

ارائه چارچوب جدیدی برای افزایش پایداری زیرساخت اندازه‌گیری شبکه‌های هوشمند برق

محمد رضائی^۱، دانشجوی دکتری، محمد حسین یغمایی مقدم^۲، استاد

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران

mrezaee@mail.um.ac.ir -

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران

hyaghmae@um.ac.ir -

چکیده: یکی از بخش‌های مهم شبکه هوشمند برق، زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند به منظور اندازه‌گیری، جمع‌آوری و آنالیز داده‌های مربوط به مصرف برق، مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های کنتورهای هوشمند در تجمعی کننده‌های میانی، تجمعی شده و از آنجا به مرکز مدیریت داده‌ها ارسال می‌شوند. تجمعی کننده‌ها نقش بسیار حیاتی در زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند دارند. داده‌های تجمعی کننده‌ها باید از مسیرهای با کمترین تاخیر ارسال شوند. زمانی که یک تجمعی کننده با خطاب مواجه شود، تمام ترافیکهای ارسالی توسط آن، از بین خواهد رفت و این امر باعث افزایش هزینه تولید برق در شبکه هوشمند برق خواهد شد. از این‌رو طراحی ساختار ارتباطی قابل اطمینان برای زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند بسیار مهم و ضروری می‌باشد. در این مقاله با استفاده از شبکه نرمافزار محور، ساختار جدیدی برای زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند پیشنهاد شده است که باعث افزایش قابلیت اطمینان شده و بصورت بهینه، کنتورهای هوشمند را به تجمعی کننده‌های موجود در شبکه، اختصاص می‌دهد. در ساختار پیشنهادی در هر کنترل کننده یک تجمعی کننده مجازی وجود دارد که به عنوان یک کاربرد در کنترل کننده شبکه نرمافزار محور قرار می‌گیرد. این تجمعی کننده مجازی، کنتورهای هوشمند را بر اساس نیازمندیهای درخواستی به تجمعی کننده‌های موجود متصل می‌کند. علاوه بر این، روش مسیریابی مبتنی بر کیفیت سرویس جدیدی، متناسب با نیازمندیهای این شبکه پیشنهاد شده است. در روش مسیریابی، کوتاهترین مسیر برای اتصال تجمعی کننده‌ها محاسبه شده و به منظور تضمین پارامترهای کیفیت سرویس، منابع مورد نیاز برای هر مسیر در شبکه، رزرو می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی تاثیر بسزایی در کاهش تاخیر و افزایش قابلیت اطمینان در زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های هوشمند برق، تجمعی کننده، شبکه‌های نرم افزار محور، بهینه‌سازی، شبکه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول : محمد حسین یغمایی مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه فردوسی مشهد

۱- مقدمه

اندازه بسته‌های ارسالی از چند بایت تا چندین بایت می‌باشد که بستگی به کاربردهای مختلف دارند [۱۲]. به دلیل کوچک بودن قسمت داده بسته‌ها، سربار سرآیند بسته‌ها زیاد می‌باشد، لذا می‌توان چندین بسته را با یکدیگر تجمعی کرد و با این عمل از سربار سرآیند بسته‌ها کاسته خواهد شد. عمل تجمعی توسط تجمعی کننده‌ها در شبکه انجام می‌شود و سپس داده‌ها به MDMS ارسال می‌شوند.

با توجه به محدودیت حافظه و پردازشی تجمعی کننده‌ها و نیاز به ارسال سریع اطلاعات مصرف، تعداد تجمعی کننده‌ها باید به نوعی باشد که بتوانند بسته‌های دریافتی را با کمترین تاخیر و از کوتاه‌ترین مسیر ارسال کنند. برای ارسال سریعتر داده‌ها، مسیر ارسال داده باید به‌گونه‌ای ایجاد شود که بتواند حداقل تاخیر را تضمین کرده و پنهانی باند نیاز جایزه‌های ایجاد شده توسط تجمعی کننده‌ها را فراهم سازد. از طرف دیگر، باید احتمال خرابی تجمعی کننده‌ها و یا از بین رفتن مسیر در نظر گرفته شود. در صورت خرابی تجمعی کننده و یا از بین رفتن مسیر، کنتورهای هوشمند دیگر قادر به ارسال اطلاعات خود نمی‌باشند و این امر موجب مشکلات زیادی خواهد شد. بطور مثال در این شرایط تولیدکنندگان از اطلاعات آرشیوی برای محاسبه مصرف و قیمت استفاده کرده که همانطور که در [۱۳] گفته شده است این امر باعث ایجاد تفاوت در قیمت واقعی برق و اعمال هزینه بر شبکه خواهد شد.

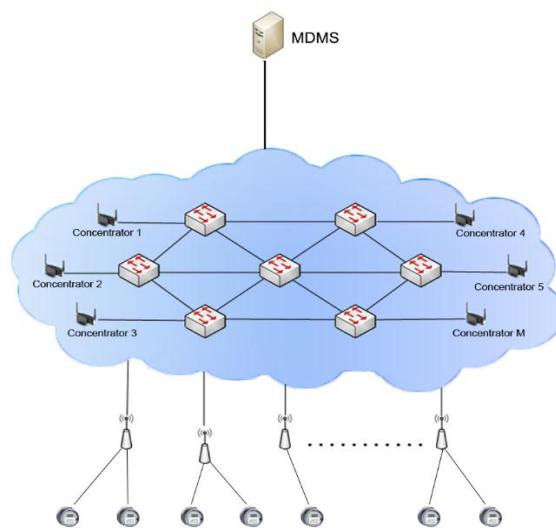
در این مقاله بر اساس نیازهای خاص AMI، استفاده از زیرساخت SDN پیشنهاد شده است. در ساختار پیشنهادی کنتورهای هوشمند به طور پویا^۱ به تجمعی کننده‌ها متصل می‌شوند. این تخصیص به‌گونه‌ای انجام می‌شود که هر تجمعی کننده مسئولیت مدیریت تعداد متناسبی از کنتورهای هوشمند را به عهده گیرد. این امر باعث پخش بار در کل شبکه می‌شود. از طرف دیگر ساختار پیشنهادی در برابر خرابی تجمعی کننده‌ها و از بین رفتن مسیر نیز مقاوم می‌باشد. در صورت خرابی تجمعی کننده، کنتورهای متصل به تجمعی کننده خراب شده، به سایر تجمعی کننده‌های موجود اختصاص می‌یابند.

براساس روش پیشنهادی استفاده از زیرساخت SDN می‌باشد. چارچوب معماری جدیدی است که برای شبکه ارائه شده است. سیاست اصلی این معماری جداسازی قسمت کنترل و مدیریت داده از یکدیگر می‌باشد.

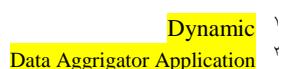
جدا کردن قسمت کنترل از سوئیچ‌ها باعث می‌شود تا ارسال و پخش بسته در شبکه سرعت بیشتری داشته باشد. از طرفی نرمافزاری شدن قسمت کنترل باعث می‌شود مدیریت شبکه و اعمال سیاستهای مدیریتی و امنیتی در این شبکه‌ها بسیار سریعتر انجام شود.

در روش پیشنهادی، در هر کنترل کننده کاربرد جدیدی به نام DAAP^۲ پیاده‌سازی شده است. این کاربرد در حقیقت یک تجمعی کننده مجازی می‌باشد. بسته‌ها دریافتی از کنتورهای هوشمند

شبکه‌های هوشمند برق، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این شبکه‌ها، ارتباط دوطرفه‌ای بین تولیدکنندگان و مصرفکنندگان برقرار می‌گردد [۱]. تولیدکنندگان بر اساس اطلاعات دریافتی از شبکه، قیمت و تولید برق را کنترل کرده و مصرفکنندگان با اطلاع از قیمت لحظه‌ای برق می‌توانند مصرف خود را بهینه کنند [۲] و به این ترتیب، فرآیند تولید، انتقال و مصرف برق را می‌توان در شبکه هوشمند برق بصورت بهینه کنترل کرد. برای استفاده از منافع شبکه‌های هوشمند برق، ابتدا باید چالشهای موجود در آن را رفع کرد. تنوع تجهیزات، گستره چغرافیایی وسیع، پیچیدگی مدیریت شبکه و عملکردهای متنوع را می‌توان به عنوان بخشی از این چالشهای نام برد. برای رفع این چالشهای روش‌های متفاوتی بیان شده است که یکی از جدیدترین آنها استفاده از ساختار شبکه‌های نرمافزار محور (SDN) می‌باشد [۶-۳]. برای استفاده از ساختار SDN در شبکه‌های هوشمند برق، باید ملاحظاتی را در نظر گرفت [۷-۸] تا بتوان از مزایای آن به منظور بهبود زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند (AMI) [۹] استفاده کرد، قابلیت اطمینان آن را افزایش داده و با پخش بار در شبکه، تاخیر را نیز کاهش داد. AMI یکی از قسمتهای مهم شبکه هوشمند برق می‌باشد که به منظور جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰]. AMI شامل کنتورهای هوشمند، دروازه‌ها و تجمعی کننده‌های داده می‌باشد. داده‌های حاوی اطلاعات مصرف مشتریان، توسط کنتورهای هوشمند جمع‌آوری شده و سپس به تجمعی کننده‌ها ارسال می‌شوند. تجمعی کننده‌ها بسته‌های دریافتی را به مراکز داده (MDMS) ارسال می‌کنند (شکل ۱) و مراکز داده، داده‌ها را به منظور پردازش و آنالیز در اختیار کاربردهای مختلف قرار می‌دهند [۱۱].



