از سوئیچ‌های مختلف به سمت کنترلرها فرستاده شده‌اند و یک صف انتظار را در کنترلرها تشکیل می‌دهند. این بسته‌ها باید توسط کنترلر پردازش شده و پاسخ مناسب برای آن‌ها در سوئیچ‌های مد نظر نصب گردد. همچنین در ورودی پورت‌های هر سوئیچ نیز، صفی از بسته‌ها ایجاد می‌شود. این بسته‌ها باید بر اساس قوانین موجود در جدول توسط سوئیچ پردازش شوند. بنابراین در این شبکه، دو نوع صف تشکیل

پس از حل صف $M^K/M/1$ با استفاده از فرضیات فوق، فرمول بسته‌ای از متوسط زمان اقامت در سوئیچ (۱) و میانگین طول صف در سوئیچ (۲) به شرح زیر بدست می‌آید که در منابع کلاسیک روش حل موجود است و در اینجا به جزییات آن پرداخته نشده است.

$$\overline{W_{ij}^{(s)}} = \frac{\lambda_{ij}^{(p)} + 1}{2(\mu_{ij}^{(s)} - \lambda_{ij}^{(b)} \lambda_{ij}^{(p)})} \quad (1)$$

$$\overline{L_{ij}^{(s)}} = \frac{\lambda_{ij}^{(b)} \lambda_{ij}^{(p)} (\lambda_{ij}^{(p)} + 1)}{2(\mu_{ij}^{(s)} - \lambda_{ij}^{(b)} \lambda_{ij}^{(p)})} \quad (2)$$

۳-۲- مدل صف در کنترلر

طبق بررسی‌های صورت گرفته در [۹] جریان بسته‌های Pkt-in که از سوئیچ به کنترلر می‌رسند از توزیع پواسون پیروی می‌کنند و زمان پردازش بسته‌های Pkt-in در کنترلر نیز دارای توزیع نرمال است، از این می‌توان یک کنترلر OpenFlow را با صف $M/G/1$ مدل کرد.

با تعمیم توضیحات فوق به یک شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر با چند کنترلر توزیع شده که پیش‌تر راجع به ساختار آن توضیح دادیم، هر کنترلر به تعدادی از سوئیچ‌های موجود در کل شبکه متصل است و مسئول پاسخ‌گویی به جریان پیام‌های Pkt-in فرستاده شده توسط هر یک از این سوئیچ‌های متصل به خود، است. این جریان پیام‌های Pkt-in از سوئیچ i -ام به کنترلر j -ام را با $\lambda_{ij}^{(f)}$ نمایش می‌دهیم که در ادامه، در بخش ۴ به بررسی آن می‌پردازیم. به سادگی می‌توان دریافت که جریان پیام‌های Pkt-in ورودی به هر کنترلر توزیع شده نیز، توزیع پواسون دارد؛ در این صورت نرخ ورود پیام‌های in-Pkt به هر کنترلر برابر $\lambda_j^{(c)}$ است که از رابطه (۳) به دست می‌آید که k_j در این رابطه برابر با تعداد سوئیچ‌های متصل به کنترلر j -ام است.

$$\lambda_j^{(c)} = \sum_{i=1}^{k_j} \lambda_{ij}^{(f)} \quad (3)$$

همچنین بر اساس مقاله [۹]، زمان پردازش پیام‌های Pkt-in در هر کنترلر نیز، از توزیع نرمال با دو پارامتر میانگین $\mu_j^{(c)}$ و انحراف معیار $\sigma_j^{(c)}$ پیروی می‌کند که $\mu_j^{(c)}$ نرخ پردازش بسته‌های Pkt-in در کنترلر است.

حال با حل صف $M/G/1$ ، بر اساس Embedded DTMC، ماتریس احتمالات انتقال تک گام به دست می‌آید که شرح کامل این حل در [۱۱] بیان شده است. اگر فرض کنیم $\rho_j^{(c)}$ ، نسبت نرخ ورود به نرخ خروج یا به عبارتی دیگر بازدهی در هر کنترلر باشد، در صورتی که $\rho_j^{(c)}$ کوچکتر از یک باشد آنگاه زنجیره مارکوف ما ergodic است و از این رو می‌توان با استفاده از تابع مولد، معادلات حال پایدار آن را به دست آورد. حال با استفاده از معادلات حالت پایدار به دست آمده از صف $M/G/1$ ، برای هر کنترلر، متوسط زمان اقامت پیام‌های Pkt-in در کنترلر j -ام، از رابطه (۵) به دست می‌آید.

