Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
Volume 13, Number 4, Winter 2025, pp. 1-16
Received: 07/14/2024, Revised: 01/18/2025, Accepted: 02/06/2025

Adaptive Aggregation of IoT Data Packets in Near-Edge Areas in Wide Area Networks

Nader Kazemi[1], Reza Ghaderi[2*] and Soheila Nazari[3]
1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2*- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
[1]n_kazemi@sbu.ac.ir, [2*]r_ghaderi@sbu.ac.ir, and [3]so_nazari@sbu.ac.ir

Corresponding author's address: Reza Ghaderi, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Shahid Shahriari Square, Evin, Tehran, Iran.

Abstract- Our everyday lives will increasingly revolve around the Internet of Things. A lot of little data packets flow in networks as a result of IoT devices frequently contacting required servers and other devices via the Internet. This causes high overhead, inefficient network performance, and a growth in the volume and quantity of packets in network nodes. Numerous packet aggregation strategies have been created or researched in order to address these issues. A few of them deal with IoT packet aggregation in wide area networks, but they don't go into great detail or examine various aggregation strategies. The packet aggregation technique proposed in this paper can choose from a range of useful alternatives that are appropriate for wide-area near-edge software-defined networks. The suggested packet aggregation mechanism avoids the increase in latency brought on by an increase of application layer message types by carrying out aggregation at a lower level than the application layer, utilizing a unique aggregation header, and employing certain suitable techniques, so it has a lower end-to-end delay than related works while maintaining the same level of packet reduction. The proposed mechanism can classify and aggregate packets based on their type, along with features like ToS and algorithms like K-Means, and is capable of adapting to the packets conditions. The suggested mechanism's effectiveness and superiority over previous works of a similar kind are demonstrated by the simulation results for various modes, which take into account the network's traffic from Internet of Things-based smart cities. Not only have simulations been conducted, but essential conversations and comparisons have also been undertaken in this regard.

Keywords- Packet Aggregation, Internet of Things, Software-Defined Networking.

مجله علمی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳ ، صفحه ۱-۱۶
دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

تجمیع انطباقی بسته‌های داده‌ی اینترنت اشیا در ناحیه‌های نزدیک به لبه در شبکه‌های گسترده

نادر کاظمی[۱]، رضا قادری*[۲]، سهیلا نظری[۳]
۱- دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
*۲- دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳- دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
[1]n_kazemi@sbu.ac.ir, [2*]r_ghaderi@sbu.ac.ir, [3]so_nazari@sbu.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: رضا قادری، تهران، اوین، میدان شهید شهریاری، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده‌ی مهندسی برق.

چکیده- اینترنت اشیا به بخشی ضروری از زندگی روزمره‌ی ما تبدیل خواهد شد. به دلیل تماس مکرر دستگاه‌های اینترنت اشیا از طریق اینترنت با یکدیگر و سرورهای لازم، تعداد زیادی بسته‌ی کوچک داده در شبکه‌ها جریان می‌یابد که منجر به سربار بالا، عملکرد ناکارآمد شبکه‌ها و افزایش حجم و تعداد بسته‌ها در گره‌های شبکه‌ها می‌شود. برای رفع این مشکلات، روش‌های تجمیع بسته‌ی متعددی ایجاد شده یا مورد بررسی وتحقیق قرار گرفته است. برخی از آن‌ها در مورد تجمیع بسته‌های اینترنت اشیا در ناحیه‌های شبکه‌های گسترده هستند، اما در این راستا تحقیقات یا بحث‌های زیادی در مورد حالت‌های مختلف تجمیع انجام نداده‌اند. این مطالعه سازوکاری برای تجمیع بسته‌ها را پیشنهاد می‌کند که می‌تواند نوع تجمیع را از میان موردهای کاربردی برای شبکه‌های خودمختار مبتنی بر شبکه‌ی نرم‌افزارمحور نزدیک به لبه در ناحیه‌های شبکه‌های گسترده انتخاب کند و تجمیع را انجام دهد. سازوکار پیشنهادی تجمیع بسته، با انجام تجمیع در سطحی پایه‌ای‌تر از لایه‌ی کاربرد، استفاده از سرآیند تجمیع مختص به خود و به‌کارگیری روش‌های مختلف، از افزایش تأخیر ناشی از افزایش تعداد نوع پیام لایه‌ی کاربرد جلوگیری می‌کند و تأخیر انتها به انتهای بسیار کمتری نسبت به کارهای مشابه دارد، درحالی که کاهش تعداد بسته‌های داده را در همان سطح نگه داشته است؛ این سازوکار امکان دسته‌بندی و تجمیع بر اساس نوع داده و ویژگی‌هایی چون ToS و الگوریتم‌های مختلف ازجمله K-Means را دارد و همچنین می‌تواند به‌صورت انطباقی با شرایط بسته‌های داده عمل کند. نتایج شبیه‌سازی سازوکار پیشنهادی به ازای حالت‌های مختلف، با درنظرگیری ترافیک شهر هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا در شبکه، نشان‌دهنده‌ی کارآمدی آن و نیز برتری نسبت به کارهایی مشابه است. علاوه بر شبیه‌سازی‌ها، بحث‌ها و مقایسه‌های لازم نیز در این راستا صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: تجمیع بسته، اینترنت اشیا، شبکه‌ی نرم‌افزارمحور.

۱- مقدمه

فعالیت‌های روزمره‌ی انسان به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اینترنت اشیا (IoT[۱]) قرار خواهد گرفت. غلبه بر موانع و مسائل مرتبط با اینترنت اشیا و کاربردهای آن، با مشکلات متعددی همراه است [۱]. در گذشته، دستگاه‌هایی که کاربر آن‌ها انسان بود و به‌طور مستقیم توسط وی هدایت می‌شدند، تنها گره‌های انتهایی اینترنت سنتی بودند. در روزگار کنونی، دستگاه‌های اینترنت اشیا نیز به مجموعه‌ی گره‌های پایانی اضافه شده‌اند و این روند با توسعه‌ی آن‌ها ادامه می‌یابد. هنگامی که علاوه بر سیستم‌های کاربرمحور عادی، دستگاه‌های اینترنت اشیا نیز به اینترنت متصل می‌شوند و ارتباطات خود را از طریق آن انجام می‌دهند، طیف گسترده‌ای از انواع ترافیک در سراسر اینترنت جریان می‌یابد، از جمله ارتباطات

انسانی و ارتباطات غیرانسانی مانند داده‌های حسگرهای مختلف و دستورات برای عملگر[۲]ها [۲, ۳].

برای دستگاه‌های اینترنت اشیا که منابع محدودی دارند (محدودیت در حافظه، قدرت پردازش، منبع انرژی یا موارد دیگر) پروتکل‌های سبک‌وزن[۳] متعددی توسعه داده شده‌اند و مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌هایی از این پروتکل‌ها عبارتند از: AMQP[4]، CoAP[5]، MQTT[6] و XMPP[7]. این پروتکل‌ها در لایه‌ی برنامه استفاده می‌شوند و اندازه‌ی پیام را در مقایسه با پروتکل‌های رایج مانند HTTP[8] کاهش می‌دهند. کوچکی اندازه‌ی پیام، منجر به کوچکتر شدن اندازه‌ی بسته‌ی مربوطه و در نتیجه استفاده‌ی کمتراز منابع محدود دستگاه پایانی و توان ارتباطی کمتر در انتقال بسته به شبکه می شود [۴].

هنگامی که این دستگاه‌های IoT از طریق اینترنت با سرورهای مورد نیاز یا با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند، تعداد زیادی بسته‌ی کوچک از طریق شبکه‌ها تبادل می‌شوند [۴-۶]. این موضوع منجر به افزایش تعداد بسته‌ها در واحد زمان می‌شود که می‌تواند باعث مشکلات شبکه‌ها یا عملکرد ناکارآمد آن‌ها گردد. حداکثر bps[9] (حداکثر تعداد بیت بر ثانیه) که به‌عنوان حداکثر گذردهی[۱۰] نیز شناخته می‌شود و حداکثر pps[11] (حداکثر تعداد بسته در ثانیه) برای یک روتر[۱۲] دو پارامتر کلیدی هستند که محدودیت‌های آن را تعیین می‌کنند. افزایش pps روتر و درنتیجه نزدیک‌تر شدن آن به پارامتر حداکثر pps، منجر به کاهش عملکرد روتر می‌شود، حتی اگر bps بالا نرود. به این ترتیب با افزایش تعداد بسته‌ها، بارهای پردازش بسته، مصرف انرژی، تأخیر در پردازش و تلفات بسته افزایش می‌یابد؛ همچنین انتشار تعداد زیادی بسته‌ی کوچک منجر به زیاد شدن تعداد سرآیند[۱۳]ها می‌شود (هر بسته باید یک مجموعه سرآیند داشته باشد) که بخش‌هایی از این سرآیندها مشابه یا تکراری هستند؛ این موضوع به معنای سربار[۱۴] بیشتر، افزونگی[۱۵] سرآیند و استفاده‌ی بیهوده از پهنای باند در شبکه‌ها در مقایسه با تجمیع[۱۶] داده‌های مشابه در بسته‌های بزرگتر و ارسال این بسته‌ها است [۷, ۸].

تجمیع بسته[۱۷]، فرآیند ترکیب بسته‌های داده از چندین بسته‌ی کوچک در یک بسته‌ی بزرگتر با سرآیند(های) مشترک است که مزیت‌های بسیار دارد، ازجمله کاهش سربار در شبکه، bps، pps و بارهای پردازش بسته؛ همچنین تأخیرهای پردازش را کوتاه می‌کند و منجر به استفاده‌ی بهینه از پهنای باند می‌گردد [۵, ۹, ۱۰]. بسته‌های داده باید با روش‌های مناسب تجمیع شوند. برای داده‌ها یا بسته‌های داده‌ی اینترنت اشیا، روش‌ها و الگوریتم‌های تجمیع بسته‌ی متعددی بررسی و پیشنهاد شده است [۴]. تعداد قابل توجهی از این روش‌ها مرتبط با شبکه‌های محلی و شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSN[18]) هستند [۱-۳, ۱۱]. علاوه بر این، تحقیقاتی نیز در مورد تجمیع بسته‌ها در شبکه‌های گسترده (WAN[19]) انجام شده است [۸, ۱۲-۱۴].

تجمیع بسته‌های مبتنی بر اینترنت اشیا در شبکه‌های WAN، به ویژه در ناحیه‌های مه[۲۰] و نزدیک به لبه[۲۱]، موضوع اصلی این مقاله است. مقاله‌ی حاضر که برگرفته از رساله‌ی دکتری رشته‌ی مهندسی برق-الکترونیک دانشگاه شهید بهشتی [۱۵] است، در راستای تکمیل و بهبود کار قبلی نویسندگان این مقاله [۱۶]، موارد کاملاً جدید را درنظر می‌گیرد، ازجمله آستانه‌ی طولی انطباقی با شرایط بسته‌های داده، استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر چون K-Means در دسته‌بندی‌های داده، بررسی اثر ترافیک شهر هوشمند و تحلیل‌های نوین‌تر.

سازوکار پیشنهادی مبتنی بر SDN است تا انعطاف‌پذیری لازم را در جهت مدیریت شبکه و تصمیم‌گیری‌های مورد نیاز برای تجمیع داشته باشد و همچنین امکان انتخاب چند نوع تجمیع را دارد که چند مورد به دسته‌بندی‌های از قبل انجام‌شده‌ی داده‌ها (پیام‌ها) بر اساس پارامترهای مرتبط منجر می‌شوند و این خود می‌تواند منجر به کاهش پردازش‌های لازم جهت دسته‌بندی داده‌ها در سرورهای برنامه‌ها در بحث رایانش ابری یا مینی‌سرورهای برنامه‌ها در شبکه‌های نزدیک به لبه در بحث رایانش مِه شود. این سازوکار امکان دسته‌بندی و تجمیع بر اساس نوع داده و ویژگی‌هایی چون ToS[22] و الگوریتم‌های مختلف ازجمله K-Means را دارد، می‌تواند به‌صورت انطباقی با شرایط بسته‌های داده عمل کند، از سرآیند تجمیع مختص به خود بهره می‌گیرد و از روش‌های مختلفی استفاده می‌کند و به این ترتیب از افزایش تأخیر ناشی از افزایش تعداد نوع پیام لایه‌ی کاربرد جلوگیری می‌کند و تأخیر انتها به انتهای بسیار کمتری نسبت به کارهای مشابه دارد، درحالی که کاهش تعداد بسته‌های داده را در همان سطح نگه داشته است و برای ترافیک بسته‌های داده‌ی شهر هوشمند تا بیش از ۷۰٪ در تعداد بسته‌های داده صرفه‌جویی به همراه می‌آورد.