شکل (۱): زیرساخت پیشنهادی



تعداد تجمعی کننده‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در برخی دیگر از روش‌ها [۱۸-۱۹] سعی شده بهترین مکان برای قراردهی تجمعی کننده‌ها، قبل از راهاندازی شبکه، انتخاب شود. در هر کدام از این روشها بر اساس پارامترهای مختلف، الگوریتمی جهت قراردهی تجمعی کننده پیشنهاد شده است بطور مثال در [۱۸] محل تجمعی کننده با استفاده از یک مدل ریاضی و بر اساس پارامتر تعداد پرش، تعیین می‌شود. در صورت وجود چندین مکان مشابه، مکانی

انتخاب می‌شود که گذردهی را افزایش و تاخیر را کاهش دهد.

در [۲۰] دستگاه واسطی در نظر گرفته شده است که اتصالات TCP را با یکدیگر تجمعی کرده و در قالب یک اتصال TCP اطلاعات آنها را ارسال می‌کند. در این روش تمام کنتورهای هوشمند با تجمعی کننده اتصال TCP برقرار می‌کنند. تجمعی کننده با تجمعی تمام اطلاعات دریافتی در قالب یک اتصال TCP، آنها را به سرور مرکزی ارسال می‌کند. این روش باعث می‌شود تا منابع شبکه کمتر مورد استفاده قرار گیرند. در این روش با خرابی یک تجمعی کننده، کنتورهای هوشمند، دیگر قادر به برقرار اتصال با MDMS نمی‌باشند. در برخی از روشها [۲۱-۲۳] تجمعی داده‌ها بصورت امن مورد توجه قرار داده شده است. در اکثر روشها داده‌های ارسالی با استفاده از یک الگوریتم رمزگاری، رمز شده و سپس ارسال می‌شوند. در [۲۴] هر کنتور هوشمند در ابتدای اتصال، یکی از تجمعی کننده‌های موجود را بصورت دایnamیک انتخاب می‌کند، و از آن برای ارسال اطلاعات استفاده می‌کند. انتخاب تجمعی کننده بر اساس الگوریتم مبتنی بر تئوری بازی و به‌گونه‌ای است که داده‌ها با تاخیر کمتری ارسال شده و بار در شبکه توزیع شود. در این روش در صورت خرابی تجمعی کننده، ارسال اطلاعات متوقف می‌شود.

در [۲۵] سعی شده یک زیرساخت قابل اطمینان و اقتصادی برای AMI فراهم شود. در این روش با استفاده از یک الگوریتم بهینه، در مورد تجمعی کننده‌های اضافی تصمیم‌گیری شده است. در این روش برای هر تجمعی کننده موجود بررسی شده است که آیا نیاز به یک تجمعی کننده پشتیبان دارد یا نه. در مدل رائے شده سعی شده در عین افزایش اطمینان شبکه، مسائل اقتصادی نیز در نظر گرفته شود. در برخی از روشها ساختار درختی برای اتصال تجمعی کننده‌ها ایجاد می‌شود. مثلاً در روش [۲۶] به منظور کاهش تاخیر، تجمعی کننده‌ها در یک ساختار درختی قرار می‌گیرند و هر تجمعی کننده بر اساس موقعیتی که دارد، با توجه به حداکثر تاخیر قابل تحمل داده‌ها، نسبت به تجمعی آنها تصمیم‌گیری می‌کند. با استفاده از یک مدل ریاضی در مورد سطح تجمعی داده‌ها تصمیم‌گیری می‌شود و ممکن است به منظور ارسال سریعتر داده‌ها، بدون تجمعی، ارسال شوند.

در برخی روشها مانند [۲۷] هر گره^۳ می‌تواند نقش تجمعی کننده را بازی کند. در این روش یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر RPL^۴ [۲۸]

توسط DAAP به تجمعی کننده مناسب ارسال می‌شوند و در آنجا پس از تجمعی به مرکز داده ارسال می‌شوند. انتخاب تجمعی کننده‌ای که بسته را دریافت می‌کند، بر اساس شرایط بسته و حالت سایر تجمعی‌ها انجام می‌گیرد. با توجه به محدودیت حافظه و پردازش تجمعی کننده‌ها، انتخاب تجمعی کننده باید بصورتی باشد که در عین برآورده کردن محدودیتهای ارسال بسته، از منابع شبکه نیز بصورت بهینه استفاده گردد.

در روش پیشنهادی به دلیل اختصاص پویای تجمعی کننده‌ها به کنتورهای هوشمند، در صورت خرابی هر کدام از تجمعی کننده‌ها، می‌توان به سرعت کنتورها را به یکی از تجمعی کننده‌های موجود متصل کرد.

برای مسیریابی تجمعی کننده‌ها نیز یک مدل ریاضی پیشنهاد شده است که سعی می‌کند تاخیر موجود در شبکه را کاهش دهد. با استفاده از الگوریتم مسیریابی ارائه شده و استفاده از امکانات سوئیچ‌های OpenFlow^۵، بهینه‌ترین مسیر برای تجمعی کننده‌ها پیدا شده و پهنای باند مورد نیاز آنها در طول مسیر رزرو می‌شود. این امر منجر به کاهش تاخیر در شبکه خواهد شد.

نوآوریهای ارائه شده را می‌توان در موارد زیر عنوان کرد:

- ارائه یک کاربرد جدید به عنوان تجمعی کننده مجازی برای AMI که با انتخاب پویای تجمعی کننده برای هر کنتور هوشمند، قابلیت اطمینان آن را افزایش داده و منابع شبکه را بصورت بهینه مورد استفاده قرار می‌دهد.

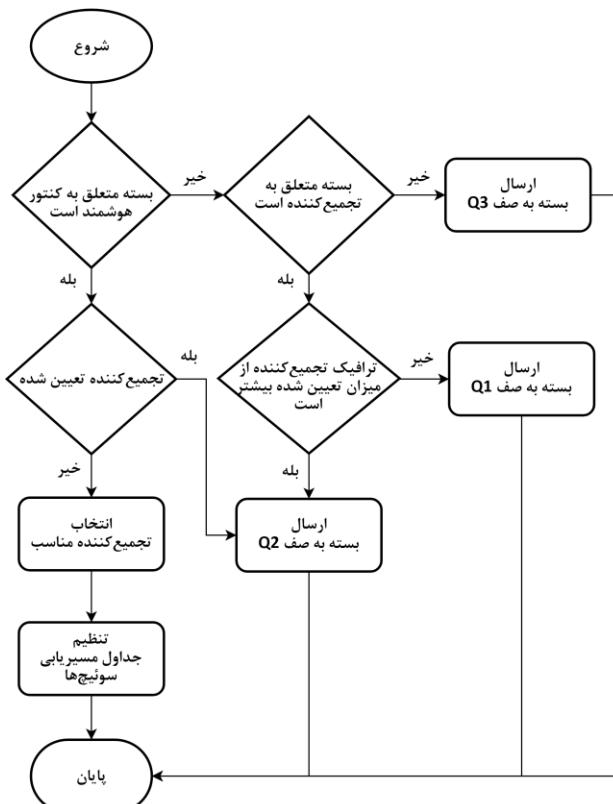
- ارائه یک مدل ریاضی عدد صحیح برای کمینه کردن تاخیر انتهای‌هایها موجود در شبکه که با در اختیار قراردادن سریعتر داده به مراکز کنترل باعث کاهش هزینه شبکه هوشمند برق می‌شود.

- ارائه یک مکانیزم مسیریابی و مدیریت صفات مناسب با نیازمندیهای AMI با استفاده از امکانات سوئیچ‌های OpenFlow که باعث رزرو شدن منابع در کل مسیر ارسال داده‌ها شده و پارامترهای کیفیت سرویس مورد نیاز جریانهای موجود در AMI را برآورده می‌کند.

۲- کارهای گذشته

کارهای بسیار زیادی به منظور طراحی زیرساخت AMI انجام شده است. در اکثر روشها سعی شده است تا در عین افزایش میزان بهره‌وری شبکه، اتصالات ایجاد شده بسیار قابل اطمینان باشند. بیشتر تمرکز روشهای مختلف بر روی تعیین محل، تعداد و نحوه عمل تجمعی کننده‌ها متمرکز شده است.