می‌شود که می‌توان با استفاده از مدل‌های صف به تحلیل و ارزیابی کارایی آن پرداخت که در ادامه شرح داده شده است.

۳- مدل صف در سوئیچ‌ها و کنترلرهای OpenFlow

در این بخش با مدل‌سازی بسته‌های ورودی و پردازش آن‌ها در سوئیچ و کنترلر، زمینه را برای تحلیل کارایی جلورانی بسته‌ها در شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر فراهم می‌آوریم. نمادهای ریاضی بکار رفته برای این مدل‌سازی در جدول ۱ شرح داده شده است.

جدول (۱): نمادهای به کار رفته برای مدل‌سازی

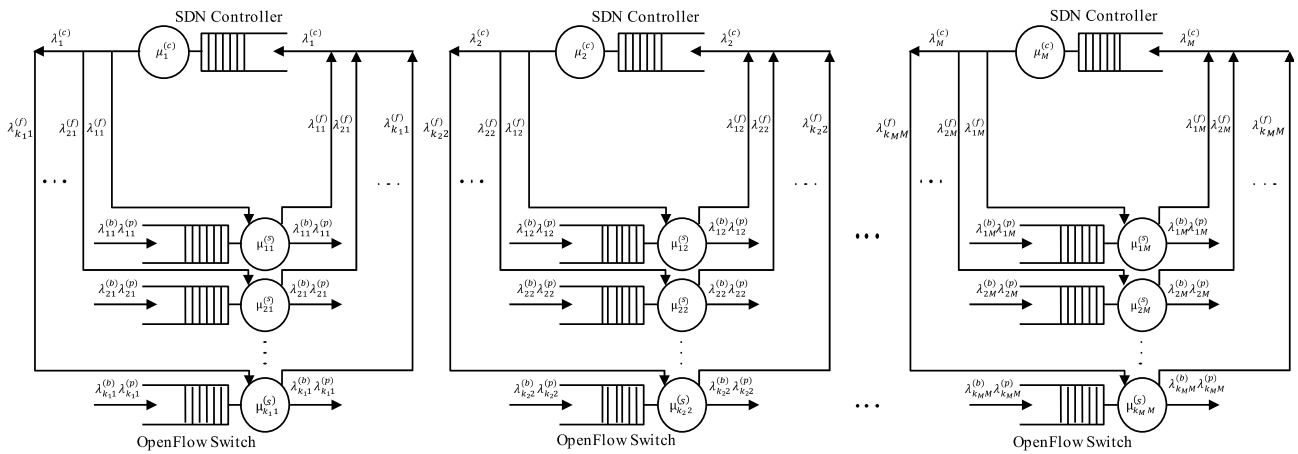
نماد	توضیحات
$\lambda_{ij}^{(b)}$	نرخ ورود دسته‌ها به سوئیچ i -ام متصل به کنترلر j -ام
$\lambda_{ij}^{(p)}$	نرخ تعداد بسته‌ها در هر دسته در سوئیچ i -ام متصل به کنترلر j -ام
$\lambda_{ij}^{(f)}$	نرخ ورود جریان‌های جدید از سوئیچ i -ام به کنترلر j -ام
$\lambda_j^{(c)}$	نرخ ورود مجموع جریان‌های جدید به کنترلر j -ام
$\mu_{ij}^{(s)}$	نرخ سرویس‌دهی در سوئیچ i -ام متصل به کنترلر j -ام
$\mu_j^{(c)}$	نرخ سرویس‌دهی در کنترلر j -ام
k_j	تعداد سوئیچ‌های متصل به کنترلر j -ام
N	تعداد کل سوئیچ‌های موجود در شبکه
M	تعداد کل کنترلرهای موجود در شبکه
$\overline{W_{ij}^{(s)}}$	متوسط زمان اقامت بسته در سوئیچ i -ام متصل به کنترلر j -ام
$\overline{L_{ij}^{(s)}}$	متوسط طول صف در سوئیچ i -ام متصل به کنترلر j -ام
$\rho_j^{(c)}$	بهره‌وری کنترلر j -ام
$\overline{W_j^{(c)}}$	متوسط زمان اقامت بسته در کنترلر j -ام

۳-۱- مدل صف در سوئیچ

بر اساس نتایج به دست آمده از [۹] ترافیک بسته‌ها در شبکه‌های کنونی، به صورت دسته‌ای به سوئیچ‌های شبکه وارد می‌شوند. زمان پردازش بسته‌ها در سوئیچ نیز توزیع نمایی دارد. بنابراین کارایی جلورانی بسته‌ها در سوئیچ OpenFlow می‌تواند با صف $M^K/M/1$ مدل شود.

در شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر نیز می‌توان سوئیچ‌های OpenFlow را با صف $M^K/M/1$ مدل کرد که مشخصات این صف برای سوئیچ i -ام متصل به کنترلر j -ام به شرح زیر است:

- دسته‌ی بسته‌ها به شکل یک جریان پواسون با نرخ $\lambda_{ij}^{(b)}$ به سوئیچ OpenFlow وارد می‌شوند.
- تعداد بسته‌های درون یک دسته نیز از توزیع پواسون با پارامتر $\lambda_{ij}^{(p)}$ پیروی می‌کند.
- زمان پردازش بسته‌ها در سوئیچ OpenFlow از توزیع نمایی با پارامتر $\mu_{ij}^{(s)}$ پیروی می‌کند.



شکل (۱): مدل صف جلورانی بسته‌ها در شبکه OpenFlow مقیاس پذیر

دسته‌ای با نرخ $\lambda_{ij}^{(p)}$ از شبکه دریافت می‌کند؛ هر یک از این بسته‌ها با احتمال q_{ij} متعلق به یک جریان جدید است و سطرهای متناظر با آن در جدول جریان یافت نمی‌شود که این احتمال بسته به نوع و شرایط شبکه انتخاب می‌شود و سوئیچ اقدام به ارسال پیام Pkt-in به کنترلر مربوطه می‌کند که نرخ این ارسال برابر با $\lambda_{ij}^{(f)}$ است.

$$\lambda_{ij}^{(f)} = q_{ij} \lambda_{ij}^{(b)} \lambda_{ij}^{(p)} \quad (۸)$$

هم‌چنین کنترلرها با نرخ پردازش $\mu_j^{(c)}$ ، پیام‌های Pkt-in را با نرخ $\lambda_j^{(c)}$ دریافت می‌کنند.

حال فرض کنید W_{ij} ، مدت زمان جلورانی بسته (مدت زمان اقامت بسته) در سوئیچ i -ام است؛ در این صورت می‌توان گفت که هر بسته، یا متعلق به جریان جدید است و باید درخواستی به کنترلر موردنظر فرستاده شود که در این صورت مدت زمان اقامت بسته با مدت زمان اقامت بسته در سوئیچ و کنترلر برابر خواهد شد؛ و یا بسته متعلق به یک جریان جدید نیست که مدت زمان اقامت بسته با مدت زمان اقامت در سوئیچ برابر است. از این رو می‌توان W_{ij} را به صورت زیر نوشت:

$$W_{ij} = \begin{cases} W_{ij}^{(s)} & \text{with the probability } 1 - q_i \\ W_{ij}^{(s)} + W_j^{(c)} & \text{with the probability } q_i \end{cases} \quad (۹)$$

با در اختیار داشتن احتمال جدید بودن یک جریان و متوسط زمان اقامت بسته‌ها در سوئیچ و کنترلر، می‌توان بر اساس W_{ij} به دست آمده از رابطه (۹)، متوسط مدت زمان اقامت بسته در هر سوئیچ شبکه را محاسبه کرد که برابر با \overline{W}_{ij} است.

$$\begin{aligned} \overline{W}_{ij} &= (1 - q_{ij})E[W_{ij}^{(s)}] + q_{ij}(E[W_{ij}^{(s)}] + E[W_j^{(c)}]) \\ &= \overline{W}_{ij}^{(s)} + q_{ij}\overline{W}^{(c)} \\ &= \frac{\lambda_{ij}^{(p)} + 1}{2(\mu_{ij}^{(s)} - \lambda_{ij}^{(b)}\lambda_{ij}^{(p)})} + q_{ij} \sum_{j=1}^N r_j \left(\frac{1}{\mu_j^{(c)}} + \frac{(\rho_j^{(c)})^2 + (\lambda_j^{(c)})^2 (\sigma_j^{(c)})^2}{2\lambda_j^{(c)}(1 - \rho_j^{(c)})} \right) \end{aligned}$$

$$\rho_j^{(c)} = \frac{\lambda_j^{(c)}}{\mu_j^{(c)}} \quad (۴)$$

$$\overline{W}_j^{(c)} = \frac{1}{\mu_j^{(c)}} + \frac{(\rho_j^{(c)})^2 + (\lambda_j^{(c)})^2 (\sigma_j^{(c)})^2}{2\lambda_j^{(c)}(1 - \rho_j^{(c)})} \quad (۵)$$