ساختار این سند در ادامه به این شرح است: مروری بر کارهای پیشین در بخش ۲ ارائه شده است. زمینه‌ای در مورد تجمیع بسته‌ها، شبکه‌های نرم‌افزارمحور (SDN[23]) و موارد پایه‌ای مرتبط دیگر در بخش ۳ ارائه شده است. شبکه‌ها و ناحیه‌های ممکن برای تجمیع بسته‌ها در بخش ۴ ذکر شده است. سازوکار[۲۴] تجمیع بسته‌ی پیشنهادی در بخش ۵ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی سازوکار تجمیع بسته‌ی پیشنهادی و روش‌های مرتبط در بخش ۶ نشان داده شده و بررسی و مقایسه شده‌اند. در نهایت در بخش ۷

نتیجه‌گیری‌های لازم صورت گرفته است.

۲- مرور کارهای پیشین

کارهای تحقیقاتی متعددی در مورد تجمیع بسته‌ها در حوزه‌ها و کاربردهای مختلف انجام شده است. به‌عنوان مثال، تعداد زیادی بسته‌ی VoIP[25] کوچک را می‌توان برای ایجاد یک بسته‌ی بزرگتر ترکیب کرد و در شبکه ارسال نمود، که این امر سربار را کاهش و کارایی شبکه را افزایش می‌دهد. با این حال، محدودیت‌هایی ازجمله در مورد تأخیر وجود دارد، مانند حداکثر تأخیر ۱۵۰ میلی‌ثانیه بین طرف‌های کاربر برای ارسال و دریافت صدا [۹].

کاربردهای مرتبط با اینترنت اشیا زیرمجموعه‌ی دیگری به‌عنوان هدفی مهم برای تجمیع بسته‌ها هستند. بخش زیادی از مطالعات در مورد تجمیع بسته‌های اینترنت اشیا بر روی WSNهای مبتنی بر اینترنت اشیا متمرکز شده است. در این راستا لازم به توضیح است که به‌منظور فراهم نمودن ارتباطات در مقیاس بزرگتر، شبکه‌های محلی و WSNها می‌توانند به جای کارکرد ایزوله به شبکه‌های WAN اینترنت متصل شوند با ناحیه‌های دیگر از جمله انواع سرورها نیز تبادل داده نمایند که این امر نمونه‌ای از حوزه‌ی اینترنت اشیا محسوب می‌شود. چندین دروازه[۲۶] یا گره‌ی سینک[۲۷] ممکن است در یک WSN مبتنی بر اینترنت اشیا وجود داشته باشد [۱۷]. قدرت و منابع (پردازش، حافظه، انرژی و موارد دیگر) گره‌های WSN محدود است. در یک شبکه‌ی حسگر بی‌سیم، تجمیع بسته‌ها سربار و تعداد بسته‌های ارسال شده را کاهش می‌دهد و منجر به کاهش مصرف انرژی انتقال و پردازش بسته می‌گردد [۷] و این امر خود باعث افزایش طول عمر[۲۸] شبکه می‌شود [۲].

زمینه‌های دیگر برای تجمیع بسته‌ها شامل شبکه‌های مرکز داده[۲۹]، روترهای لبه، روترهای هسته[۳۰]، گره‌های مه (در محاسبات مه) و موارد دیگر است [۴].

مروری بر تحقیقات تجمیع بسته‌ی مرتبط با اینترنت اشیا در ادامه ارائه شده است:

A-MSDU[31] و A-MPDU[32] دو نوع تجمیع فریم[۳۳] هستند که در IEEE 802.11n استفاده می‌شوند. A-MSDU چندین MSDU[34] را به‌عنوان payloadی بزرگ از یک PSDU[35] تجمیع می‌کند. در A-MPDU با تجمیع چندین MPDU[36] یک PSDU بزرگ ایجاد می‌شود [۱۸, ۱۹].

در [۹] روشی جهت تجمیع بسته برای شبکه‌های بی‌سیم معرفی شده که برای VoIP و برخی از کاربردهای بی‌درنگ[۳۷] مناسب و بهینه است. بسته‌هایی که دارای گره‌ی پرش بعدی[۳۸] یکسان هستند، قبل از ارسال به لایه‌های پیوند داده[۳۹] و فیزیکی[۴۰]، تجمیع می‌شوند. هر بسته‌ی تجمیع‌شده دارای یک سرآیند ۱۱ بایتی است که از طول ۲۰ بایت سرآیند IPv4 کمتر است. بسته‌های تجمیع‌شده یک سرآیند IPv4 را به اشتراک می‌گذارند. هر بسته‌ی کوچک همواره مورد بررسی قرار گرفته تا مشخص شود چه مدت در صف نگه داشته شده است. بسته‌ی تجمیعی بزرگ با فراتر رفتن زمان نگهداری قدیمی‌ترین زیربسته‌ی سازنده‌ی خود از یک آستانه‌ی زمانی[۴۱] از پیش تعیین شده، فوراً به گره‌ی بعدی ارسال می‌شود. نویسندگان [۱۹] یک روش تجمیع بسته برای شبکه‌های مش بی‌سیم (WMN[42]) ارائه داده‌اند. این روش را می‌توان با الگوریتم‌های مسیریابی چندمسیری استفاده کرد. روش یادشده عملکرد شبکه را از دیدگاه گذردهی و تأخیر بهبود می‌بخشد.

در [۱۷] فرمول‌بندی‌ها و الگوریتم‌هایی جهت تجمیع و انتشار داده‌ها برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر اینترنت اشیا معرفی شده‌اند که جهت بهینه‌سازی شبکه برای حداکثر گذردهی، حداکثر طول عمر یا کمترین مصرف کل انرژی مناسب هستند. فرض شده که WSN دارای چندین گره‌ی عملگر، گره‌های تجمیع‌کننده، گره‌های حسگر (منبع داده‌ها) و چندین دروازه یا گره‌ی مه باشد که در این میان عملگرها و دروازه‌ها/گره‌های مه مقصدهای داده‌ها هستند. نویسندگان [۲۰] رویکردی جهت تجمیع داده‌ها برای WSNها ارائه داده‌اند که مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، طول عمر شبکه را افزایش می‌دهد و تأخیر را به حداقل می‌رساند. این کار به‌منظور درنظر گرفتن تجمیع داده‌ها با الزامات مختلف کیفیت خدمات (QoS[43])، از پارامترهای آستانه‌ی زمانی و آستانه‌ی طولی[۴۴] مناسب بهره می‌برد. در [۲۱]، طرحی مبتنی بر اولویت جهت تجمیع داده‌ها و دسترسی به کانال برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر اینترنت اشیای صنعتی ارائه شده است. طرح یادشده در سرخوشه[۴۵]های شبکه‌ی خوشه‌بندی‌شده[۴۶] اجرا می‌شود. هم بسته‌ها در شبکه و هم صف‌های تجمیع در سرخوشه‌ها بر اساس اولویت به دسته‌هایی تفکیک می‌شوند. این طرح با استفاده از فرآیندهای مناسب، تأخیر را کاهش و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهد.

در [۲۲]، روشی جهت تجمیع داده‌ی مبتنی بر پیش‌بینی[۴۷] زمانی برای WSNها پیشنهاد شده است. این روش عمر شبکه را افزایش، افزونگی داده‌ها را تشخیص و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. نویسندگان [۱۰] یک روش تجمیع داده‌ی انطباقی برای WSNها ارائه داده‌اند که تأخیر را کاهش می‌دهد و طول عمر و کارایی انرژی شبکه را افزایش می‌دهد. این روش بر پایه‌ی آستانه‌های

طولی و زمانی پویا استوار است. در این روش مقادیر آستانه‌های طولی و زمانی برای گره‌های نزدیک‌تر به سینک بیشتر از گره‌های دورتر از سینک است. به این ترتیب هم تأخیر و هم مصرف انرژی کاهش می‌یابد. در [۲۳]، یک سازوکار تجمیع داده برای WSNهای مبتنی بر اینترنت اشیا ارائه شده است. این الگوریتم مبتنی بر خوشه‌بندی[۴۸] است و از نظر زمان تجمیع، متوسط تأخیر و تأخیر انتها به انتها[۴۹]، عملکرد بهتری نسبت به روش سنتی تجمیع داده‌ی مبتنی بر خوشه‌بندی دارد. در [۲۴]، یک الگوریتم تجمیع داده‌ی مبتنی بر حفظ حریم خصوصی[۵۰] برای WSNها ارائه شده که حریم خصوصی گره را بهبود می‌بخشد و در عین حال ترافیک داده‌ی شبکه را کاهش می‌دهد. الگوریتم یادشده مبتنی بر خوشه‌بندی است و الگوریتمی امن است.

در [۸] طرحی جهت تجمیع بسته برای شبکه‌های گسترده منتشر شده که بارهای پردازشی بسته‌ها و مصرف توان شبکه را کاهش می‌دهد. روش‌هایی جهت تجمیع و تفکیک[۵۱] بسته‌ها در [۵] معرفی شده‌اند که در آن‌ها سوییچ‌های P4[52] SDN بسته‌ها را به‌جای سطح کنترل[۵۳]، به‌طور کامل در سطح هدایت داده[۵۴] تجمیع می‌کنند. نویسندگان مقاله با انجام این کار توانستند تجمیع و تفکیک بسته‌ها را بسیار سریع‌تر از روش‌های مبتنی بر CPU، که در سطح کنترل محسوب می‌شود، انجام دهند. نویسندگان [۲۵] روشی برای تجمیع داده‌های اینترنت اشیا در یک شبکه‌ی مبتنی بر SDN ارائه داده‌اند. در این کار روند تجمیع در سوییچ‌های P4 و در سطح هدایت داده انجام می‌شود. نوع الگوریتم تجمیع و کنترل آن توسط کنترل‌کننده‌ی SDN مدیریت می‌شود. معماری شبکه[۵۵]، ساختار بسته و پشته‌ی شبکه[۵۶] برای پروتکل پیشنهادی در مقاله‌ی یادشده ارائه شده است. نویسندگان [۶] برای سوییچ‌های P4 SDN، طرحی جهت تجمیع و تفکیک بسته‌ها پیشنهاد کرده‌اند که برای داده‌های حسگرهای مبتنی بر IoT مناسب است. آن‌ها به سرعت بالای ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه برای تجمیع داده‌ها دست یافتند که برابر با نرخ خط سوییچ P4 در آزمایش مرتبط است. در [۲۶] سازوکاری جهت تجمیع/تفکیک بسته در سوییچ‌های P4 SDN پیشنهاد شده است که برای تجمیع بسته‌ها با اندازه‌های بار مختلف مناسب است. فرآیند تجمیع در این کار نیز در سطح هدایت داده انجام می‌شود و در مجموع به سرعت ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه دست می‌یابد.

تحقیقاتی نیز در رابطه با تجمیع داده‌های IoT همراه با حفظ حریم خصوصی در لبه‌های شبکه و ناحیه‌های مه انجام شده است که حالتی از رایانش مه[۵۷] محسوب می‌شود. این طرح‌ها و الگوریتم‌ها داده‌ها را با توجه به نوع کاربرد[۵۸] (نوع برنامه) با روش‌های مناسب به‌صورت امن و با حفظ حریم خصوصی در گره‌های مه، از جمله سرورهای محلی، تجمیع می‌کنند. این روش‌ها کارایی شبکه را بهبود می‌بخشند، نیازهای پردازشی روی سرورهای اصلی مربوطه را کاهش می‌دهند و ویژگی‌های حریم خصوصی و امنیتی را در ارتباطات ارتقا می‌دهند.