در برخی از روشها [۱۷-۱۴] از تجمعی کننده‌ها به منظور مدیریت عرضه و تقاضا استفاده شده است. در این روشها تجمعی کننده به عنوان واسطه بین کاربران و مراکز تولید بکار می‌رond. تجمعی کننده به کاربران کم می‌کند که مصرف خود را مدیریت کند. در تمام این روشها



شکل (۲): روندnamای روش پیشنهادی

۱-۳- انتخاب تجمعی کننده:

در مرحله اول از روش پیشنهادی، تجمعی کننده مناسب هر کنترول هوشمند باید انتخاب شود. تجمعی کننده‌ها به لحاظ قدرت محاسباتی و میزان حافظه، یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

در کنترل کننده شبکه SDN، یک کاربرد جدید با نام DAAP پیاده‌سازی شده است. DAAP دارای سه جزء با نامهای DCUpdate و DCRegister می‌باشد. هر تجمعی کننده به محض اتصال به شبکه باید در DAAP ها ثبت شود. مأذول DCRegister تجمعی کننده جدید را ثبت می‌کند و مأذول DCUpdate حالت فعلی تجمعی کننده‌ها را نگهداری می‌کند. تمام تجمعی کننده‌ها باید بطور پیوسته در بازه زمانی مشخص، حضور خود را در شبکه اعلام نمایند. در صورتی که یک تجمعی کننده بعد از گذشت زمان مشخص، حضور خود را اعلام نکند، واحد DCUpdate آن تجمعی کننده را خراب در نظر گرفته و از شبکه خارج می‌کند. واحد DCAssignment عملیات انتخاب تجمعی کننده مناسب و مسیریابی را انجام می‌دهد. الگوریتم انتخاب تجمعی کننده مناسب در الگوریتم ۱ بیان شده است.

جريان کار DAAP به شرح زیر است:

مرحله ۱: هنگامی که یک جریان جدید (از یک کنترول هوشمند) به سوئیچ وارد می‌شود که هیچ قانونی برای آن در جدول جریان موجود نیست، یک پیام Packet-in^۵ را به کنترل کننده ارسال می‌کند.

پیشنهاد شده است. هدف کاهش مصرف انرژی و جلوگیری از ازدحام می‌باشد. به منظور ایجاد گراف شبکه، میزان انرژی باقیمانده نیز در نظر گرفته شده است. هر گره در شبکه، بر اساس خصوصیات می‌تواند به عنوان تجمعی کننده انتخاب شود.

در روش [۲۹] اساس کار، تنظیم یک زمانسنج ارسال داده برای هر کنترول هوشمند می‌باشد تا به این ترتیب از احتمال تداخل در شبکه جلوگیری کرده و تاخیر را کاهش دهد. گره‌ها در یک ساختار درختی قرار گرفته و در زمانهای مشخص شده اقدام به ارسال داده می‌کنند. زمانسنج بر اساس موقعیت هر گره تعیین می‌شود. برای افزایش مقیاس پذیری، گره‌ها در گروههای مختلفی دسته بندی شده و برای هر گروه یک زمانسنج تعیین می‌شود.

در برخی دیگر از روشها [۳۰] به منظور افزایش قابلیت اطمینان، کنترولهای هوشمند، داده‌ها را به چندین تجمعی کننده ارسال می‌کنند تا به این ترتیب قابلیت اطمینان را افزایش دهند. این امر باعث افزایش سربار شبکه شده و باعث اتلاف پهنای باند شبکه می‌شود.

همانطور که در روشهای بیان شده مشخص است، نقش تجمعی کننده بسیار مهم می‌باشد و نقش کلیدی در ساختار AMI دارد. در تمام روشهای بیان شده، انتخاب تجمعی کننده بصورت ایستا و تنها یکبار انجام می‌شود. این امر دارای مشکلات فراوانی می‌باشد. اصلی‌ترین مشکل آن از بین رفتن تجمعی کننده می‌باشد. در صورتی که تجمعی کننده از بین برود، کنترولهای هوشمند متصل به آن قادر به ارسال بسته نمی‌باشند. از طرف دیگر ممکن است یک تجمعی کننده با حداقل توان خود بکار گرفته شود و تجمعی کننده دیگر بار کمی داشته باشد. در هیچ‌کدام از روشهای سعی در پخش بار در میان تجمعی کننده‌ها نشده است. در روش پیشنهادی به دلیل انتخاب پویای تجمعی کننده، این مشکلات مرتفع شده است. روش پیشنهادی در مقابل خطای نیز مقاوم است و قابلیت اطمینان مناسبی را برای شبکه ایجاد می‌کند. از طرف دیگر در مطالعات پیشین، روش مسیریابی مناسبی برای این زیرساخت دیده نشده است در حالی که نیازمندیهای کیفیت سرویس این زیرساخت بسیار متفاوت با سایر زیرساختها می‌باشد. در روش پیشنهادی الگوریتم مسیریابی ارائه شده است که با استفاده از امکانات سوئیچ‌های OpenFlow منابع مورد نیاز جریانهای متعلق به تجمعی کننده را در طول مسیر رزرو کرده و نیازمندیهای کیفیت سرویس آنها را برآورده می‌کند.

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی شامل دو مرحله می‌باشد. در مرحله اول، تجمعی کننده مناسب برای هر کنترول هوشمند تعیین می‌شود. در مرحله دوم عملیات مسیریابی انجام می‌گیرد و مسیریابی به گونه‌ای انجام می‌شود که تاخیر در شبکه کاهش یابد. در شکل ۲ روندnamای کلی روش پیشنهادی نمایش داده شده است.

در این الگوریتم، تجمعی کننده‌ها بر اساس میزان حافظه باقیمانده مرتب می‌شوند. سپس اولین تجمعی کننده‌ای که با تأخیر و قابلیت اطمینان در خواستی کنتور هوشمند مطابقت داشته باشد، انتخاب می‌شود و بهترین مسیر برای اتصال کنتور هوشمند به آن تجمعی کننده پیدا شده و مسیر در جداول سوچیج‌ها تنظیم می‌شود. به این ترتیب کنتور هوشمند به مناسبترین تجمعی کننده متصل می‌شود. با استفاده از این الگوریتم توازن بار در بین تجمعی کننده‌ها انجام می‌شود. قابلیت اطمینان اندازه گیری مشکل از دو بخش است: قابلیت اطمینان مسیر و قابلیت اطمینان تجمعی کننده. قابلیت اطمینان مسیر با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{path} = \prod_{i=1}^L (1 - f_i) \quad (1)$$

متغیر L نشان دهنده طول مسیر است و i احتمال شکست لینک می باشد.

٤ - الگوريتم مسیر پابي

بعد از انتخاب تجمعی کننده مناسب برای هر کنستور هوشمند، باید بهترین مسیر برای ارسال اطلاعات از هر تجمعی کننده به MDMS محاسبه شود. به منظور کاهش هزینه‌های تولید برق، داده‌های تجمعی کننده‌ها باید با کمترین تاخیر به MDMS ارسال شوند. بنابراین، در روش پیشنهادی، یک الگوریتم مسیریابی پیشنهاد شده است که تلاش می‌کند، برای تجمعی کننده‌ها، مسیری را با حداقل تاخیر به MDMS انتخاب کند. یکی از مهم ترین مسائل برای ارائه حداقل تاخیر، فراهم ساختن پهنای باند مورد نیاز هر تجمعی کننده می‌باشد. در روش پیشنهادی، با استفاده از یک مدل ریاضی، کوتاهترین مسیر از هر تجمعی کننده به MDMS محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از امکانات سوئیچ‌های OpenFlow، پهنای باند مورد نیاز برای هر تجمعی کننده در هر سوئیچ موجود در مسیر، رزرو می‌شود. رزرو منابع در طول مسیر باعث تضمین پارامترهای کیفیت سرویس برای جریانهای مر بوط به تجمعی کننده‌ها می‌شود.

مدل زیر برای محاسبه مسیر از هر تجمعی کننده به MDMS ارائه شده است:

$$\text{Min Max}_{(p,q) \in E} \left\{ \sum_{(i,j) \in E} d_{ij} y_{ij}^{pq} \right\} \quad (\textcircled{4})$$

$$\sum_{j \mid (i,j) \in E} y_{ij}^{pq} - \sum_{j \mid (j,i) \in E} y_{ji}^{pq} = 1 \quad \forall p,q \quad (\dagger)$$

$$\sum_{j \mid (i,j) \in E} y_{ij}^{pq} - \sum_{\substack{j \mid (j,i) \in E \\ \in Q, if i = p}} y_{ji}^{pq} = 0 \quad \forall p,q \quad (\text{F})$$

$$\sum_{(p,q) \in E} y_{ij}^{pq} R_{pq} \leq B_{ij} \quad \forall (i,j) \in E \quad (\Delta)$$

$$\sum_{(p,q) \in Q} y_{ij}^{pq} + y_{ji}^{pq} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in E \quad (8)$$

مرحله ۲: مازول DCassignment تجمعی کننده مناسب را انتخاب کرده و با پیام Flow-mod به سوئیچ پاسخ می دهد.