از آن جایی که در شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر، هر کنترلر مسئول پاسخ‌گویی به تعدادی از سوئیچ‌های موجود در شبکه است می‌توان احتمال r_j را به این شکل تعریف کرد که، r_j احتمال مراجعه هر سوئیچ به کنترلر j -ام برای پاسخ‌گویی به درخواست‌های تنظیم جریان یا همان پیام‌های Pkt-in است که از رابطه (۶) به دست می‌آید و در این رابطه، N برابر با تعداد کل سوئیچ‌ها است. هم‌چنین با استفاده از رابطه (۵) و (۶)، می‌توان متوسط زمان اقامت پیام‌های Pkt-in در تمامی کنترلرها به دست آورد که در رابطه (۷) نشان داده شده است. در این رابطه، M تعداد کل کنترلرهای موجود در شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر است.

$$r_j = \frac{k_j}{N} \quad (۶)$$

$$\overline{W}^{(c)} = \sum_{j=1}^M r_j \overline{W}_j^{(c)} \quad (۷)$$

۴- مدل صف شبکه OpenFlow مقیاس پذیر

در بخش قبل، مدل صف هر سوئیچ و کنترلر به صورت مجزا شرح داده شد، بر اساس ساختار معماری شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر و نحوه کارکرد آنها، می‌توان مدل صف این شبکه را به دست آورد که در آن ارتباط مابین سوئیچ و تاثیرات متقابل آنها دیده شده است. این ساختار در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.

در این شکل هر کنترلر وظیفه‌ی مدیریت و کنترل چندین سوئیچ را بر عهده دارد. هر سوئیچ OpenFlow با نرخ سرویس‌دهی $\mu_{ij}^{(s)}$ ، بسته‌ها را به صورت

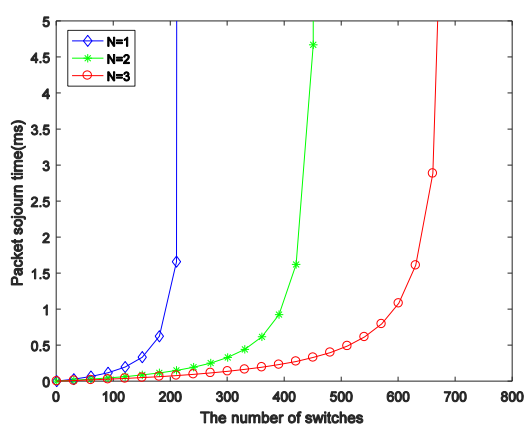
بیشتر را، بدون آن که مدت زمان اقامت بسته‌ها افزایش یابد، میسر نمود و گذردهی شبکه را بالا برد.