نویسندگان [۲۷] روشی کم وزن جهت تجمیع داده‌ها ارائه داده‌اند که از حریم خصوصی محافظت می‌کند و برای محاسبات مه در ناحیه‌های مه مناسب است. این سازوکار امنیت را افزایش می‌دهد، تجمیع داده‌های دستگاه‌های اینترنت اشیا را پشتیبانی می‌کند و توانایی فیلتر کردن داده‌های جعلی که در لبه‌ی شبکه تزریق می‌شوند را دارد. نویسندگان [۲۸] طرحی جهت تجمیع داده‌های IoT مبتنی بر مه پیشنهاد داده‌اند که قابل اطمینان است و حریم خصوصی را حفظ می‌کند و برای انجام تجمیع انواع داده‌های برنامه‌های انتخابی مناسب است. این طرح از نظر هزینه‌های محاسباتی و سربارهای ارتباطی بهینه است. در [۲۹] یک معماری بی‌درنگ تجمیع داده‌های IoT ارائه شده است. این طرح شامل سازوکارهای قوی برای حفظ حریم خصوصی است، انطباقی است و بر اساس معماری رایانش مه ساخته شده است. در [۳۰] روشی امن و محافظ حریم خصوصی جهت تجمیع داده‌های شبکه‌ی هوشمند ارائه شده است که اساس آن رایانش مه است. این کار کم هزینه، مقاوم به خطا و مقاوم در برابر حملات تزریق داده‌های جعلی است.

در مقاله [۳۱] از تجمیع بسته‌های داده در کنار انطباق برش‌های زمانی[۵۹] با مقدار فعلی توزیع اندازه‌ی بسته به‌منظور افزایش بازدهی استفاده از برش‌های زمانی در IEEE 802.15.4e استفاده شده است. روش تجمیع بسته در این کار می‌تواند به‌صورت مستقل از روش انطباق برش‌های زمانی عمل کند و باعث می‌شود چند بسته‌ی داده به‌صورت یکجا در یک برش زمانی منتقل شوند.

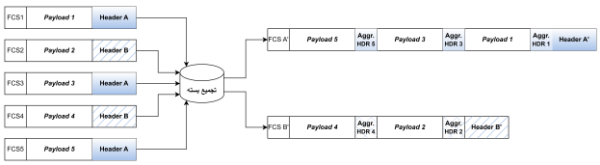
نویسندگان [۳۲] روشی برای تجمیع داده‌های گره‌های انتهایی حسگری در یک شبکه‌ی LoRaWAN ارائه داده‌اند که سریع و دقیق است و در این راستا از chirpهای متمایز برای گره‌های انتهایی مختلف و رمزگذاری متناسب جهت فراهم نمودن امکان ارتباط همزمان و مجزای چند گره با یک دروازه بهره می‌گیرد.

برای افزایش بازدهی شبکه‌ها، علاوه بر تجمیع بسته‌های داده، روش‌های متعددی چون فشرده‌سازی داده‌ها نیز در کارهای متعددی انجام شده است. از جمله نویسندگان [۳۳] روشی مؤثر جهت فشرده‌سازی داده‌های WBAN[60] ارائه داده‌اند که با داده‌های مختلف حسگرها سازگاری دارد، برای سیگنال‌های تکرارشونده‌ی

آن‌ها مناسب است، دقت پیش‌بینی کافی دارد و مصرف انرژی را به‌شدت کاهش می‌دهد. این روش از چهار مرحله‌ی مهم تشکیل شده است: ایجاد و تطابق شبکه‌ی LSTM[61] جهت سازگاری با گره‌های سنسوری، پیش‌بینی با استفاده از LSTM جهت دستیابی به دقت بالا، محاسبه‌ی خطا جهت کاهش حجم داده و در نهایت فشرده‌سازی با RLE[62] جهت کاهش بیشتر حجم داده و کاهش مصرف انرژی.

۳- مبانی

بسته‌های داده بر اساس ویژگی‌های مشترک، همچون مشابهت در همه یا بخشی از سرآیندهای لایه‌ی پیوند و لایه‌ی شبکه یا موارد دیگر، در صف‌های تجمیع مختلفی قرار گرفته و با یکدیگر تجمیع می‌شوند. در این مورد، همه‌ی بسته‌های ترکیب‌شده در بسته‌ی تجمیعی بزرگ‌تر، یک مجموعه‌ی واحد از سرآیندهای مشابه را به اشتراک می‌گذارند. همچنین، به هر بسته‌ای که در بسته‌ی تجمیعی بزرگ‌تر ترکیب شده، اکنون به‌جای سرآیند قبلی خود، سرآیند کوچک‌تری به نام "سرآیند تجمیع[۶۳]" اختصاص داده می‌شود [۹, ۳۴, ۳۵]. تجمیع بسته‌ها با کاهش اندازه و سربار بسته‌ها، تعداد بسته‌های ارسالی و فواصل زمانی بین ارسال آن‌ها، کارایی شبکه را بهبود می‌بخشد. نمونه‌ای از تجمیع بسته‌ها را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد.



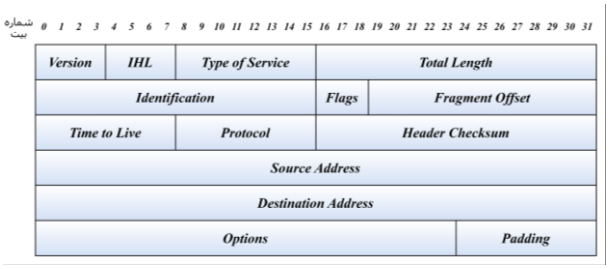
شکل ۱: نمونه‌ای از تجمیع بسته‌های داده.

مدل OSI[64] دارای لایه‌های متعددی است که می‌توان در سطح آن‌ها تجمیع بسته‌ها را اجرا کرد. یک گزینه‌ی مناسب، لایه‌ای مفهومی است که بین لایه‌های پیوند داده و شبکه (لایه‌های ۲ و ۳) قرار می‌گیرد و می‌توان به‌عنوان لایه‌ی ۲/۵ از آن یاد کرد [۱۹]. فرآیندهای لایه‌ی ۲/۵ می‌توانند بسته‌های منتقل‌شده از لایه‌ی شبکه به لایه‌ی پیوند داده را تجمیع کنند و در صورت لزوم بسته‌های منتقل شده از لایه‌ی پیوند داده به لایه‌ی شبکه را تفکیک نمایند [۱۹].

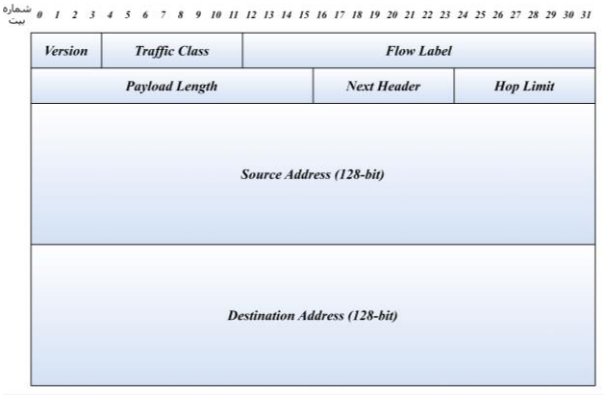
در مورد تجمیع بسته‌ها، می‌توان به دو نکته در این‌جا اشاره کرد: ۱- روشی برای تمایز بین بسته‌های تجمیعی و غیر تجمیعی (عادی) باید وجود داشته باشد [۹, ۳۴]؛ ۲- بسته‌های خاص، مانند بسته‌های برنامه‌های بی‌درنگ، نمی‌توانند در فرآیند تجمیع شرکت کنند و باید به نحوی بتوان این بسته‌ها را شناسایی نمود [۸]. مشکلات ذکرشده را می‌توان با استفاده از فیلد[۶۵]های خاصی از سرآیند IP[66] حل نمود.

فیلد "Protocol" در سرآیند IPv4 حاوی اطلاعاتی در مورد نوع محموله[۶۷]ی دیتاگرام[۶۸] IP، مانند TCP[69] یا UDP[70] است [۳۶, ۳۷]؛ "Next header" نیز فیلدی در سرآیند IPv6 برای همین منظور است [۳۶, ۳۸]. به‌منظور حل مشکل اول، اگر IPv4 به‌عنوان پروتکل لایه‌ی شبکه استفاده می‌شود، می‌توان از فیلد "Protocol" برای یافتن یک بسته‌ی تجمیعی استفاده کرد [۹, ۳۴]؛ اگر از IPv6 استفاده می‌شود، می‌توان از فیلد " Next header" برای این منظور استفاده نمود.

ترافیک شبکه با استفاده از فیلد "Type of Service" در سرآیند IPv4 یا فیلد "Traffic Class" در سرآیند IPv6 [۳۶-۳۸] طبقه‌بندی می‌شود. یکی از کاربردهای این طبقه‌بندی، شناسایی داده‌های مربوط به کاربردهای بی‌درنگ است؛ به این ترتیب با شناسایی و شرکت ندادن بسته‌های مربوط به کاربردهای بی‌درنگ در تجمیع، مشکل دوم حل می‌شود [۳۵]. سرآیندهای IPv4 و IPv6 به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲: سرآیند IPv4.



شکل ۳: سرآیند IPv6.

دو پارامتر مهم در تجمیع بسته، حداکثر اندازه (آستانه‌ی اندازه[۷۱]/ آستانه‌ی طولی) و حداکثر زمان (آستانه زمانی) هستند که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد فرآیند تجمیع دارند و معمولاً در کارهای متعددی استفاده می‌شوند. بسته‌های شرکت‌کننده در تجمیع بر اساس طبقه‌بندی مبتنی بر شباهت‌های از پیش تعیین‌شده، در بافرها ذخیره شده و در صف‌های مربوطه قرار می‌گیرند. هنگامی که اندازه‌ی یک صف بیشتر از حداکثر اندازه (آستانه‌ی اندازه/ آستانه‌ی طولی) می‌شود، بسته‌های درون صف با الگوریتم مناسب تجمیع شده و بسته‌ی تجمیعی در شبکه ارسال می‌شود. هنگامی که زمان نگهداری[۷۲] صف، یعنی زمان نگهداری اولین بسته‌ای که به صف وارد شده، از حداکثر زمان (آستانه‌ی زمانی) فراتر رود، بسته‌های درون صف با الگوریتم مناسب تجمیع شده و بسته‌ی تجمیعی در شبکه ارسال می‌شود. علاوه بر این، سازوکارهای ترکیبی[۷۳] تجمیع بسته وجود دارد که هر دو جنبه‌ی سازوکارهای تجمیع مبتنی بر آستانه‌های طولی و زمانی را در خود دارد [۱۰, ۱۲-۱۶, ۲۰].

یکی از فناوری‌هایی که به‌سرعت در حال گسترش است و مدیریت مؤثرتری را برای شبکه ارائه می‌دهد، شبکه‌های نرم‌افزارمحور یا SDN است. در شبکه‌های SDN بر خلاف شبکه‌های سنتی، سطح هدایت (سطح داده) از سطح کنترل مجزا است و دیگر بر روی یک گره قرار ندارند. در شبکه‌های SDN، هر گره یک سوییچ خاص SDN است که صرفاً بسته‌های داده را هدایت می‌کند و عملیاتی چون مسیریابی یا موارد کنترلی دیگر را انجام نمی‌دهد؛ در این شبکه‌ها یک کنترل‌کننده‌ی مرکزی وظایف کنترلی چون مدیریت شبکه و مسیریابی داده‌ها را انجام می‌دهد. برای این منظور، کنترل‌کننده از اتصالات TCP امن برای برقراری ارتباط با سوییچ‌ها جهت ارسال دستورات به سوییچ‌ها و دریافت داده‌های آماری از آن‌ها (درصورت نیاز) استفاده می‌کند [۳۹-۴۱]. کیفیت و کارایی انتقال داده‌ها بین کنترل‌کننده و سوییچ‌ها زمانی بهبود می‌یابد که کنترل‌کننده در نزدیکی آن‌ها قرار گیرد.

ساختار شبکه‌های SDN از سه لایه تشکیل شده است:

- لایه‌ی کاربرد (برنامه‌های شبکه/خدمات) در بالا
- لایه‌ی کنترل (کنترل‌کننده‌ی SDN) در میانه
- لایه‌ی زیرساخت[۷۴] (سوییچ‌های SDN) در پایین

در شبکه‌های SDN، از پروتکل‌های واسط جنوبی[۷۵]، مانند OpenFlow [۴۱]، برای تسهیل ارتباط بین لایه‌های کنترل و زیرساخت استفاده می‌شود. در این راستا، کنترل‌کننده از جدول‌های جریان[۷۶] برای دریافت داده‌های آماری از سوییچ‌ها یا انتقال دستورالعمل‌ها به سوییچ‌ها استفاده می‌کند. هنگامی که سوییچ‌ها جدول‌های جریان جدیدی را دریافت می‌کنند، سوابق خود را از آن‌ها به‌روز می‌کنند؛ سوییچ‌های SDN بر اساس تطابقات ویژگی‌های بسته‌ها با این رکوردها، بسته‌های داده را هدایت می‌کنند یا عملیات لازم را انجام می‌دهند؛ به‌عنوان مثال ممکن است بسته را برداشت کنند، آن را تغییر دهند، آن را به کنترل‌کننده منتقل کنند، آن را رها کنند، آن را به یک درگاه خروجی ارسال کنند و مواردی دیگر. ازجمله ویژگی‌هایی که جهت تطبیق ممکن است مورد توجه باشند عبارتند از درگاه ورودی، آدرس‌های IP مبدأ و مقصد، پورت‌های TCP مبدأ و مقصد، فیلد "Protocol" در سرآیند IP و سایر تطابق‌های احتمالی دیگر [۷, ۴۰, ۴۲].