مرحله ۳: سوئیچ قانون جدید را در جدول جریان تنظیم می کند.

۲-۳- تخصیص تجمع‌کننده

با دریافت اولین بسته جریان از کنتور هوشمند، سوئیچ برای دریافت مسیر بعدی درخواستی را به کنترل کننده ارسال می‌کند. DAAP اطلاعات تمام تجمعی کننده‌ها را دارد. این اطلاعات شامل حافظه، قابلیت اطمینان و تاخیر هر تجمعی کننده می‌باشد.

تجمعی کننده مناسب، با توجه به نیازمندیهای جریان انتخاب می‌شود. روش پیشنهادی تلاش می‌کند جریان را به تجمعی کننده‌ای ارسال کند که بتواند نیازمندیهای جریان را پرآورده کند.

Algorithm 1 Find Best Aggregator for Flow i.

Require: *Packet-in* Message from new flow.

```

1: S = flow(i).source;
2: Ds = flow(i).delay;
3: R = flow(i).reliability;
4: Update (Live_Aggregator)
5: Sort_List=SortByRemainMemory(Live_Aggregator)
6: foreach(Aggregator j in Sort_List)
7:   if ((dsj + djMDMS) < Ds) and (RjRsjpath ≥ R)
8:     best_agg=j
9:     Break;
10:   End of if
11: End of foreach
12: Selected_agg=best_agg
13: out_path=Find_path(Selected_agg)
14: Set switches;

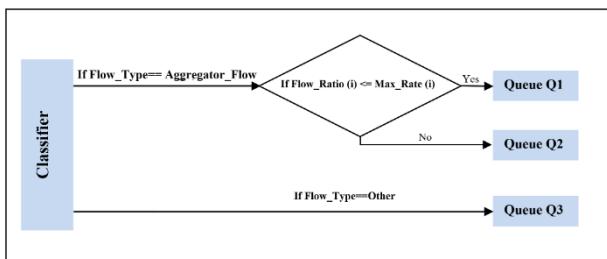
```

در ادامه جدول، یارامترهای استفاده شده آمده است.

جدول (1): پارامترهای الگوریتم ۱

$flow(i).source$	مبدأ جریان i
$flow(i).delay$	حداکثر تاخیر قابل تحمل جریان i
$flow(i).reliability$	میزان قابلیت اطمینان در خواستی جریان i
d_{sj}	تاخیر بین گره S و j
D_s	حداکثر تاخیر جریان s
R_s	میزان اعتماد مورد نیاز جریان s
R_{SJ}^{path}	میزان اطمینان لینک
out_path	مسیر ارسال جریان
R_j	میزان اطمینان گره j

صف q1 و q2 و q3. داده‌های مربوط به تجمعی کننده‌ها در صف q1 و q2 قرار می‌گیرند و داده‌های مربوط به ترافیکهای دیگر در صف q3 قرار می‌گیرند. تنظیمات برای هر صف به گونه‌ای انجام می‌شود که حداقل پهنای باند مورد نیاز برای جریانهای تولید شده توسط تجمعی کننده فراهم شود. این باعث کاهش تاخیر انتهاهای کاهش حذف بسته می‌شود.



شکل (۳): ساختار سوئیچ

با استفاده از Meter ها در سوئیچهای مبتنی بر OpenFlow، می‌توان نرخ جریان ورودی را کنترل کرد. با تنظیم پارامتر Max-Rate برای هر جریان، اگر نرخ جریان از مقدار آستانه تعريف شده بیشتر شود، بسته به تنظیمات، بسته‌ها حذف می‌شوند و یا به یک جدول دیگر برای پردازش بیشتر ارسال می‌شوند.

علاوه بر استفاده از Meter ها برای هر جریان، حداقل (Min-Rate) و حداکثر (Max-Rate-Service) پهنای باند برای هر صفحه را می‌توان مشخص کرد.

در روش پیشنهادی، یک Meter برای جریانهای ورودی به هر سوئیچ متعلق به تجمعی کننده‌ها تنظیم شده است. نرخ سرویس آن بر اساس پهنای باند کل محاسبه شده توسط تمام تجمعی کننده‌هایی است که از سوئیچ مربوطه برای ارسال داده‌های خود استفاده می‌کنند. اگر ترافیک ورودی از تجمعی کننده در هر سوئیچ بیش از مقدار مشخص شده برای آن باشد، ترافیک اضافی در صفحه q2 قرار خواهد گرفت. مقدار ترافیک ورودی به صفحه q2 برای تعیین ترافیک مورد نیاز تجمعی کننده‌ها در دوره بعدی محاسبه مسیر، استفاده می‌شود. این امر می‌تواند پهنای باند بیشتری را به تجمعی کننده‌ای اضافه کند که ترافیک بیشتری را تولید می‌کند و از حذف بسته‌ها جلوگیری کند.

در ادامه نحوه تنظیم و کاربرد هر صفحه شرح داده شده است:

صف q1 : جریان مربوط به تجمعی کننده‌ها در این صفحه قرار می‌گیرد. از دستورات OF-Config^{۱۰} برای تنظیم این صفحه استفاده شده است. پارامتر Min-Rate این صفحه معملاً مقدار کل پهنای باند مورد نیاز تمام تجمعی کننده‌هایی است که از این لینک استفاده می‌کنند. با تنظیم این پارامتر، این سوئیچ تلاش می‌کند حداقل به همان اندازه، از پهنای باند موجود را به جریان‌های این صفحه ارائه دهد. در نتیجه پهنای باند مورد نیاز هر تجمعی کننده تامین می‌شود و در تمام سوئیچ‌های موجود در مسیر رزرو می‌شود. همانطور که ذکر شد، این امر باعث کاهش تاخیر انتهاهای در شبکه می‌شود.

$$y_{ij}^{pq} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E, (p,q) \in Q \quad (7)$$

جدول (۲): پارامترهای مدل

y_{ij}^{pq}	اگر ۱ باشد، لینک (j,i) در مسیر بین p به q قرار می‌گیرد.
d_{ij}	(i,j)
R_{pq}	پهنای باند مورد نیاز از گره p به q
B_{ij}	پهنای باند لینک (i,j)

تابع هدف به گونه‌ای است که سعی می‌کند مسیری انتخاب کند که حداقل تاخیر در شبکه را به کمترین میزان برساند. این امر باعث کاهش تاخیر در شبکه خواهد شد و در نتیجه از اعمال هزینه به شبکه به جهت عدم استفاده از اطلاعات آرشیوی، جلوگیری می‌نماید.

مقدار $\sum_{(i,j) \in E} d_{ij} y_{ij}^{pq}$ میزان تاخیر مسیر از تجمعی کننده به مرکز کنترل را مشخص می‌کند. در تابع هدف سعی می‌شود حداقل این مقدار یا به عبارت دیگر تاخیر مسیر، حداقل شود. بعد از حل مدل در صورتیکه مقدار y برابر یک باشد، لینک (i,j) به عنوان یک لینک در MDMS مسیر از p به q انتخاب می‌شود. در این مدل q برابر با می‌باشد. معادله‌های ۳ و ۴ باعث می‌شوند لینکهای تشکیل دهنده مسیر بین منبع و مقصد، انتخاب شوند. معادله ۵ باعث می‌شود بیشتر از ظرفیت یک لینک استفاده نشود. این از سرریز شدن لینکها جلوگیری می‌کند.

برای حل مدل، تابع هدف به صورت زیر تغییر داده می‌شود و محدودیت (۹) به مجموعه محدودیتها اضافه می‌شود:

$$\text{Min } T \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} y_{ij}^{pq} d_{ij} \leq T \quad \forall (p,q) \in Q \quad (9)$$

با این تغییر، تابع Min Max به تابع Min تبدیل شده و حل آن ساده‌تر می‌شود. همانطور که مشخص است، مدل پیشنهادی یک مدل عدد صحیح و از نوع NP-Hard می‌باشد. به منظور حل مدل پیشنهادی از ابزار GLPK [۳۱] استفاده شده است. با حل مدل، مسیر مناسب از تمام تجمعی کننده به MDMS مشخص می‌شود.

پس از محاسبه مسیر توسط مدل ارائه شده، پهنای باند مورد نیاز برای هر تجمعی کننده در تمام سوئیچ‌های واقع در مسیر رزرو می‌شود. در نتیجه مسیرهای ایجاد شده، کمترین تاخیر را در طول عمر شبکه خواهند داشت. با توجه به اینکه تمام سوئیچ‌ها از نوع سوئیچ‌های OpenFlow می‌باشند، می‌توان به راحتی با استفاده از دستورات OpenFlow، پهنای باند مورد نیاز را در طول مسیر رزرو کرد. برای OpenFlow، در هر پورت خروجی سه صفحه ایجاد شده است (شکل ۳)، این منظور، در هر پورت خروجی می‌شود.