۵- ارزیابی کارایی

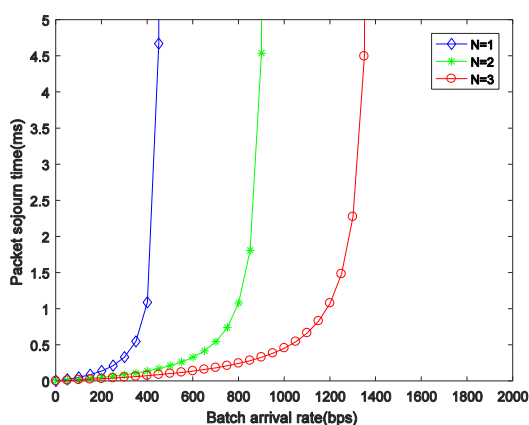
در این بخش ما با تحلیل‌های عددی، مدل صف پیشنهادی برای شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر را ارزیابی کرده و با تغییر پارامترهای مختلف، رفتارهای یک شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر را بررسی می‌کنیم. یک شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر با ۱۲۸ سوئیچ و تعدادی کنترلر، در نظر می‌گیریم به طوری که به هر کنترلر تعداد یکسانی سوئیچ متصل است. هم‌چنین فرض می‌کنیم که هر کنترلر با نرخ پردازش بسته‌ها برابر $\mu_j^{(c)} = 15K$ و انحراف معیار $\sigma_j^{(c)} = 0.28$ نرخ سرویس‌دهی به بسته‌ها در تمامی سوئیچ‌ها برابر با $\mu_{ij}^{(s)} = 32K$ است؛ ترافیک بسته‌ها در شبکه با نرخ دسته‌ای $\lambda_{ij}^{(b)} = 256$ و متوسط تعداد بسته‌های درون هر دسته $\lambda_{ij}^{(p)} = 8$ سوئیچ وارد می‌شوند. هم‌چنین هر بسته با احتمال $q_{ij} = 3^{-5}$ متعلق به یک جریان جدید است و باید به کنترلر فرستاده شود. در نظر داشته باشید که با افزایش تعداد کنترلرها، به علت سربرار هماهنگ‌سازی کنترلرها، نرخ سرویس‌دهی هر کنترلر کاهش پیدا می‌کند.

ابتدا اگر فرض کنیم، نرخ پردازش کنترلر، نرخ سرویس‌دهی به بسته‌ها در سوئیچ و احتمال ورود جریان جدید ثابت است، می‌توانیم مدت اقامت بسته‌ها را با افزایش تعداد سوئیچ‌ها و کنترلرها در شبکه، به دست آوریم. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هنگامی که تعداد کنترلرها در شبکه بیشتر است، متوسط مدت اقامت بسته‌ها در شبکه کمتر است. علاوه بر آن با مشاهده این نمودار می‌توان دریافت، هنگامی که تعداد سوئیچ‌ها در شبکه کمتر از ۱۶۰ است و همگی به یک کنترلر متصل‌اند، مدت اقامت بسته‌ها به آرامی افزایش می‌یابد و سپس هنگامی که تعداد سوئیچ‌ها در شبکه به ۲۰۰ برسد، مدت اقامت بسته‌ها به سمت بی‌نهایت میل می‌کند و این به این معنی است که شبکه دیگر توان پاسخ‌گویی به درخواست‌ها و جلورانی بسته‌ها را نخواهد داشت. اما با افزایش کنترلر در شبکه، می‌توان شبکه‌ای در اختیار داشت که توان پاسخ‌گویی به ۴۰۰ و یا حتی ۶۵۰ سوئیچ را داشته باشد، بدون آن که مدت زمان اقامت بسته‌ها در شبکه افزایش پیدا کند. بنابراین می‌توان با افزایش تعداد کنترلرها در شبکه مقیاس‌پذیری شبکه را افزایش داد.

هم‌چنین اگر مجدداً نرخ پردازش کنترلر، نرخ سرویس‌دهی به بسته‌ها در سوئیچ و احتمال ورود جریان جدید را ثابت در نظر بگیریم، می‌توانیم مدت اقامت بسته‌ها را با افزایش نرخ ورود دسته‌ای، برآورد کرده و هم‌چنین تاثیر افزایش تعداد کنترلرها بر مدت اقامت بسته‌ها را در شکل ۳ مشاهده کنیم. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، هنگامی که در شبکه کنترلرهای بیشتری وجود دارد مدت زمان اقامت بسته‌ها کمتر است. علاوه بر آن، مدت اقامت بسته‌ها هنگامی که تنها یک کنترلر در شبکه وجود دارد، تا قبل از آن که نرخ ورود ترافیک دسته‌ای به حدود ۳۰۰ بسته در ثانیه برسد، به آرامی افزایش یافته و سپس سرعت آن افزایش می‌یابد و در حدود ۴۰۰ بسته در ثانیه تقریباً به بی‌نهایت میل می‌کند؛ به این معنی که شبکه دیگر توان پاسخ‌گویی به درخواست‌ها را نخواهد داشت. اما این اتفاق، هنگامی که ۲ و ۳ کنترلر در شبکه وجود دارد زمانی رخ می‌دهد که نرخ ورود ترافیک دسته‌ای به ترتیب به حدود ۹۰۰ و ۱۳۰۰ بسته در ثانیه برسد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت با افزایش تعداد کنترلرها در شبکه، می‌توان پاسخ‌گویی به دسته‌های