تجمیع بسته‌ها را می‌توان از طریق شبکه‌های SDN نیز مدیریت کرد. در این سناریو، روش‌های متعددی وجود دارد که سوییچ‌های SDN می‌توانند بسته‌ها را تجمیع کنند. کنترل‌کننده‌ی SDN، به‌منظور تعیین نوع تجمیع و تعیین گره‌هایی از شبکه که باید بسته‌ها را تجمیع یا تفکیک کنند، دستورات مورد نیاز را به سوییچ‌ها صادر می‌کند. برای پشتیبانی از فرآیندها و عملیات تجمیع بسته‌ها، برنامه‌های کنترل‌کننده باید بر اساس آن‌ها به‌روز شوند [۵-۷, ۲۵]. علاوه بر این، برای انجام فعالیت‌های تجمیع بسته‌ها، سوییچ‌های SDN باید علاوه بر به‌روزرسانی‌های نرم‌افزاری، به سخت‌افزار مورد نیاز نیز مجهز شوند که می‌تواند هزینه‌های بالاتری نسبت به سوییچ‌های SDN استاندارد داشته باشد. دراین راستا، سوییچ‌های P4 SDN می‌توانند برای کاهش هزینه‌ها و در عین حال بهبود انعطاف‌پذیری و کارایی شبکه مورد استفاده قرار گیرند. پیکربندی و عملکرد سوییچ‌های P4 از طریق زبان P4 تنظیم می‌شوند که برای ارسال داده‌های شبکه طراحی و بهینه شده است [۵, ۶, ۲۵, ۲۶].

مدت زمان انتقال یک بسته در یک لینک از گره‌ای به گره‌ی بعدی به‌صورت معادله‌ی (۱) است که در آن d مدت زمان انتقال، L_H مجموع اندازه‌ی سرآیندهای بسته تا لایه‌ای که قرار است تجمیع تا آن سطح انجام شود، L_P اندازه‌ی محموله‌ی داده برای سرآیندهای یادشده و r نرخ انتقال است.

$$d = \frac{L_P + L_H}{r} \qquad (۱)$$

بر اساس معادله‌ی (۱) و فرض فاصله‌ی زمانی g بین انتقال هر بسته با بسته‌ی بعدی، مدت زمان انتقال N بسته‌ی داده به‌صورت

جداگانه، به‌صورت معادله‌ی (۲) می‌شود.

$$D_N = \sum_{n=1}^{N} d_n + (N-1)g = N(\frac{L_P + L_H}{r}) + G \qquad (۲)$$

در معادله‌ی (۲)، G مجموع فاصله‌های زمانی بین ارسال بسته‌ها است. اگر فرض شود در فرآیند تجمیع، برای هر بسته به جای مجموعه‌ی سرآیندهای یادشده، یک سرآیند تجمیع با طول L_A با شرط $L_A<L_H$ درنظر گرفته و به همراه محموله‌ی داده‌ی آن بسته، در بسته‌ی تجمیعی بزرگ‌تر قرار داده شود و همچنین یک مجموعه سرآیند مشترک برای همه‌ی بسته‌ها با همان طول L_H به‌عنوان مجموعه سرآیند اصلی بسته‌ی تجمیعی درنظر گرفته شود، مدت زمان انتقال بسته‌ی داده‌ی تجمیع‌شده از N بسته، به‌صورت معادله‌ی (۳) است.

$$D_{aggr} = \frac{N(L_P + L_A) + L_H}{r} \qquad (۳)$$

با مقایسه‌ی معادلات (۲) و (۳) و با فرض بدترین شرایط از جمله نزدیک بودن L_A به L_H، می‌توان به معادله‌ی (۴) جهت نشان دادن شرایطی که تجمیع بسته بهبود به همراه دارد، رسید.

$$D_{aggr} < D_N \overset{L_A<L_H}{\Longrightarrow} (N-1)g > L_H/r \qquad (۴)$$

معادله‌ی (۴) نشان می‌دهد که از آستانه‌ای به بالا برای مقدار N، بهبود قطعی است و هرچه مقدار N بیشتر باشد، فاصله‌ی (N-1)g از L_H/r بیشتر شده و میزان بهبود افزایش می‌یابد.

حجم صرفه‌جویی‌شده در تجمیع به قواعد تجمیع و پروتکل‌های مورد استفاده برای لایه‌ها بستگی دارد. به‌عنوان یک نمونه با فرض موارد زیر، مقدار صرفه‌جویی حجمی حاصل در انتقال چند بسته از گره‌ای به گره‌ی بعدی به‌صورت تجمیع‌شده، به‌صورت معادله‌ی (۵) است:

• در فرآیند تجمیع به جای سرآیندهای لایه‌های ۱ تا ۳ بسته‌ها یک سرآیند تجمیع برای هریک، به‌همراه محموله‌ی داده‌ی آن بسته، در بسته‌ی تجمیعی بزرگ‌تر قرار گیرد.

• مجموع حجم سرآیندهای لایه‌های ۱ تا ۳ برابر L_H باشد.

• یک مجموعه سرآیند مشترک برای همه‌ی بسته‌ها با طول L_H به‌عنوان مجموعه سرآیند لایه‌های ۱ تا ۳ بسته‌ی تجمیعی درنظر گرفته شود.

• حجم هر سرآیند تجمیع برابر L_A باشد (که $L_A< L_H$).

• حجم هر محموله‌ی داده L_P باشد (جهت سادگی محاسبات).

• N بسته‌ی کوچک داده، در بسته‌ی تجمیعی بزرگ‌تر تجمیع شوند.

$$\alpha(\%) = \frac{N(L_H + L_P) - [N(L_A + L_P) + L_H]}{N(L_H + L_P)} \times 100 = \frac{N(L_H - L_A) - L_H}{N(L_H + L_P)} \times 100 \qquad (۵)$$

بر اساس معادله‌ی (۵) هرچه L_A از L_H کمتر باشد، میزان صرفه‌جویی حجمی بیشتر است.

۴- ناحیه‌های ممکن برای تجمیع بسته‌ها

تجمیع یا تفکیک بسته‌ها را می‌توان در شبکه‌های مختلف یا به عبارتی ناحیه‌های شبکه‌ای مختلف انجام داد، از جمله:

• شبکه‌های لبه[۷۷]، به‌عنوان مثال: شبکه‌های دسترسی سیمی و بی‌سیم IoT/ غیر IoT، شبکه‌های محلی و یا شبکه‌های حسگر بی‌سیم [۲, ۴, ۳۹].

• شبکه‌های گسترده، شامل قسمت‌های نزدیک به شبکه‌های لبه و یا قسمت‌های نزدیک به شبکه‌های هسته[۷۸] [۴, ۸, ۱۶-۱۲].

• شبکه‌های مرکز داده [۴].

گره‌های مختلفی را می‌توان در هر ناحیه انتخاب کرد تا بسته‌ها را بر اساس استراتژی تجمیع مورد نظر تجمیع کنند. به‌عنوان مثال در یک شبکه‌ی گسترده امکانات زیر وجود دارد:

- تمام گره‌های شبکه (روترها یا سوییچ‌ها) تجمیع بسته انجام دهند. در این حالت، بهتر است بسته‌های زیرشبکه‌های متصل به گره به جای بسته‌های گره‌های همسایه تجمیع شوند.

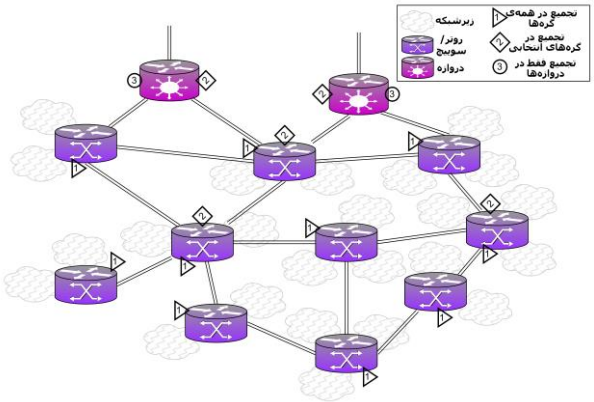
- فقط زیرمجموعه‌ای از گره‌های شبکه تجمیع بسته انجام دهند. در این مورد، گره‌های مناسب را می‌توان با استفاده از روش‌ها یا الگوریتم‌های مختلفی انتخاب کرد.

- تنها گره‌های دروازه تجمیع بسته انجام دهند.

موقعیت‌های مختلف برای گره‌های تجمیع‌کننده در شکل ۴ نشان داده شده است.

این مقاله تجمیع بسته‌های داده‌ی مبتنی بر اینترنت اشیا را در شبکه‌های خودمختار (AS[79]) ناحیه‌های نزدیک به شبکه‌های لبه در شبکه‌های گسترده بررسی می‌کند. شبکه‌های این ناحیه

واسطی هستند بین شبکه‌های لبه و شبکه‌های هسته.



شکل ۴: انتخاب‌های مختلف برای گره‌های تجمیع‌کننده.

تجمیع بسته‌ها در مناطق WAN را می‌توان بر اساس شباهت‌ها در نوع پیام لایه‌ی کاربرد یا بر اساس شباهت‌ها در سرآیندها انجام داد. شباهت در آدرس IP مقصد یکی از مقولات مهمی است که علاوه بر شباهت در لایه‌های فیزیکی و پیوند داده (به عبارتی گره‌ی بعدی مشابه) در تجمیع بر اساس مشابهت سرآیندها مطرح است [۴, ۱۲]؛ از این نظر، آدرس‌های مقصد ممکن است به‌طور کامل یا فقط جزئی (بخشی از آن‌ها) یکسان باشند. در تجمیع بر اساس مشابهت نوع داده‌ی لایه‌ی کاربرد، علاوه بر شباهت در لایه‌های فیزیکی و پیوند داده (به عبارتی گره‌ی بعدی مشابه) نوع پیام لایه‌ی کاربرد بسته‌ها نیز مشابه است یا این که در یک دسته قرار می‌گیرد. دسته‌بندی نوع داده‌ها در سطح لایه‌ی کاربرد می‌تواند بر اساس تگ‌های داده صورت گیرد [۲۸].

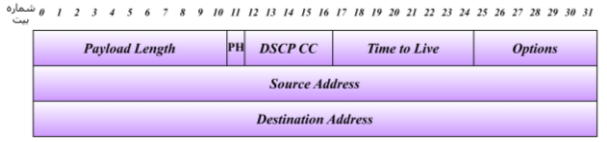
۵- سازوکار پیشنهادی تجمیع بسته

هدف اصلی سازوکار پیشنهادی، تجمیع بسته‌های داده‌ی مبتنی بر اینترنت اشیا در ناحیه‌های نزدیک به شبکه‌های لبه در شبکه‌های گسترده است. شبکه‌های این ناحیه واسطی بین شبکه‌های لبه و شبکه‌های هسته هستند و بنابراین تعداد زیادی از بسته‌های کوچک داده‌ی مربوط به کاربردهای مختلف از این ناحیه عبور خواهند کرد.