همانطور که مشخص است، قابلیت اطمینان، نقش مهمی در هزینه تولید برق دارد. با توجه به معادله ۱۴ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش قابلیت اطمینان می‌توان هزینه تولید را کاهش داد. از این‌رو با توجه به اینکه در روش پیشنهادی قابلیت اطمینان شبکه افزایش می‌یابد، هزینه تولید برق بسیار کاهش خواهد داشت. در ادامه قابلیت اطمینان در روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶- قابلیت اطمینان

در روش پیشنهادی وقتی یک تجمعی کننده یک کنتور هوشمند از بین برود، تجمعی کننده جدیدی برای آن انتخاب می‌شود. این امر باعث افزایش مقاومت شبکه در مقابل خطاهای افزایش قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. در روش‌های دیگر، هنگامی که تجمعی کننده نتواند کار کند، کنتورهای هوشمند متصل به آن نمی‌توانند اطلاعاتشان را به MDMS ارسال کنند. بنابراین تولید کنندگان باید از داده‌های قبلی برای برآورد تقاضای انرژی استفاده کنند. با توجه به معادله (۱۱)، این امر باعث افزایش هزینه تولید برق می‌شود.

در روش پیشنهادی زمانی که یک تجمعی کننده از بین برود، تجمعی کننده جدیدی انتخاب می‌شود و این عمل تا زمانی که حداقل یک تجمعی کننده وجود داشته باشد انجام می‌شود و همه تجمعی کننده‌های موجود می‌توانند به عنوان تجمعی کننده پشتیبان مورد استفاده قرار گیرند. در روش‌های فعلی، در مرحله اولیه راه اندازی شبکه، کنتورهای هوشمند به تجمعی کننده‌ها متصل می‌شوند و در طول عمر شبکه تغییر نمی‌کنند.

فرض کنید R_1 نشان دهنده قابلیت اطمینان یک تجمعی کننده باشد. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، با توجه به اینکه هر تجمعی کننده می‌تواند جایگزین تجمعی کننده از بین رفته شود، می‌توان تصور کرد که سیستمی مشتمل از چندین تجمعی کننده داریم که بصورت موازی در کنار هم قرار دارند، لذا قابلیت اطمینان هر تجمعی کننده در روش پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$R = 1 - (1 - R_1)^N \quad (15)$$

این در صورتی است که قابلیت اطمینان تجمعی کننده در روش فعلی برابر با R_1 است که همیشه کمتر از قابلیت اطمینان روش پیشنهادی است. این در مورد قابلیت دسترس پذیری نیز به همین شکل است. در زیرساخت فعلی، میزان دسترس پذیری هر تجمعی کننده بصورت زیر می‌باشد:

$$A(i) = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad (16)$$

که در آن :

$$\lambda = \text{آنگ از کار افتادن تجمعی کننده}$$

$$\mu = \text{آنگ تعمیر تجمعی کننده}$$

در نتیجه قابلیت دسترس پذیری روش پیشنهادی را می‌توان با استفاده از فرمول زیر محاسبه کرد :

صف q2 : در این صفحه، ترافیک سرریز تجمعی کننده‌ها قرار می‌گیرد. بر اساس میزان ترافیک ورود به این صفحه، پهنانی باند مورد نیاز برای هر تجمعی کننده می‌تواند در طول دوره بعدی تنظیم شود. با تنظیم پارامتر Max-Rate برای هر صفحه، حداکثر پهنانی باند اختصاص یافته به آن صفحه تعیین می‌شود. در روش پیشنهادی، این پارامتر به اندازه میزان ظرفیت لینک برای صفحه q2 تنظیم می‌شود. این بدان معنی است که اگر پهنانی باند تجمعی کننده‌ها بیش از مقدار پیش‌بینی شده باشند، می‌توانند داده‌های خود را با استفاده از پهنانی باند باقیمانده در مسیر، ارسال کنند.

صف q3 : داده‌های متعلق به سایر جریان‌ها در این صفحه قرار می‌گیرند. تنظیمات این صفحه شبیه به تنظیمات صفحه q2 است. مقدار پارامتر Max-Rate به میزان حداکثر پهنانی باند لینک تنظیم می‌شود. این اجازه می‌دهد پهنانی باند باقیمانده بین ترافیک سرریز تجمعی کننده‌ها و جریان‌های دیگر به اشتراک گذاشته شود.

۵- هزینه تولید برق

تجمعی کننده اطلاعات مصرف برق را از کنتورهای جمع‌آوری می‌کند و آنها را به MDMS می‌فرستند. تولید کنندگان تقاضای مصرف برق را با استفاده از این اطلاعات تخمین می‌زنند و رزرو منابع را با توجه به تقاضای برآورده شده انجام می‌دهند. هنگامی که یک تجمعی کننده نتواند اطلاعات را ارسال کند، میزان تقاضای برق نمی‌تواند توسط MDMS دریافت شود و تولید کنندگان از داده‌های قبلی برای محاسبه تقاضای برق استفاده می‌کنند. این می‌تواند منجر به محاسبه نادرست در تخمین تقاضای برق شود که می‌تواند باعث کمبود عرضه و یا تولید بیشتر از نیاز شود. [۲۵، ۱۲]. اگر تقاضای تخمینی بالاتر از تقاضای واقعی است، برق بیش از حد عرضه خواهد شد. از سوی دیگر، اگر تقاضای برآورده شده کمتر از مصرف واقعی باشد، کمبود برق افزایش خواهد یافت و در نتیجه، باید برق اضافی با قیمت بالاتری خریداری شود. هنگامی که یک تجمعی کننده از بین می‌رود، هزینه خطای تخمین تقاضای برق را می‌توان از [۲۵] بدست آورد.

$$C_c = C_o + C_u \quad (11)$$

C_o و C_u هزینه‌های برق بیشتر از عرضه و هزینه برق کمتر از عرضه می‌باشد که به ترتیب به شرح زیر محاسبه می‌شوند: [۲۵]

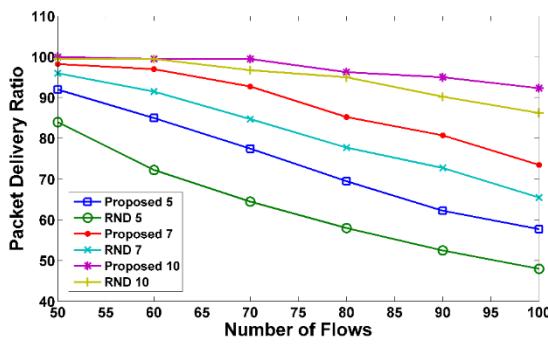
$$C_o = \int_0^E E - a f_A(a) p_{uc} da \quad (12)$$

$$C_u = \int_E^{Max} a - E f_A(a) p_{ed} da \quad (13)$$

بنابراین، هزینه شبکه می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$C_{net} = \sum_{i=1}^n (1 - R_i) C_c \quad (14)$$

در روش مسیریابی پیشنهادی پهنانی باند مورد نیاز تجمعی کننده‌ها در طول مسیر رزرو می‌شود. این امر باعث می‌شود میزان حذف بسته کاهش یابد و در نتیجه میزان تحویل بسته افزایش یابد. علاوه بر آن در روش پیشنهادی، جریان‌ها به تجمعی کننده مناسب مطابق با منابع باقیمانده تجمعی کننده اختصاص داده می‌شوند و کنترل کننده، بار را در بین تجمعی کننده‌ها توزیع می‌کند. بنابراین کل بار ارتباطی به درستی بر روی تجمعی کننده‌های موجود توزیع می‌شود. در نتیجه، در روش پیشنهادی با افزایش تعداد تجمعی کننده‌ها، نسبت تحویل بسته نیز در مقایسه با روش RND افزایش می‌یابد. بطور مثال همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، زمانی که تعداد کل تجمعی کننده‌ها ۵ است، میزان تحویل روش پیشنهادی ۵ (Proposed 5) از روش (RND 5) بیشتر است.



شکل (۴): نرخ تحویل بسته در مقابل تعداد جریان

۷-۲- سناریو دوم : بررسی میزان تاخیر انتهایه‌انتها
در سناریوی بعدی، تاخیر انتهایه‌انتها در تعداد جریان‌ها مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشخص است، با افزایش تعداد جریان‌ها، تعداد بسته‌های دریافتی کاهش می‌یابد و این موجب افزایش تاخیر انتهایه‌انتها در شبکه می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش تعداد تجمعی کننده‌ها، تاخیر انتهایه‌انتها کاهش می‌یابد. این به دلیل پخش ترافیک در شبکه می‌باشد. در شکل ۵، متوسط میزان تاخیر انتهایه‌انتها در تعداد مختلف تجمعی کننده نشان داده شده است. همانطور مشخص است، با افزایش تعداد جریان، تاخیر انتهایه‌انتها نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش تعداد تجمعی کننده‌ها (به عنوان مثال در روش پیشنهادی که تعدادی تجمعی کننده‌ها از ۵ تا ۷ تغییر می‌کنند Proposed 5، Proposed 7)، تاخیر انتهایه‌انتها کاهش می‌یابد.