شکل (۲): مدت زمان اقامت بسته‌ها با افزایش تعداد سوئیچ‌ها



شکل (۳): مدت زمان اقامت بسته‌ها با افزایش نرخ ورود دسته‌ها

در شکل ۴، فرض کردیم شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر، این بار ۱۲۸ سوئیچ و ۲ کنترلر دارد. آنگاه در این شکل نیز می‌توان افزایش مدت زمان اقامت بسته‌ها را بر اساس افزایش نرخ ورود دسته‌ای مشاهده کرد، اما برخلاف شکل ۲، این بار می‌توان به تاثیر نرخ پردازش کنترلرها در کاهش مدت زمان اقامت بسته‌ها پی برد و دریافت با افزایش توان پردازش کنترلرها از ۱۵۰۰۰ به ۲۵۰۰۰ می‌توان کارایی شبکه را با ۲ کنترلر، تا به اندازه کارایی شبکه‌ای با ۳ کنترلر که نرخ پردازش هر کدام ۱۵۰۰۰ است، بالا برد.

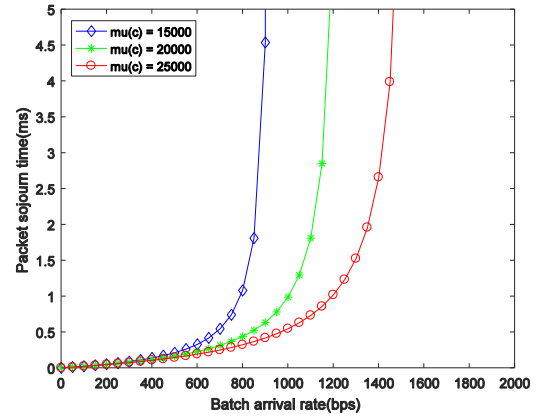
در شکل ۵ نیز به راحتی می‌توان مشاهده کرد، که با افزایش کنترلرها در شبکه حداکثر گذردهی شبکه افزایش خواهد یافت. در این شکل حداکثر گذردهی شبکه برای شبکه‌هایی با ۱ الی ۵ کنترلر به نمایش درآمده است. هم‌چنین تاثیر تعداد سوئیچ‌ها بر روی گذردهی شبکه نیز مشخص شده است و می‌توان دریافت با افزایش تعداد سوئیچ‌ها گذردهی شبکه کاهش و با افزایش کنترلر گذردهی شبکه افزایش خواهد یافت. برای مثال، همانطور که در شکل مشخص است، گذردهی شبکه‌ای با ۱۲۸ سوئیچ و یک کنترلر تقریباً با گذردهی شبکه‌ای با ۵۰۰ سوئیچ و ۵ کنترلر برابر است. این به این معنی است که در صورت افزایش تعداد سوئیچ‌ها در یک شبکه OpenFlow مقیاس‌پذیر می‌توان با افزایش کنترلرها در شبکه، گذردهی شبکه را ثابت نگه داشت.

مشخص کنیم. علاوه بر آن، می‌توانیم با راه‌اندازی یک بنچ‌مارک برای شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر، بستری را به منظور آزمایش و اندازه‌گیری این نوع شبکه‌ها ایجاد کنیم تا درک بهتری از کارایی شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر به دست آوریم.