سازوکار تجمیع بسته‌ی پیشنهادی برای بسته‌های اینترنت اشیا مناسب است و نوع تجمیع و گره‌هایی را که بسته‌ها را تجمیع می‌کنند در نظر می‌گیرد. در این راستا، هر سوییچ SDN این توانایی را دارد که بسته‌ها را بر اساس شباهت در آدرس مقصد و ویژگی‌های دیگری همچون ToS و یا نوع پیام لایه‌ی کاربرد تجمیع کند و در صورت نیاز، می‌تواند بسته‌های تجمیعی دریافتی را نیز تفکیک کند. بر اساس دستور کنترل‌کننده‌ی SDN، هر سوییچ انتخاب می‌کند که تجمیع یا تفکیک بسته‌ها را انجام دهد یا خیر؛ همچنین نوع تجمیع و پارامترهای مرتبط از جمله آستانه‌های طولی و زمانی را نیز دریافت می‌کند. کنترل‌کننده‌ی SDN علاوه برانجام فعالیت‌های معمول، اطلاعات وضعیت سوییچ‌ها را به‌طور منظم دریافت می‌کند و بر اساس این اطلاعات، تصمیم می‌گیرد که کدام گزینه برای کل شبکه بهترین است و دستورالعمل‌های لازم را به سوییچ‌ها می‌دهد. متوسط نرخ انتقال[۸۰] و متوسط تعداد بسته‌های ارسالی و دریافتی در آخرین بازه‌ی زمانی قبلی در بسته‌های وضعیتی که سوییچ‌ها به کنترل‌کننده ارسال می‌کنند، گنجانده شده است.

در فرآیند تجمیع، بسته‌های دارای ویژگی یکسان قبل از ارسال به خروجی در صف‌هایی گروه‌بندی می‌شوند. بسته‌های موجود در یک صف وقتی که طول صف از آستانه‌ی طول فراتر رود، تجمیع شده و بسته‌ی تجمیعی بزرگ‌تر را تشکیل می‌دهند. به جای سرآیندها و پی‌آیند[۸۱]های مشابه بسته‌ها، یک مجموعه سرآیند و پی‌آیند، در سطح لایه‌های ۱و ۲ و تا حدی لایه‌ی ۳، در بسته‌ی تجمیعی بزرگ‌تر به اشتراک گذاشته می‌شود؛ بخش‌های خاصی مانند CRC ممکن است در این مجموعه سرآیند مشترک متفاوت باشند؛ سرآیند مشترک سطح ۳ به دلیل وجود مشابهت در برخی بخش‌های سرآیند لایه‌ی ۳ در بسته‌ها است از جمله آدرس IP مقصد مشابه. همچنین در این راستا، هر بسته‌ی تجمیع‌شده در بسته‌ی بزرگ‌تر به جای سرآیند لایه‌ی ۳ (لایه‌ی شبکه) خود، یک سرآیند تجمیع کوچک‌تر اختصاصی خواهد داشت. در این کار به هر بسته‌ی تجمیع‌شده در بسته‌ی بزرگ‌تر، که سرآیندهای لایه‌های ۱ تا ۳ اختصاصی آن حذف شده، در کنار سرآیند تجمیع خود یک سلول[۸۲] گفته می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که یک بسته‌ی تجمیعی بزرگ از چند سلول به همراه فقط یک مجموعه‌ی واحد از سرآیندها و پی‌آیندهای مشترک تشکیل شده است؛ همچنین می‌توان گفت که payload هر سلول از سرآیند TCP/UDP بسته‌ی اصلی اولیه‌ی نظیر خود به همراه پیام لایه‌ی کاربرد آن تشکیل شده است.

شکل ۵ سرآیند تجمیع یک سلول را زمانی که از IPv4 در بسته‌ها استفاده می‌شود، نشان می‌دهد.



شکل ۵: سرآیند تجمیع پیشنهادی مبتنی بر IPv4.

فیلدهای سرآیند تجمیع در شکل ۵ به شرح زیر است:

- Payload Length: طول بار سلول بر حسب بایت.

- Payload Header (PH): نوع سرآیند لایه‌ی انتقال را تعیین می‌کند: 0 برای TCP، 1 برای UDP.

- DSCP Corresponding Code (DSCP CC): یک کد مختصر نظیر قسمت DSCP از ToS در سرآیند IPv4 بسته‌ی اصلی.

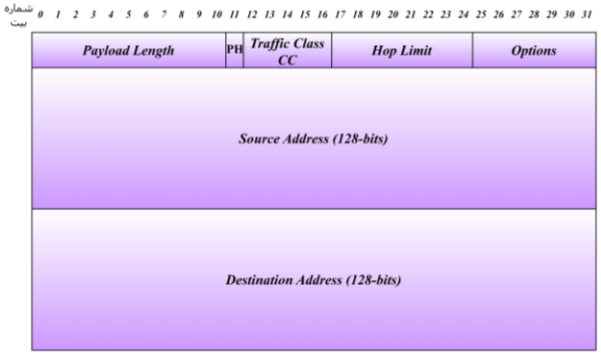
- Time to Live: مانند فیلد Time to Live در سرآیند IPv4 بسته‌ی اصلی.

- Options: یک فیلد کوتاه اضافی برای برخی از گزینه‌ها یا پارامترهای ممکن.

- Source Address: آدرس IP مبدأ.

- Destination Address: آدرس IP مقصد.

در مقایسه با سرآیند IPv4، سرآیند تجمیع پیشنهادی مبتنی بر IPv4 اندازه‌ی سرآیند را حداقل ۸ بایت کاهش می‌دهد. شکل ۶ سرآیند تجمیع یک سلول را زمانی که از IPv6 در بسته‌ها استفاده می‌شود نشان می‌دهد.



شکل ۶: سرآیند تجمیع پیشنهادی مبتنی بر IPv6.

فیلدهای سرآیند تجمیع در شکل ۶ به شرح زیر است:

- Payload Length: طول بار سلول بر حسب بایت.

- Payload Header (PH): سربرگ لایه‌ی انتقال را تعیین می‌کند: 0 برای TCP، 1 برای UDP.

- Traffic Class Corresponding Code (Traffic Class CC): یک کد مختصر نظیر قسمت Traffic Class در سرآیند IPv6 بسته‌ی اصلی.

- Hop Limit: مانند قسمت Hop Limit در سرآیند IPv6 بسته‌ی اصلی.

- Options: یک فیلد کوتاه اضافی برای برخی از گزینه‌ها یا پارامترهای ممکن.

- Source Address: آدرس IP مبدأ.

- Destination Address: آدرس IP مقصد.

در مقایسه با سرآیند IPv6، سرآیند تجمیع پیشنهادی مبتنی بر IPv6 اندازه‌ی سرآیند را ۴ بایت کاهش می‌دهد.

در این کار چند نوع تجمیع بسته پشتیبانی می‌شود:

در تجمیع بسته‌ی نوع A بسته‌هایی که آدرس IP مقصد مشابه دارند با یکدیگر تجمیع می‌شوند. در تجمیع بسته‌ی نوع C بسته‌هایی که آدرس IP مقصد و نوع سرویس (ToS) مشابه دارند با یکدیگر تجمیع می‌شوند؛ در تجمیع نوع C بر اساس اولویت انتقال، ToSهای بسته‌ها را می‌توان به ۲، ۳، ۴ یا ۵ گروه دسته‌بندی نمود؛ در این نوع تجمیع برای جلوگیری از تأخیر بیش از حد بسته‌های دارای اولویت بیشتر، هر دسته یک آستانه‌ی طول منحصر به فرد خواهد داشت، به‌عنوان مثال ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ از حداکثر آستانه‌ی طولی، به ترتیب برای گروه‌های دارای اولویت بیشتر (حساسیت بیشتر به تأخیر) به کمتر (حساسیت کمتر به تأخیر) در حالت تقسیم ToSها به ۵ گروه (که حالت پیش‌فرض محسوب می‌شود). صفر درصد در این‌جا به معنای ارسال فوری بسته بدون شرکت در تجمیع است که برای بسته‌های مربوط به کاربردهای بی‌درنگ مناسب است.

در تجمیع بسته‌ی نوع D که مبتنی بر خوشه‌بندی است، بسته‌هایی با یکدیگر تجمیع می‌شوند که اولاً آدرس مقصد مشابه داشته باشند و دوماً متعلق به دسته‌ی نظیر یک مرکز باشند یا به عبارتی به آن مرکز دسته نسبت به مراکز دیگر نزدیک‌تر باشند؛ در راستای بیان دقیق‌تر شرط دوم اگر برای مجموعه‌ی محدود از $i \in W$، مجموعه‌ی مرکزهای c_i را C، گروه نظیر هر c_i را S_i، ویژگی‌های متناظر یک بسته را p و تابع فاصله را d درنظر گیریم، برای یک $c_k \in C$ داشته باشیم:

$$\left(\forall c_i \in C: d(p, c_k) \leq d(p, c_i)\right) \Rightarrow p \in S_k \qquad (۶)$$

در تجمیع نوع D، کنترل‌کننده‌ی SDN بر اساس نمونه بسته‌هایی که به تعداد مناسب از سوییچ مربوطه در فواصل زمانی معین دریافت می‌کند، هر بار عمل خوشه‌بندی را بر اساس الگوریتم K-Means و درنظرگیری دو پارامتر ToS و نوع داده‌ی لایه‌ی کاربرد به‌عنوان ویژگی‌های مورد استفاده در خوشه‌بندی، انجام می‌دهد و مراکز جدید خوشه‌ها را به‌دست می‌آورد و آن‌ها را به سوییچ

یادشده اعلام می‌نماید؛ این اعمال برای هر سوییچ به‌صورت اختصاصی انجام می‌شود؛ سوییچ مربوطه بر اساس آخرین مراکز دریافتی، کار دسته‌بندی (صف‌بندی) بسته‌های داده و تجمیع را با توجه فاصله با مراکز و نیز درنظر گرفتن آدرس مقصد انجام می‌دهد؛ حالت پیش‌فرض تعداد گروه‌ها برای الگوریتم خوشه‌بندی K-Means در این‌جا ۵ گروه است، اما در صورت لزوم مقادیر دیگر نیز می‌تواند باشد؛ در این‌جا نیز آستانه‌ی طولی مربوط به هر گروه با گروه دیگر متفاوت خواهد بود و بر اساس ویژگی ToS مرکز هر گروه تعیین می‌شود.

لازم به ذکر است که در همه‌ی تجمیع‌های اشاره شده، آستانه‌ی طولی می‌تواند به‌صورت ساده یا به‌صورت انطباقی با شرایط بسته‌ها باشد. برای آستانه‌ی طولی انطباقی در این مقاله پارامتری با عنوان L_Score تعریف می‌شود که امتیازی است که میزان بهینگی حاصل از تجمیع یک بسته را نشان می‌دهد. در یک بسته‌ی داده، اگر مجموع اندازه‌ی سرآیندهای لایه‌های ۱ تا ۳ را L_HDR123 و اندازه‌ی محموله‌ی داده‌ی مربوطه را L_Payload درنظر گیریم، L_Score جهت شرکت بسته‌ی یادشده در تجمیع به‌صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$L_Score = \frac{L_HDR123}{L_HDR123 + L_Payload} \qquad (۷)$$

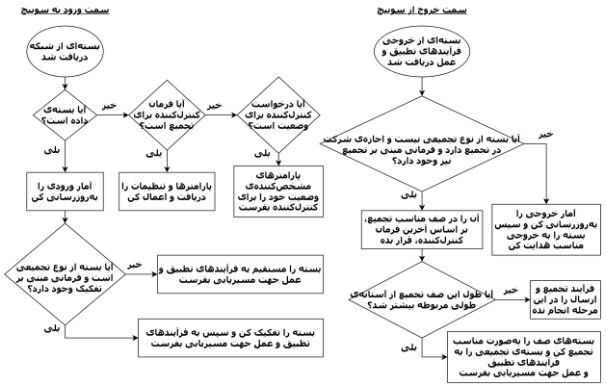
بنابراین هرچه نسبت اندازه‌ی سرآیندها به اندازه‌ی محموله‌ی داده بیشتر باشد (که در صورت کمتر بودن اندازه‌ی پیام روی می‌دهد)، شرکت بسته در تجمیع بهینگی بیشتری به ارمغان می‌آورد، چون درصد بیشتری از کل اندازه‌ی بسته در تجمیع حذف می‌گردد (حذف سرآیندهای لایه‌های پایینی بر اساس استفاده از یک مجموعه سرآیند مشترک برای همه‌ی بسته‌های شرکت‌کننده در تجمیع). آستانه‌ی طولی انطباقی بر اساس ضرب L_Score میانگین نمونه بسته‌های دریافت‌شده از هر سوییچ در حداکثر آستانه‌ی طولی برای آن سوییچ توسط کنترل‌کننده تعیین می‌شود. همچنین در صورت انتخاب تجمیع نوع C، L_Score میانگین برای هر دسته ToS به‌صورت جداگانه، و در صورت انتخاب تجمیع نوع D، L_Score میانگین برای هر دسته‌ی خوشه‌بندی به‌صورت جداگانه حساب می‌شود.