در روش پیشنهادی، تاخیر انتهایه‌انتها یکی از پارامترهای انتخاب تجمعی کننده است. از سوی دیگر، در الگوریتم مسیریابی پیشنهادی، MDMS تجمعی کننده‌ها داده‌های خود را از کوتاه ترین مسیر به ارسال می‌کنند. این امر تاخیر انتهایه‌انتها را کاهش می‌دهد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، تاخیر بسته در روش پیشنهادی کمتر از روش RND است. در روش RND، تخصیص کنتور هوشمند به تجمعی کننده در زمان راه اندازی شبکه انجام می‌شود و تغییر نمی‌کند.

$$A = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A(i)) \quad (17)$$

همانطور که در معادله (۱۴) مشخص شده است، با توجه به افزایش قابلیت اطمینان شبکه و افزایش دسترسی‌پذیری، می‌توان نتیجه گرفت که هزینه تولید برق در زیرساخت شبکه پیشنهادی بسیار پایین‌تر از سایر روشها است.

۷- ارزیابی

در این بخش، روش پیشنهادی را ارزیابی کرده و آن را با روش‌های فعلی مقایسه می‌کنیم. در زیرساخت فعلی، در هنگام اتصال کنتور هوشمند، تجمعی کننده آن بطور ایستا انتخاب شده و در طول عمر شبکه تغییر نمی‌کند ازین‌رو برای پیاده‌سازی روش‌های فعلی، تجمعی کننده‌ها به طور ایستا و در ابتدای شبیه‌سازی به کنتورهای هوشمند متصل شده‌اند (RND). از شبیه‌ساز Mininet [۳۲] و RYU [۳۳] برای شبیه‌سازی استفاده شده است. توپولوژی شبیه‌سازی شامل ۵ سوئیچ و چند میزبان است. چندین میزبان، به عنوان تجمعی کننده عمل می‌کنند و میزبان‌های دیگر، رفتارهای کنتور هوشمند را شبیه‌سازی می‌کنند. کنتورهای هوشمند داده‌ها را به تجمعی کننده‌ها ارسال می‌کنند. یک MDMS در توپولوژی شبیه‌سازی وجود دارد. تجمعی کننده‌ها به طور مستقیم به سوئیچ‌ها متصل می‌شوند. شکل ۱ توپولوژی شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. برای محاسبه دسترسی‌پذیری، آهنگ تعمیر تجمعی کننده ۰.۱ و آهنگ از کار افتادن تجمعی کننده ۰.۰۰۱ در نظر گرفته شده است.

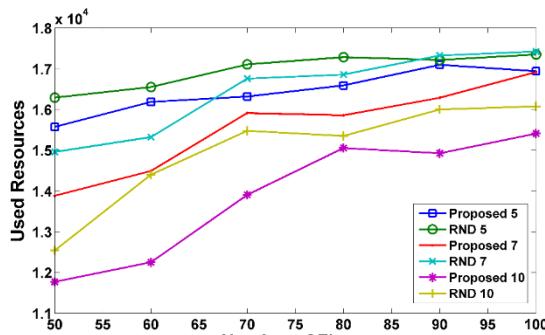
۷-۱- سناریو اول : بررسی نرخ دریافت بسته

یکی از پارامترهای مهم ارزیابی شبکه، نرخ تحویل بسته می‌باشد. بالا بودن این پارامتر نشان‌دهنده حذف کمتر بسته در شبکه و پخش بار بهتر در آن می‌باشد. لذا در اولین سناریو (شکل ۴)، تغییرات نرخ تحویل بسته مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی با تغییر تعداد جریان‌های ارسالی از کنتورهای هوشمند (با در نظر گرفتن تعداد متفاوتی از تجمعی کننده‌ها (۵، ۷ و ۱۰)، نرخ تحویل بسته، ارزیابی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تحویل بسته با افزایش جریان در شبکه کاهش می‌یابد. افزایش جریان منجر به افزایش ترافیک در شبکه می‌شود و میزان تحویل بسته را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر افزایش تعداد تجمعی کننده‌ها از ۵ تا ۷ تغییر می‌کند. شبکه می‌شود و بنابراین نسبت تحویل بسته را افزایش می‌دهد.

به عنوان مثال در روش پیشنهادی، زمانی که تعداد تجمعی کننده‌ها ۱۰ عدد می‌باشد (Proposed 10)، میزان تحویل بیشتر از حالتی است که تعداد تجمعی کننده‌ها ۵ است (Proposed 5).

۳-۳- سناریو سوم : بررسی میزان مصرف منابع

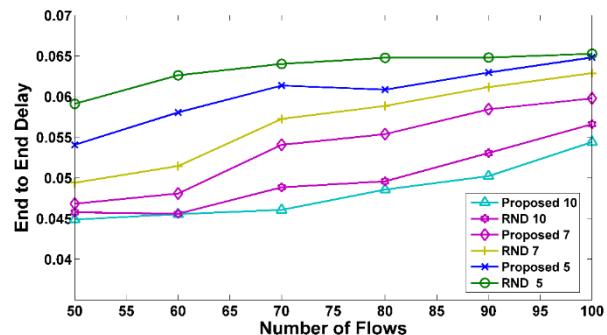
در سناریوی بعدی، میزان مصرف منابع تجمیع کننده‌ها با افزایش تعداد جریانها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش تعداد جریانها، منابع تجمیع کننده‌ها بیشتر استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، با افزایش تعداد تجمیع کننده‌ها به استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، با افزایش تعداد تجمیع کننده‌ها به دلیل اشتراک بار در میان آنها، مصرف منابع کاهش می‌یابد. بر اساس شکل ۸، در روش پیشنهادی، به دلیل توزیع بهتر ترافیک در کل تجمیع کننده، منابع کمتری از هر تجمیع کننده مصرف می‌شود.



شکل (۸): منابع مورد استفاده در مقابل تعداد جریان

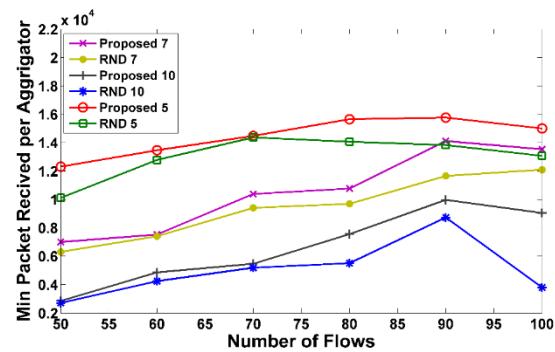
۴- سناریو چهارم : بررسی قابلیت اطمینان

در سناریوی بعدی، ما به بررسی قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی در هنگام خرابی تجمیع کننده می‌پردازیم. در روش پیشنهادی وقته‌یک تجمیع کننده از مدار خارج می‌شود، کنترل کننده یک تجمیع کننده مناسب دیگر را از میان تجمیع کننده‌های فعال انتخاب می‌کند و تغییرات لازم را در جداول سوئیچ‌ها به منظور جایگزینی تجمیع کننده خراب با تجمیع کننده جدید، انجام می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در ثانیه ۱۴۰، هنگامی که یک تجمیع کننده خراب می‌شود، برای چند لحظه، تاخیر افزایش می‌یابد و سپس مقدار تاخیر کمی بالاتر از مقدار قبل می‌رود. این عمل با حذف هر تجمیع کننده تکرار می‌شود. همانطوریکه نمودار نشان می‌دهد، مسیریابی مجدد جریان باعث ایجاد تاخیر می‌شود. در روش پیشنهادی هنگامی که یک تجمیع کننده از بین می‌رود ترافیک در سایر تجمیع کننده‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار تاخیر نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ پهنهای باند موجود در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با خرابی هر تجمیع کننده، به دلیل اختصاص کنتورهای هوشمند مرتبط به سایر تجمیع کننده‌ها، پهنهای باند موجود کاهش می‌یابد.

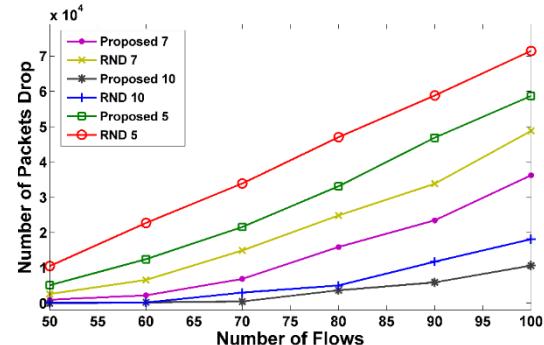


شکل (۵): تاخیر در مقابل تعداد جریان

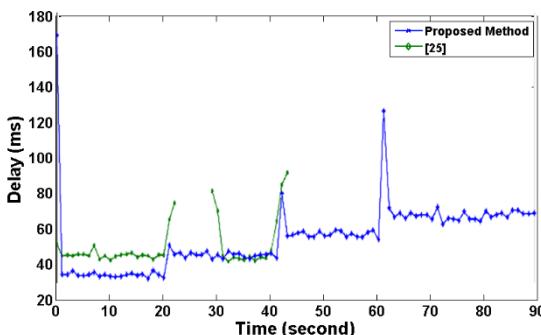
در شکل ۶، حداقل تعداد بسته‌های دریافتی در هر تجمیع کننده در مقایسه با تعداد جریان‌های ترافیکی نشان داده شده است. همانطور که می‌بینیم، روش پیشنهادی منصفانه است و جریان‌های ورودی به هر تجمیع کننده تقریباً یکسان است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در مقایسه با روش ایستا، روش پیشنهاد شده از نظر بهبود شبکه و توزیع ترافیک شبکه موثرتر است. از سوی دیگر، همانطور که در شکل ۷ نشان داده است، تعداد حذف بسته‌ها در روش پیشنهادی به دلیل رزرو منابع در طول مسیر و انتخاب کوتاه‌ترین مسیر برای هر تجمیع کننده، کمتر از روش تصادفی است که تأیید کننده بهبود عملکرد شبکه در رویکرد پیشنهادی است.