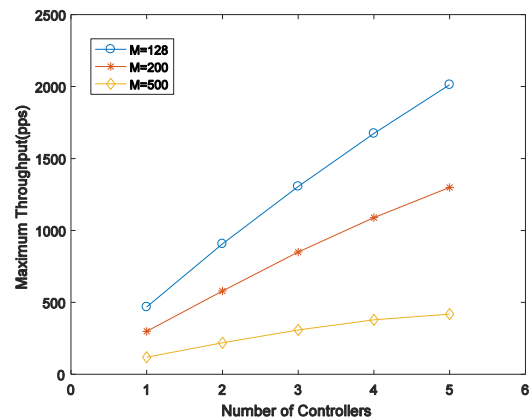
مراجع

- [1] Feamster, N., Rexford, J., Zegura, E., "The road to SDN: an intellectual history of programmable networks", CCR, Vol. 44, No. 2, pp. 87–98, 2014.
- [2] Kreutz, D., Ramos, F. M., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., Uhlig, S., "Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey", Proceedings of the IEEE, Vol. 103, No. 1, pp. 14–76, 2015.
- [3] Azodolmolky, S., Wieder, P., Yahyapour, R., "Performance evaluation of a scalable software-defined networking deployment", In 2013 Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSN), pp. 68–74, 2013.
- [4] Azodolmolky, S., Nejabati, R., Pazouki, M., Wieder, P., "An analytical model for software defined networking: A network calculus-based approach", In 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 1397–1402, 2013.
- [5] Jarschel, M., Oechsner, S., Schlosser, D., Pries, R., Goll, S., Phuoc, T.G., "Modeling and performance evaluation of an openflow architecture", Proceedings of the 23rd International Teletraffic Congress (ITC), pp. 1–7, 2011.
- [6] Mahmood, K., Chilwan, A., Osterbo, O., Jarschel, M., "Modelling of open-flow-based software-defined networks: the multiple node case", IET Networks, Vol. 4, No. 5, pp. 278–284, 2015.
- [7] Zuo, Q., Chen, M., Jiang, P., "Delay evaluation of openflow control plane by queue model", Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition) Vol. 8, No. 1, pp. 44–49, 2013.
- [8] Yao, L., Hong, P., Zhou, W., "Evaluating the controller capacity in software defined networking", In 2014 23rd International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN) IEEE, pp. 1–6, 2014.
- [9] Xiong, B., Yang, K., Zhao, J., Li, W., Li, K., "Performance evaluation of OpenFlow-based software-defined networks based on queueing model", Computer Networks, Vol. 102, pp. 172–185, 2016.
- [10] Krishnaswamy, U., Berde, P., Hart, J., Kobayashi, M., Radoslavov, P., Lindberg, T., Sverdllov, R., Zhang, S., Snow, W., Parulkar, G., "ONOS: An open source distributed SDN OS", 2013, <http://www.slideshare.net/umeshkrishnaswamy/open-network-operating-system>
- [11] Bolch, G., Greiner, S., de Meer, H., Trivedi, K. S., "Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications", John Wiley & Sons, 2006.

¹ Network Calculus



شکل (۴): مدت زمان اقامت بسته‌ها با افزایش تعداد سوئیچ‌ها بر حسب نرخ پردازش کنترلر



شکل (۵): گذردهی شبکه با افزایش تعداد کنترلرها

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با گسترش مدل‌های صف موجود از شبکه‌های نرم‌افزار محور و تعمیم آن‌ها به مدل صفی با چند کنترلر در یک شبکه نرم‌افزار محور، مدل‌سازی و ارزیابی شبکه‌های نرم‌افزار محور مقیاس‌پذیر را بر اساس معادلات حالت پایدار ارائه دادیم؛ چرا که شناخت میزان کارایی و محدودیت‌های این نوع شبکه‌ها، یکی از پیش‌نیازهای مهم برای توسعه و به‌کارگیری آن‌ها به شمار می‌رود. از این رو با استفاده از مدل صف ارائه شده برای شبکه‌های نرم‌افزار محور مقیاس‌پذیر مبتنی بر OpenFlow، می‌توان متوسط مدت زمان اقامت بسته‌ها در یک سوئیچ OpenFlow را که یکی از فاکتورهای مهم کارایی به شمار می‌رود، ارزیابی کرد. هم‌چنین نتایج تحلیل‌های عددی بر روی مدل صف به دست آمده، می‌تواند بسیار مفید باشد؛ چرا که امکان تخمین تعداد کنترلرهای مورد نیاز برای یک شبکه مقیاس‌پذیر را در اختیار قرار می‌دهد؛ و این گونه در مواردی که تعداد سوئیچ‌های شبکه مشخص است و یا در مواردی که میزان گذردهی خاصی را از شبکه مقیاس‌پذیر انتظار داریم، می‌توان با استفاده از این تحلیل‌های عددی، تعداد کنترلر مورد نیاز را در شبکه تعیین کرد.

هم‌چنین در ادامه این پژوهش، قصد داریم به ارائه یک مدل صف از شبکه‌های OpenFlow مقیاس‌پذیر با کنترلرهای سلسله‌مراتبی بپردازیم و بر اساس معادلات حالت پایدار، کارایی و محدودیت‌های این نوع شبکه‌ها را