بنابراین در حالت کلی اگر شماره‌ی سوییچ، شماره‌ی دسته داده‌ای که L_Score برای آن محاسبه می‌شود و شماره‌ی بسته‌ی داده از دسته‌ی یادشده را به‌ترتیب i، j و k درنظر گیریم، به‌صورتی که $i,j,k \in W$ ، $i \le R$ ، $j \le M$ و $k \le N$، در این صورت:

$$Lth_{i,j} = \frac{1}{N+1}\sum_{k} L_Score_{i,j,k} \times L_{Max} \qquad (۸)$$

که L_{Max} حداکثر آستانه‌ی طولی و $Lth_{i,j}$ مقدار آستانه‌ی طولی برای دسته‌ی j از سوییچ i است.

خلاصه‌ای از فرآیند پیشنهادی تجمیع/تفکیک بسته برای یک سوییچ SDN در فلوچارت شکل ۷ نشان داده شده است.



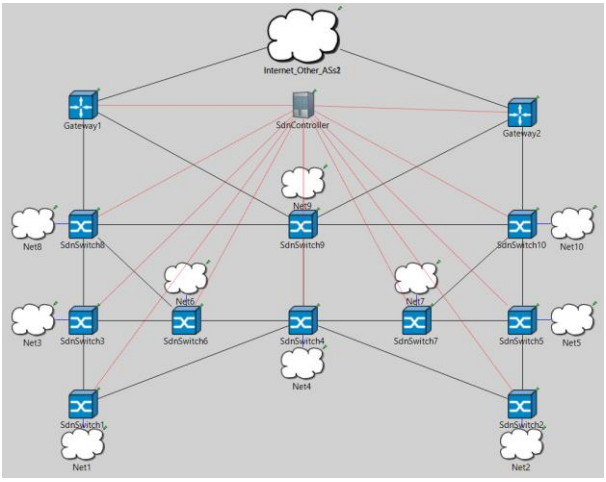
شکل ۷: فرآیند پیشنهادی تجمیع/تفکیک بسته برای یک سوییچ SDN.

در حالت پیش‌فرض تجمیع در همه‌ی گره‌های شبکه (غیر از دروازه‌ها) انجام می‌شود، اما در صورت لزوم، کنترل‌کننده‌ی SDN این قابلیت را دارد که فقط به گره‌هایی منتخب فرمان تجمیع را بفرستد.

۶- شبیه‌سازی سازوکار تجمیع بسته‌ی پیشنهادی و نتایج

سازوکار تجمیع بسته‌ی پیشنهادی با استفاده از شبیه‌ساز OMNeT++ 5.4.1 [۴۳] و چارچوب[۸۳] INET 4.1.1 [۴۴] شبیه‌سازی شد. برای برآورده ساختن الزامات، مانند تجمیع بسته‌ها در شبکه‌های مبتنی بر SDN، از جمله وجود سوییچ‌ها و کنترل‌کننده‌ی مناسب که موارد تجمیع را پشتیبانی کنند، ماژول‌ها و قطعات متعددی در انواع مختلف از جمله فایل‌های NED، فایل‌های C++، فایل‌های پیام و فایل‌های INI اضافه یا به‌روزرسانی شدند.

برای شبیه‌سازی، یک شبکه‌ی AS مبتنی بر SDN در ناحیه‌ی نزدیک به لبه درنظر گرفته شد. پیکربندی شبکه‌ی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: ساختار شبکه‌ی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها.

در شکل ۸، پیوندهای اترنت[۸۴] به سوییچ‌ها اجازه می‌دهند تا با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. شبکه‌های لبه‌ای که با نام "Net" نشان داده شده‌اند، وظیفه‌ی تولید ترافیک بسته‌ها را بر عهده دارند که به سمت دروازه‌ها ارسال می‌شوند. ترافیک‌های تولیدی، متناسب با ترافیک شهر هوشمند مبتنی بر IoT بوده و از توزیع‌های مختلفی از نظر اندازه‌ها و فواصل زمانی بین ارسال‌های بسته‌های داده در این راستا بهره می‌برند [۴۵]. به این ترتیب تعداد زیادی از بسته‌های کوچک داده به سمت دروازه‌ها ارسال می‌شوند.

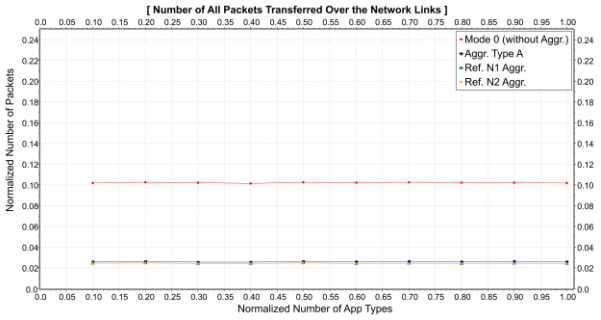
کنترل‌کننده‌ی SDN سه کار را انجام می‌دهد: ۱- داده‌های وضعیت سوییچ‌ها را در بازه‌های زمانی معین به‌دست می‌آورد. ۲- بر اساس داده‌های ذکرشده و همچنین برنامه و تنظیمات، تصمیمات لازم را در راستای تجمیع بسته‌ها ازنظر مواردی چون نوع تجمیع و پارامترهای تجمیع از جمله آستانه(های) طولی می‌گیرد. ۳- دستورات مربوطه را به سوییچ‌ها ارسال می‌کند تا موارد تصمیم‌گرفته‌شده برای تجمیع را به شبکه اعلام و اعمال کند.

پارامترهای مشترک شبیه‌سازی‌ها به‌صورت جدول ۱ است.

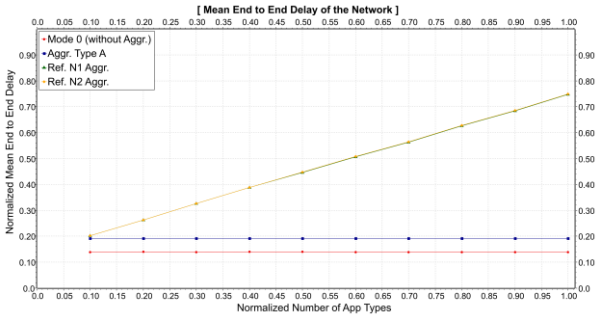
جدول ۱: پارامترهای مشترک شبیه‌سازی‌ها.

پارامتر	مقدار
مدل توزیع ترافیک و اندازه‌ی بسته‌ها	ترکیب توزیع‌های متناسب با ترافیک شهر هوشمند (بر اساس [۴۵])
مقصد بسته‌های داده	شبکه‌های خارج از AS (به سمت دروازه‌ها)
گره‌های تجمیع‌کننده	همه‌ی گره‌ها غیر از دروازه‌ها
پروتکل لایه‌های فیزیکی و پیوند داده	Ethernet
نسخه‌ی IP	IPv4
پروتکل لایه‌ی انتقال	UDP
MTU	۱۵۰۰ بایت
تعداد نوع پیام‌های لایه‌ی کاربرد	تا ۱۰ عدد
زمان شبیه‌سازی	۱۲۰ ثانیه

شکل ۹ و شکل ۱۰ کارهای مرجع‌های [۲۶] (مرجع N1) و [۸] (مرجع N2) را تحت عنوان‌های Ref. N1 و Ref. N2 با تجمیع نوع A سازوکار پیشنهادی که تجمیع پیش‌فرض آن است، از دیدگاه‌های تعداد بسته‌های ارسالی (تبادلی) در شبکه و تأخیر انتها به انتهای میانگین شبکه، مقایسه می‌کنند. محورهای افقی در این مقایسه، تعداد نوع برنامه (نوع پیام لایه‌ی کاربرد) است.



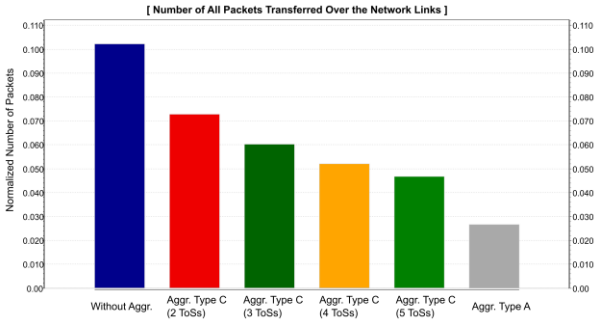
شکل ۹: مقایسه‌ی تعداد بسته‌های ارسالی در شبکه در تجمیع‌های Ref. N1، Ref. N2 و تجمیع پیشنهادی نوع A.



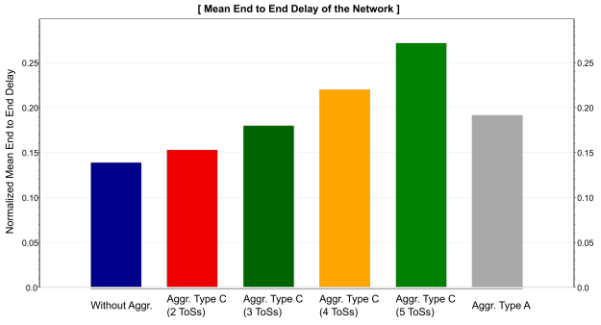
شکل ۱۰: مقایسه‌ی تأخیر انتها به انتهای میانگین شبکه در تجمیع‌های Ref. N1، Ref. N2 و تجمیع پیشنهادی نوع A.

کاهش تعداد بسته‌های شبکه برای تجمیع‌های Ref. N1، Ref. N2 و نوع A در نتیجه‌ی شکل ۹ تقریباً یکسان است و این مقدار با تغییر تعداد نوع برنامه (پیام لایه‌ی کاربرد)، در این تجمیع‌ها تقریباً ثابت می‌ماند که البته بیش از ۷۰٪ صرفه‌جویی در تعداد بسته‌های تبادل‌شده در شبکه را نسبت به حالت بدون تجمیع نشان می‌دهد؛ اما میانگین تأخیر انتها به انتهای شبکه در نتیجه‌ی شکل ۱۰ به‌صورت تقریباً خطی و با شیبی قابل توجه برای Ref. N1 و Ref. N2 افزایش می‌یابد، درحالی‌که برای تجمیع نوع A ثابت می‌ماند. بنابراین، تجمیع نوع A طرح پیشنهادی، بهتر و کارآمدتر از طرح‌های تجمیع Ref. N1 و Ref. N2 است که بسته‌ها را در سطح لایه‌ی کاربرد جمع‌آوری می‌کنند (نیاز به مشابهت در لایه‌های ۱ تا ۴ بسته‌ها از نظر ویژگی‌ها و شرایط برای تجمیع).

شکل ۱۱ و شکل ۱۲ حالت‌های مختلف تجمیع نوع C که بر اساس ToS بسته‌ها است را با تجمیع نوع A و با یکدیگر از دیدگاه تعداد بسته‌های ارسالی در شبکه و میانگین تأخیرهای انتها به انتها مقایسه می‌کنند. حالت‌های مختلف درنظرگرفته‌شده برای تجمیع نوع C در این‌جا عبارتند از ۱- وجود بسته‌های دارای ToSهای با دو اولویت برتر (2 ToSs)، ۲- وجود بسته‌های دارای ToSهای با سه اولویت برتر (3 ToSs)، ۳- وجود بسته‌های دارای ToSهای با چهار اولویت برتر (4 ToSs)، و ۴- وجود بسته‌های دارای ToSهای با پنج اولویت برتر (5 ToSs)، با درنظر گرفتن تقسیم ToSها از نظر اولویت ارسال به پنج دسته. بر اساس نتایج، در حالت‌هایی که بسته‌ها دارای ToSهای با میانگین اولویت بالاتری هستند، همچون حالت‌های ۱ و۲ یادشده، میانگین تأخیرهای انتها به انتهای شبکه در تجمیع نوع C از تجمیع نوع A کمتر می‌تواند باشد.



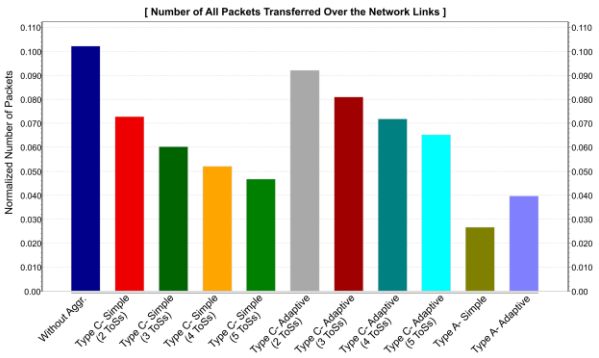
شکل ۱۱: مقایسه‌ی تعداد بسته‌های ارسالی در شبکه در تجمیع نوع A با حالت‌های مختلف تجمیع نوع C.