شکل (۶): حداقل تعداد بسته دریافتی در برابر تعداد جریان

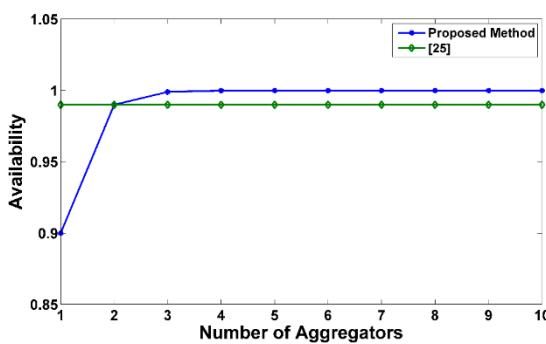


شکل (۷): تعداد حذف بسته در برابر تعداد جریان

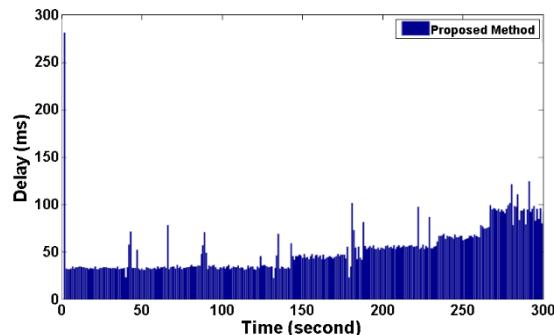


شکل (۱۱): تاخیر در برابر از بین رفتن تجمعی کننده

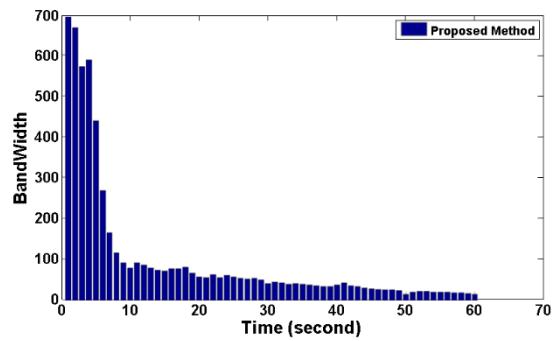
در ادامه دسترس پذیری روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۱۲ مشخص شده است، در روش پیشنهادی با افزایش تعداد تجمعی کننده‌ها، دسترس پذیری افزایش پیدا می‌کند. در روش پیشنهادی در صورتی که تجمعی کننده یک کنتور هوشمند از شبکه خارج شود، کنتور هوشمند به یکی از تجمعی کننده‌های موجود متصل می‌شود که این امر باعث افزایش دسترس پذیری در شبکه خواهد شد.



شکل (۱۲): دسترس پذیری در تعداد تجمعی کننده‌های مختلف



شکل (۹): تاخیر در برابر از بین رفتن تجمعی کننده



شکل (۱۰): پهنای باند در مقابل از بین رفتن تجمعی کنندها

در شکل ۱۱، تاخیر ایجاد شده در روش پیشنهادی با تاخیر ایجاد شده در روش [۲۵] مقایسه شده است. در روش [۲۵]، هر تجمعی کننده دارای یک پشتیبان است و در صورت خرابی آن، تجمعی کننده پشتیبان استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، روش پیشنهادی تاخیر ایجاد می‌شود. در این سناریو شبیه سازی، ابتدا در زمان ۲۰ و سپس در زمان ۴۰، یک تجمعی کننده از شبکه خارج می‌شود. در روش [۲۵]، در زمان ۲۰ ثانیه، زمانی که تجمعی کننده از شبکه خارج می‌شود، جریانهای متعلق به آن به تجمعی کننده پشتیبان منتقل می‌شوند. این زمان بستگی به زمان جایگزینی دارد که ما آن را ۱۰ ثانیه در نظر گرفته‌ایم. در روش پیشنهادی، چون کنترل کننده بلا فاصله یک تجمعی کننده دیگر را انتخاب می‌کند، تاخیر جابجایی جریان بسیار کم است. فرض کنید که تجمعی کننده پشتیبان نیز از شبکه خارج شود. در این وضعیت، در روش [۲۵]، کنторهای هوشمند دیگر قادر به ارسال بسته خود نیستند. برخلاف روش [۲۵]، در روش پیشنهادی در هنگام بروز خرابی در تجمعی کننده یک تجمعی کننده دیگر برای هر کنتور هوشمند انتخاب می‌شود.

۸- نتیجه گیری
یکی از قسمتهای شبکه هوشمند، زیرساخت AMI می‌باشد. ایجاد زیرساخت مطمئن و مقاوم در برابر خطا برای AMI تاثیر زیادی بر کارایی شبکه هوشمند برق و کاهش هزینه‌های تولید برق خواهد داشت. در این مقاله زیرساخت مبتنی بر SDN برای این شبکه پیشنهاد شده است. در زیرساخت پیشنهادی انتخاب تجمعی کننده بصورت پویا انجام می‌شود. این امر باعث می‌شود در صورت خرابی یکی از تجمعی کننده‌ها، ارتباط کنترورهای هوشمند از طریق تجمعی کننده دیگری انجام شود و مقاومت شبکه در برابر خطا افزایش یابد. از طرف دیگر انتخاب توزیع شده تجمعی کننده برای هر کنتور هوشمند، باعث پخش بار در شبکه و افزایش کارآیی شبکه خواهد شد.

همچنین در روش پیشنهادی به منظور کاهش تاخیر ارسال بسته‌ها به MDMS روش مسیریابی مبتنی بر کیفیت سرویس جدیدی به منظور محاسبه کوتاهترین مسیر، ارائه شده است. در روش مسیریابی، به منظور تامین پارامترهای کیفیت سرویس، از امکانات موجود در سوئیچ‌های OpenFlow استفاده شده و پهنای باند درخواستی جریانها

- [10] Saputro N, Akkaya K, Uludag S. A survey of routing protocol for smart grid communications. *Computer Networks* 2012; 56: 2742-2711.
- [11] Kabalci, Y. (2016). A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 302-318. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.114
- [12] Khan, R., & Khan, J. (2013). A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network. *Computer Networks*, 57(3), 825-845. doi: 10.1016/j.comnet.2012.11.002
- [13] Niyyato, D., Dong, Q., Wang, P., & Hossain, E. (2013). Optimizations of Power Consumption and Supply in the Smart Grid: Analysis of the Impact of Data Communication Reliability. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(1), 21-35. doi: 10.1109/tsg.2012.2224677
- [14] Gkatzikis, L., Koutsopoulos, I., & Salomidis, T. (2013). The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(7), 1247-1257. doi: 10.1109/jsac.2013.130708
- [15] Wu, C., Mousenian-Rad, H., & Huang, J. (2012). Vehicle-to-Aggregator Interaction Game. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 434-442. doi: 10.1109/tsg.2011.2166414
- [16] Vatanparvar, K., & Al Faruque, M. (2015). Design Space Exploration for the Profitability of a Rule-Based Aggregator Business Model within a Residential Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(3), 1167-1175. doi: 10.1109/tsg.2014.2380318
- [17] Lampropoulos, I., Baghina, N., Kling, W., & Ribeiro, P. (2013). A Predictive Control Scheme for Real-Time Demand Response Applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(4), 2049-2060. doi: 10.1109/tsg.2013.2257891
- [18] Tanakornpintong, S., Tangsunantham, N., Sangsuwan, T., & Pirak, C. (2017). Location optimization for data concentrator unit in IEEE 802.15.4 smart grid networks. *2017 17th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*. doi: 10.1109/iscit.2017.8261218
- [19] Rolim, G., Passos, D., Moraes, I., & Albuquerque, C. (2015). Modelling the Data Aggregator Positioning Problem in Smart Grids. *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*. doi: 10.1109/cit/dasc/picom.2015.90
- [20] Khalifa, T., Abdrabou, A., Naik, K., Alsabaan, M., Nayak, A., & Goel, N. (2014). Split- and Aggregated-Transmission Control Protocol (SA-TCP) for Smart Power Grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(1), 381-391. doi: 10.1109/tsg.2013.2279756
- [21] Rongxing Lu, Xiaohui Liang, Xu Li, Xiaodong Lin, & Xuemin Shen. (2012). EPPA: An Efficient and Privacy-Preserving Aggregation Scheme for Secure Smart Grid Communications. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 23(9), 1621-1631. doi: 10.1109/tpds.2012.86
- [22] Weiwei Jia, Haojin Zhu, Zhenfu Cao, Xiaolei Dong, & Chengxin Xiao. (2014). Human-Factor-Aware Privacy-Preserving Aggregation in Smart Grid. *IEEE Systems Journal*, 8(2), 598-607. doi: 10.1109/jsyst.2013.2260937
- [23] Bao, H., & Lu, R. (2015). A New Differentially Private Data Aggregation with Fault Tolerance for Smart Grid Communications. *IEEE Internet of Things Journal*, 2(3), 248-258. doi: 10.1109/jiot.2015.2412552
- [24] Mondal, A., & Misra, S. (2014). Dynamic data aggregator unit selection in smart grid: An evolutionary game theoretic approach. *2014 Annual IEEE India Conference (INDICON)*. doi: 10.1109/indicon.2014.7030614
- [25] Shi, Y., Qiu, X., & Guo, S. (2015). Genetic algorithm-based redundancy optimization method for smart grid communication network. *China Communications*, 12(8), 73-84. doi: 10.1109/cc.2015.7224708
- [26] Das, U., & Namboodiri, V. (2019). A Quality-Aware Multi-Level Data Aggregation Approach to Manage Smart Grid AMI Traffic. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 30(2), 245-256. doi: 10.1109/tpds.2018.2865937
- [27] Ullah, R., Faheem, Y., & Kim, B.-S. (2017). Energy and Congestion-Aware Routing Metric for Smart Grid AMI Networks in Smart City. *IEEE Access*, 5, 13799-13810. doi: 10.1109/access.2017.2728623