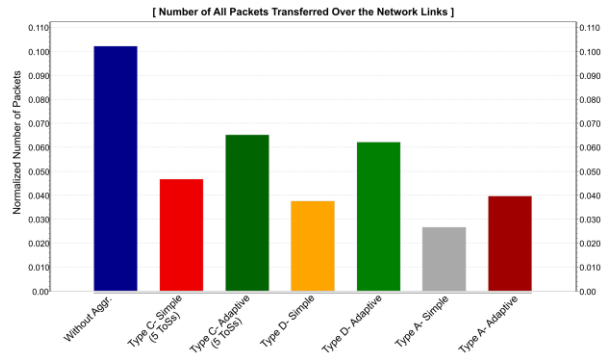
شکل ۱۲: مقایسه‌ی میانگین تأخیرهای انتها به انتهای شبکه در تجمیع نوع A با حالت‌های مختلف تجمیع نوع C.

نکته‌ی اصلی تجمیع نوع C این است که در همه‌ی حالت‌های، بسته‌هایی که اولویت بالاتری دارند، تأخیرهای انتها به انتهای کمتری را تجربه می‌کنند، به‌ویژه بسته‌هایی که مربوط به کاربردهای بی‌درنگ هستند که بدون تجمیع بلافاصله ارسال می‌گردند و تأخیر تجمیع را تجربه نمی‌کنند. همچنین یادآوری این نکته مهم است که در تجمیع نوع C داده‌ها بر اساس مقادیر ToSهای خود دسته‌بندی می‌شوند و این دسته‌بندی در بحث‌هایی چون رایانش مه و رایانش ابری[۸۵] به‌عنوان پیش‌پردازشی بر دسته‌بندی داده‌ها، با روش‌هایی مناسب می‌تواند مفید واقع شود.

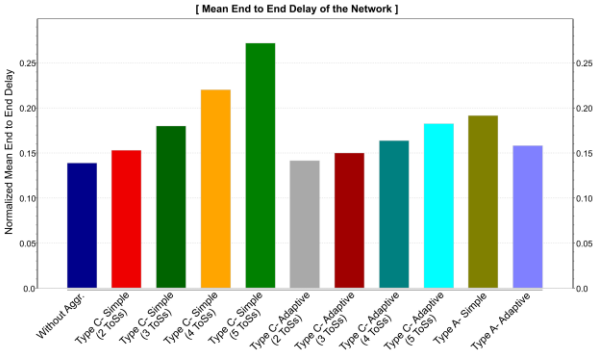
شکل ۱۳ و شکل ۱۴ حالت‌های انطباقی تجمیع‌های نوع A و انواع C را با حالت‌های غیر انطباقی آن‌ها مقایسه می‌کنند. بر اساس نتایج، استفاده از آستانه‌ی طولی انطباقی نسبت به حالت نظیر غیرانطباقی، تعداد بسته‌های ارسالی در شبکه را مقداری افزایش می‌دهد اما میانگین تأخیرهای انتها به انتهای شبکه را کاهش می‌دهد. کاهش تأخیر یادشده برای حالت‌هایی نظیر حالت تجمیع نوع C (5 ToSs)، به ۳۳٪ می‌رسد.



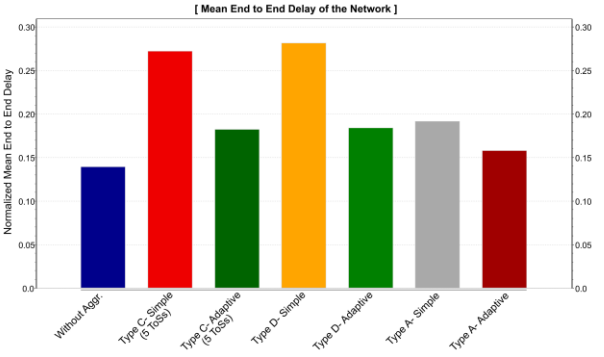
شکل ۱۳: مقایسه‌ی تعداد بسته‌های ارسالی در شبکه در حالت‌های انطباقی نسبت به غیر انطباقی.



شکل ۱۵: مقایسه‌ی تجمیع نوع D با انواع A و C (حالت‌های انطباقی و غیر انطباقی) از نظر تعداد بسته‌های ارسالی در شبکه.



شکل ۱۴: مقایسه‌ی میانگین تأخیرهای انتها به انتهای شبکه در حالت‌های انطباقی نسبت به غیر انطباقی.



شکل ۱۶: مقایسه‌ی تجمیع نوع D با انواع A و C (حالت‌های انطباقی و غیر انطباقی) از نظر میانگین تأخیرهای انتها به انتهای شبکه.

از فواید انطباقی بودن تجمیع‌های یادشده، درنظر گرفتن حدی تعادلی برای تجمیع بین بهینگی حاصل از تجمیع و کاهش تأخیر انتها با انتها است. با درنظر گرفتن ضریبی در معادله‌ی آستانه‌ی طولی انطباقی می‌توان این حد تعادلی را جابه‌جا نمود.

شکل ۱۵ و شکل ۱۶ تجمیع نوع D را با تجمیع‌های نوع A و C از نظر تعداد بسته‌های تبادلی در شبکه و تأخیر انتها به انتهای میانگین شبکه مقایسه می‌کنند و هر دو حالت انطباقی و غیر انطباقی را برای این تجمیع‌ها درنظر می‌گیرند. در تجمیع نوع D که مبتنی بر خوشه‌بندی K-Means بسته‌ها با سازوکاری است که قبلاً توضیح داده شد، صرفه‌جویی در تعداد بسته‌های شبکه در سطحی بین تجمیع نوع A و نوع C قرار دارد، اما از نظر تأخیر انتها به انتهای میانگین در حدود تجمیع نوع C است و بنابراین در میان تجمیع‌هایی که بر اساس دسته‌بندی متناسب با ویژگی‌های بسته‌ها هستند، می‌توان گفت که تجمیع D نسبت به تجمیع C بهینگی بیشتری به ارمغان می‌آورد (که البته بهای آن پردازش‌های موقتی بیشتر در کنترل‌کننده‌ی SDN است).

از آن‌جایی که مانند تجمیع نوع C، تجمیع نوع D نیز بر اساس دسته‌بندی بسته‌های داده است (البته با الگوهای مختص خود) می‌تواند در بحث‌هایی چون رایانش مه و رایانش ابری به‌عنوان پیش‌پردازشی بر دسته‌بندی داده‌ها، با روش‌هایی مناسب مفید واقع شود. جدول ۲ خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲: خلاصه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌ها.

نوع تجمیع		تعداد بسته‌های تبادل‌شده در شبکه		میانگین تأخیرهای انتها به انتها در شبکه	
		غیر انطباقی	انطباقی	غیر انطباقی	انطباقی
		[بر حسب میانگین ٪ نسبت به حالت بدون تجمیع]			
مرجع N1		۲۴/۰	-	۳۴۱/۹	-
مرجع N2		۲۳/۹	-	۳۴۲/۷	-
A (پیشنهادی، پیش‌فرض)		۲۶/۱	۳۸/۸	۱۳۷/۴	۱۱۳/۷
C (پیشنهادی، مبتنی بر ToS)	C (2 ToSs)	۷۱/۳	۹۰/۳	۱۱۰/۱	۱۰۲/۲
	C (3 ToSs)	۵۹/۰	۷۹/۴	۱۲۹/۵	۱۰۷/۹
	C (4 ToSs)	۵۱/۰	۷۰/۴	۱۵۸/۳	۱۱۸/۰
	C (5 ToSs)	۴۵/۷	۶۳/۹	۱۹۵/۷	۱۳۰/۹
D (پیشنهادی، مبتنی بر خوشه‌بندی K-Means)		۳۶/۹	۶۰/۹	۲۰۲/۲	۱۳۲/۴

اگر پارامتری به‌صورت $\boldsymbol{C_Score} = \frac{1}{\boldsymbol{D_{E2E}} \times \boldsymbol{N_P}}$ درنظر گرفته شود که در آن $\boldsymbol{D_{E2E}}$ برابر میانگین تأخیر انتها به انتها و $\boldsymbol{N_P}$ برابر تعداد بسته‌های تبادل‌شده شبکه است، امتیازی برای تجمیع محسوب شده و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، عملکرد بهتری را برای تجمیع نشان می‌دهد، چراکه هر دو مورد تعداد بسته و تأخیر را درنظر گرفته است. بر اساس جدول ۲، مقدار میانگین پارامتر $\boldsymbol{C_Score}$ برای تجمیع‌های نوع A و D پیشنهادی و مرجع‌های N1 و N2 به‌صورت جدول ۳ برای شبیه‌سازی‌های مرتبط است.

جدول ۳: مقدار میانگین پارامتر $\boldsymbol{C_Score}$ برای چند تجمیع.

نوع تجمیع	مقدار $\boldsymbol{C_Score}$	
	غیر انطباقی	انطباقی
	[نسبت به $\boldsymbol{C_Score}$ حالت بدون تجمیع]	
مرجع N1	۱/۲۱۹	-
مرجع N2	۱/۲۲۱	-
A (پیشنهادی، پیش‌فرض)	۲/۷۸۹	۲/۲۶۷
D (پیشنهادی، مبتنی بر خوشه‌بندی K-Means)	۱/۳۴۰	۱/۲۴۰

۷- نتیجه‌گیری

شبکه‌های مبتنی بر SDN نزدیک به لبه در ناحیه‌های WAN هدف اصلی سازوکار تجمیع بسته‌ی پیشنهادی هستند. در سازوکار تجمیع بسته‌ی پیشنهادی چند نوع تجمیع معرفی شد: تجمیع نوع A بر اساس شباهت در آدرس IP مقصد، تجمیع نوع C بر اساس شباهت در آدرس IP مقصد و نوع سرویس (ToS)، و تجمیع نوع D بر اساس شباهت در آدرس IP مقصد و خوشه‌بندی مبتنی بر ToS و نوع داده‌ی کاربرد.

کنترل‌کننده‌ی SDN بر اساس وضعیت سوییچ‌ها و نمونه‌های بسته‌ی داده، موارد لازم در راستای تجمیع بسته ازجمله نوع تجمیع و پارامترهای تجمیع را تعیین کرده و دستورات لازم را به سوییچ‌ها می‌رساند.

در این سازوکار، بسته‌های شرکت‌کننده در تجمیع، سرآیندهای لایه‌های ۳ به پایین خود را از دست داده و سپس به هر یک، یک سرآیند تجمیع داده می‌شود (که از سرآیند لایه‌ی ۳ نیز کوچک‌تر است) و در نهایت پس از تشکیل یک بسته‌ی بزرگ تجمیعی از این مجموعه، یک دست از سرآیند پایین‌تر از لایه‌ی ۳، به‌عنوان سرآیند بسته‌ی تجمیعی بزرگ‌تر، برای کل بسته‌های کوچک‌تر شرکت‌کننده در تجمیع به‌اشتراک گذاشته می‌شود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که سازوکار تجمیع بسته‌ی پیشنهادی می‌تواند در تعداد بسته‌های تبادلی شبکه بیش از ۷۰٪ صرفه‌جویی به ارمغان آورد و این کار را با تأخیر انتها به انتهای میانگین شبکه کمی بیشتر از حالت بدون تجمیع و بسیار کمتر از طرح‌های تجمیعی Ref. N1 و Ref. N2 انجام می‌دهد، به ویژه در شرایط تعداد زیاد نوع پیام لایه‌ی کاربرد، چراکه با افزایش این پارامتر، تأخیر تجمیع بسته‌ی پیشنهادی افزایش نمی‌یابد. این نشان‌دهنده‌ی کاهش pps در سوییچ/روترهای شبکه است که به معنای افزایش قابل توجه در عملکرد و بازدهی آن‌ها است؛ همچنین نشان‌دهنده‌ی کاهش در bps، IPG[86] و استفاده از لینک اجزای شبکه است و همه‌ی موارد بیان‌شده حاکی از افزایش کارایی شبکه می‌باشد. همچنین کاهش تعداد بسته‌های تبادلی شبکه می‌تواند به معنای کاهش هزینه‌های شبکه باشد؛ چراکه به دلیل افزایش روزافزون بسته‌های داده، تجهیزات شبکه‌ها باید به‌صورت کلی و فیزیکی به‌روزرسانی شوند و کاهش pps نوید این را می‌دهد که بازه‌های زمانی بین این به‌روزرسانی‌ها می‌تواند بیشتر شود که کاهش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت.

به‌عنوان تحقیقاتی که در آینده می‌توان انجام داد، به بررسی جزئیات کدهای P4 مرتبط با این سازوکار و نیز تأثیرات الگوریتم‌های خوشه‌بندی دیگر و نحوه‌ی پیاده‌سازی آن‌ها می‌توان اشاره کرد.

مراجع

[1] S. Abbasian Dehkordi, K. Farajzadeh, J. Rezazadeh, R. Farahbakhsh, K. Sandrasegaran, and M. Abbasian Dehkordi, "A survey on data aggregation techniques in IoT sensor networks," Wireless Networks, vol. 26, no. 2, pp. 1243-1263, 2020.

[2] B. Pourghebleh and N. J. Navimipour, "Data aggregation mechanisms in the Internet of things: A systematic review of the literature and recommendations for future research," Journal of Network and Computer Applications, vol. 97, pp. 23-34, 2017.

[3] H. Rahman, N. Ahmed, and I. Hussain, "Comparison of data aggregation techniques in Internet of Things (IoT)," in 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2016: IEEE, pp. 1296-1300 .

[4] G. S. Kuaban, T. Atmaca, A. Kamli, T. Czachórski, and P. Czekalski, "Performance Analysis of Packet Aggregation Mechanisms and Their Applications in Access (eg, IoT, 4G/5G), Core, and Data Centre Networks," Sensors, vol. 21, no. 11, p. 3898, 2021.

[5] S.-Y. Wang, C.-M. Wu, Y.-B. Lin, and C.-C. Huang, "High-speed data-plane packet aggregation and disaggregation by P4 switches," Journal of Network and Computer Applications, vol. 142, pp. 98-110, 2019.

[6] Y.-B. Lin, S.-Y. Wang, C.-C. Huang, and C.-M. Wu, "The SDN approach for the aggregation/disaggregation of sensor data," Sensors, vol. 18, no. 7, p. 2025, 2018.

[7] S. Manda, "OpenFlow-based Aggregation Mechanism for Communication in the Internet of Things," Master of Science, Trinity College, University of Dublin, 2019 .

[8] A. Koike, T. Ohba, and R. Ishibashi, "Iot network architecture using packet aggregation and disaggregation," in 2016 5th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), 2016: IEEE, pp. 1140-1145 .

[9] P. H. Azevêdo, M. F. Caetano, and J. L. Bordim, "A Packet Aggregation Mechanism for Real Time Applications over Wireless Networks," in 2011 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and Phd Forum, 2011 .

[10] X. Li, A. Liu, M. Xie, N. N. Xiong, Z. Zeng, and Z. Cai, "Adaptive aggregation routing to reduce delay for multi-layer wireless sensor networks," Sensors, vol. 18, no. 4, p. 1216, 2018.

[11] F. Al-Doghman, Z. Chaczko, and J. Jiang, "A review of aggregation algorithms for the internet of things," in 2017 25th International Conference on Systems Engineering (ICSEng), 2017: IEEE, pp. 480-487 .

[12] X. Mountrouidou and H. Perros, "On the departure process of burst aggregation algorithms in optical burst switching," Computer Networks, vol. 53, no. 3, pp. 247-264, 2009.

[13] J. A. Hernández, J. Aracil, V. López, and J. L. de Vergara, "On the analysis of burst-assembly delay in OBS networks and applications in delay-based service differentiation," Photonic Network Communications, vol. 14, no. 1, pp. 49-62, 2007.

[14] M. A. Toksöz and N. Akar, "Dynamic threshold-based assembly algorithms for optical burst switching networks subject to burst rate constraints," Photonic Network Communications, vol. 20, no. 2, pp. 120-130, 2010.

[۱۵] ن. کاظمی، "تجمیع بسته‌ای تطبیقی هوشمند در اینترنت اشیا،" رساله‌ی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، ۱۴۰۳.

[16] N. Kazemi, R. Ghaderi, and S. Nazari, "An IoT-based packet aggregation mechanism for the SDN-based wide area networks," *Computer Networks*, vol. 248, p. 110474, 2024.

[17] E. Fitzgerald, M. Pióro, and A. Tomaszwski, "Energy-optimal data aggregation and dissemination for the Internet of Things," IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 2, pp. 955-969, 2018.

[18] Y. Lin and V. W. Wong, "Frame Aggregation and Optimal Frame Size Adaptation for IEEE 802.11n WLANs," in IEEE globecom 2006, 2006: IEEE, pp. 1-6 .

[19] G. Di Stasi, J. Karlsson, S. Avallone, R. Canonico, A. Kassler, and A. Brunstrom, "Combining multi-path forwarding and packet aggregation for improved network performance in wireless mesh networks," Computer Networks, vol. 64, pp. 26-37, 2014.

[20] X. Li et al., "Differentiated data aggregation routing scheme for energy conserving and delay sensitive wireless sensor networks," Sensors, vol. 18, no. 7, p. 2349, 2018.

[21] S. Bhandari, S. K. Sharma, and X. Wang, "Latency minimization in wireless IoT using prioritized channel access and data aggregation," in GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, 2017: IEEE, pp. 1-6 .

[22] M. Yang, "Data aggregation algorithm for wireless sensor network based on time prediction," in 2017 IEEE 3rd information technology and mechatronics engineering conference (ITOEC), 2017: IEEE, pp. 863-867 .

[23] A. R. Khan and M. A. Chishti, "βDSC2DAM: beta-dominating set centered Cluster-Based Data Aggregation mechanism for the Internet of Things," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, pp. 1-18, 2022.

[24] H. Dou, Y. Chen, Y. Yang, and Y. Long, "A secure and efficient privacy-preserving data aggregation algorithm," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 13, no. 3, pp. 1495-1503, 2022.

[25] A. L. R. Madureira, F. R. C. Araújo, and L. N. Sampaio, "On supporting IoT data aggregation through programmable data planes," Computer Networks, vol. 177, p. 107330, 2020.

[26] S.-Y. Wang, J.-Y. Li, and Y.-B. Lin, "Aggregating and disaggregating packets with various sizes of payload in P4 switches at 100 Gbps line rate," Journal of Network and Computer Applications, vol. 165, p. 102676, 2020.

[27] R. Lu, K. Heung, A. H. Lashkari, and A. A. Ghorbani, "A lightweight privacy-preserving data aggregation scheme for fog computing-enhanced IoT," IEEE access, vol. 5, pp. 3302-3312, 2017.

[28] C. Huang, D. Liu, J. Ni, R. Lu, and X. Shen, "Reliable and privacy-preserving selective data aggregation for fog-based IoT," in 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018: IEEE, pp. 1-6 .

[29] Y. Huo, C. Yong, and Y. Lu, "Re-ADP: real-time data aggregation with adaptive-event differential privacy for fog computing," Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2018, 2018.

[30] A. Saleem et al., "FESDA: Fog-enabled secure data aggregation in smart grid IoT network," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 7, pp. 6132-6142, 2019.

[31] H. Kim, G. Lee, J. Shin, J. Paek and S. Bahk, "Slot-Size Adaptation and Utility-Based Packet Aggregation for IEEE 802.15.4e Time-Slotted Communication Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 9, pp. 16382-16397, 1 May1, 2024.

[32] N. Hou, X. Xia, Y. Wang and Y. Zheng, "One Shot for All: Quick and Accurate Data Aggregation for LPWANs," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 32, no. 3, pp. 2285-2298, June 2024.

[33] M. Hajiloo Vakil and Z. Shirmohammadi, "EDC-ER: An Efficient Data Compression Method for Energy Reduction in WBANs," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 155274-155286, 2024.

[34] J. Karlsson, A. Kassler, and A. Brunstrom, "Impact of packet aggregation on TCP performance in wireless mesh networks," in 2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops, 2009: IEEE, pp. 1-7 .

[35] P. Masek, D. Kovac, J. Hosek, M. Pavlova, and O. Krajsa, "Analysis of Network Parameters Influencing Performance of Hybrid Multimedia Networks," The International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems, vol. 2, pp. 122-128, 2013.

[36] P. Wu, Y. Cui, J. Wu, J. Liu, and C. Metz, "Transition from IPv4 to IPv6: A state-of-the-art survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 3, pp. 1407-1424, 2012.

[37] J. Postel, "RFC791: Internet Protocol- DARPA Internet Program Protocol Specification," RFC Editor, 2070-1721, 1981 .

[38] S. Deering and R. Hinden, "RFC2460: Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification," RFC Editor, 1998 .

[39] S. S. Jazaeri, S. Jabbehdari, P. Asghari, and H. Haj Seyyed Javadi, "Edge computing in SDN-IoT networks: a systematic review of issues, challenges and solutions," Cluster Computing, vol. 24, no. 4, pp. 3187-3228, 2021.

[40] G. Kirubasri, S. Sankar, D. Pandey, B. K. Pandey, V. K. Nassa, and P. Dadheech, "Software-Defined Networking-Based Ad hoc Networks Routing Protocols," in Software Defined Networking for Ad Hoc Networks: Springer, 2022, pp. 95-123.

[41] N. McKeown et al., "OpenFlow: enabling innovation in campus networks," ACM SIGCOMM computer communication review, vol. 38, no. 2, pp. 69-74, 2008.

[42] O. Fares, A. Dandoush, and N. Aitsaadi, "SDN-based Platform Enabling Intelligent Routing within Transit Autonomous System

Networks," in 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2022: IEEE, pp. 909-912 .

[43] "OMNeT++ Discrete Event Simulator." https://omnetpp.org (accessed Nov. 21, 2022).

[44] "INET Framework." https://inet.omnetpp.org (accessed Nov. 21, 2022).

[45] A. S. Ibrahim, K. Y. Youssef, H. Kamel, and M. Abouelatta, "Traffic modelling of smart city internet of things architecture," IET Communications, vol. 14, no. 8, pp. 1275-1284, 2020.

پاورقی‌ها:

[1] Internet of Things
[2] Actuator
[3] Lightweight Protocols
[4] Advanced Message Queuing Protocol
[5] Constrained Application Protocol
[6] Message Queuing Telemetry Transport
[7] Extensible Messaging and Presence Protocol
[8] Hyper Text Transfer Protocol
[9] bits per second
[10] Throughput
[11] packets per second
[12] Router
[13] Header
[14] Overhead
[15] Redundancy
[16] Aggregate
[17] Packet Aggregation
[18] Wireless Sensor Network
[19] Wide Area Network
[20] Fog
[21] Edge
[22] Type of Service
[23] Software-Defined Networking
[24] Mechanism
[25] Voice over IP
[26] Gateway
[27] Sink Node
[28] Lifetime
[29] Data Center Networks
[30] Core
[31] MAC Service Data Unit Aggregation
[32] MAC Protocol Data Unit Aggregation
[33] Frame Aggregation
[34] MAC Service Data Units
[35] Physical Service Data Unit
[36] MAC Protocol Data Units
[37] Real-Time
[38] Next Hop
[39] Data Link
[40] Physical
[41] Time Threshold
[42] Wireless Mesh Networks
[43] Quality of Service
[44] Length Threshold
[45] Cluster Head
[46] Clustered
[47] Prediction
[48] Clustering
[49] End-to-End Delay
[50] Privacy Preserving
[51] Disaggregate
[52] Programming Protocol-independent Packet Processor
[53] Control Plane
[54] Forwarding Plane (Data Plane)
[55] Network Architecture
[56] Network Stack
[57] Fog Computing
[58] Application
[59] Time Slot
[60] Wireless Body Area Network
[61] Long Short-Term Memory
[62] Run Length Encoding
[63] Aggregation Header
[64] Open Systems Interconnection
[65] Field
[66] Internet Protocol
[67] Payload
[68] Datagram
[69] Transmission Control Protocol
[70] User Datagram Protocol
[71] Size Threshold
[72] Holding Time
[73] Hybrid
[74] Infrastructure
[75] Southbound Protocols
[76] Flow Table
[77] Edge Networks
[78] Core Networks
[79] Autonomous System
[80] Baud Rate
[81] Trailer
[82] Cell
[83] Framework
[84] Ethernet
[85] Cloud Computing
[86] Interpacket Gap