در طول مسیر رزرو می‌شود. به این ترتیب با در اختیار قراردادن منابع مورد نیاز برای هر مسیر، نرخ حذف بسته و تاخیر انتهاهای کاهش می‌یابد. علاوه بر این با ارائه الگوریتم صفت‌بندی مناسب، داده‌های متعلق به تجمعی کننده‌ها نسبت به سایر داده‌ها اولویت بالاتری پیدا کرده و سرویس بهتری دریافت می‌کنند.

زیرساخت ارائه شده با در نظر گرفتن نیازمندیهای شبکه AMI، باعث افزایش دسترسی‌پذیری و قابلیت اطمینان در شبکه شده و این امر منجر به کاهش هزینه تولید برق و افزایش پایداری شبکه برق می‌شود. برخلاف روش‌های قبلی، در روش پیشنهادی برای استفاده از مزایای مطرح شده باید از زیرساخت SDN استفاده شود، که این امر مستلزم تغییر زیرساخت فعلی شبکه می‌باشد. با توجه به افزایش گرایش به زیرساخت SDN و تولید تجاری سوئیچ‌های OpenFlow توسط شرکتهای مهم در حوزه شبکه، و تولید سوئیچ‌های ترکیبی که هم از OpenFlow پشتیبانی کرده و هم می‌توانند در ساختار فعلی استفاده شوند و وجود کنترل کننده‌های متن باز فراوان، توسعه ساختار SDN هزینه زیادی ندارد.

مراجع

- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944-980. doi: 10.1109/surv.2011.101911.00087
- Borenstein, S. (2005). The Long-Run Efficiency of Real-Time Electricity Pricing. *The Energy Journal*, 26(3). doi: 10.5547/issn0195-6574-ej-vol26-no3-5
- Jianchao Zhang, Boon-Chong Seet, Tek-Tjing Lie, & Chuan Heng Foh. (2013). Opportunities for Software-Defined Networking in Smart Grid. *2013 9th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*. doi: 10.1109/icics.2013.6782793
- Dorsch, N., Kurtz, F., Georg, H., Hagerling, C., & Wietfeld, C. (2014). Software-defined networking for Smart Grid communications: Applications, challenges and advantages. *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smartgridcomm)*. doi: 10.1109/smartgridcomm.2014.7007683
- Irfan, A., Taj, N., & Mahmud, S. (2015). A Novel Secure SDN/LTE Based Architecture for Smart Grid Security. *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*. doi: 10.1109/cit/dasc/picom.2015.112
- Sydney, A., Ochs, D., Scoglio, C., Gruenbacher, D., & Miller, R. (2014). Using GENI for experimental evaluation of Software Defined Networking in smart grids. *Computer Networks*, 63, 5-16. doi: 10.1016/j.comnet.2013.12.021
- Parra, G. D., Rad, P., & Choo, K. R. (2019). Implementation of deep packet inspection in smart grids and industrial Internet of Things: Challenges and opportunities. *Journal of Network and Computer Applications*, 135, 32-46. doi: 10.1016/j.jnca.2019.02.022
- Rinaldi, S., et al., (2018). Characterization of IP-Based Communication for Smart Grid Using Software-Defined Networking. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(10), 2410-2419. doi: 10.1109/TIM.2018.2831318
- Montazerolghaem, A., Yaghmaee Moghaddam, M., & Leon-Garcia, A. (2018). OpenAMI: Software-Defined AMI Load Balancing. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(1), 206-218. doi: 10.1109/jiot.2017.2778006

- [28] Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., & Alexander, R. (2012). RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. doi: 10.17487/rfc6550
- [29] Saputro, N., & Akkaya, K. (2017). Investigation of Smart Meter Data Reporting Strategies for Optimized Performance in Smart Grid AMI Networks. IEEE Internet of Things Journal, 4(4), 894–904. doi: 10.1109/jiot.2017.2701205
- [30] Ribeiro, I., Albuquerque, C., de A. Rocha, A., & Passos, D. (2019). THOR: A framework to build an advanced metering infrastructure resilient to DAP failures in smart grids. Future Generation Computer Systems, 99, 11–26. doi: 10.1016/j.future.2019.03.021
- [31] GLPK (GNU Linear Programming Kit). (n.d.). Retrieved from <https://www.gnu.org/software/glpk/>
- [32] Team, M. (2019). Mininet: An Instant Virtual Network on your Laptop (or other PC) - Mininet. Retrieved from <http://mininet.org>
- [33] Ryu SDN Framework. (2019). Retrieved from <https://osrg.github.io/ryu/>

Software Defined Network^۱

شبکه‌های نرم‌افزار محور : یکی از زیرساخت‌های جدید شبکه، شبکه‌های نرم افزار محور می‌باشند. ایده اصلی موجود در این زیرساخت، جذابیت قسمت کنترل از قسمت داده می‌باشد. در این نوع شبکه‌ها سمتگاههای ساده‌ای هستند که تنها بر اساس قوانین اعمال شده به آنها توسط واحد کنترل کننده، نسبت به ارسال بسته اقدام می‌نمایند. واحد کنترل کننده دید کلی از شبکه دارد و با استفاده از گراف شبکه اقدام به ایجاد قوانین انتقال بسته و اعمال آن در سوچیج‌ها می‌کند.

Advanced metering infrastructure^۲

زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند: یکی از بخش‌های مهم شبکه هوشمند برق، زیرساخت ارزیابی هوشمند می‌باشد. زیرساخت ارزیابی هوشمند به منظور اندازه‌گیری، جمع‌آوری و آنالیز داده‌های مربوط به مصرف برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. این زیرساخت شامل کنترلهای هوشمند و تجمعی کننده‌های داده می‌باشد. داده‌ها دریافتی که حاوی اطلاعات مصرف مشتریان می‌باشند، توسط کنترلهای هوشمند جمع‌آوری شده و سپس به تجمعی کننده‌ها و از آنجا به مرکز کنترل ارسال می‌شوند.

Meter Data Management System^۳

سیستمی است برای نگهداری و آنالیز داده‌های دریافتی از کنترلهای هوشمند. این داده‌ها در اختیار کاربردهای مختلف قرار داده می‌شوند.

OpenFlow^۴

پروتکل ارتباطی بین کنترل کننده شبکه SDN و سوچیج‌ها می‌باشد. کنترل کننده با استفاده از این پروتکل، سوچیج‌ها را مدیریت می‌کند.

Packet-in^۵

ساختار بسته‌ای است که از طرف سوچیج به کنترل کننده ارسال می‌شود. سوچیج زمانی که بسته‌ای را دریافت می‌کند که برای ارسال آن قانونی در جدول جریان موجود نمی‌باشد، با ارسال این بسته به کنترل کننده، درخواست عمل مناسب را انجام می‌دهد.

Flow-mod^۶

کنترل کننده برای تغییر در جداول سوچیج، از این ساختار بسته استفاده می‌کند.

OF-Config^۷

مخفف OpenFlow Configuration and Management Protocol می‌باشد و به مجموعه قوانین گفته می‌شود که مکانیزم مدیریت سوچیج توسط کنترل کننده را مشخص می‌کند.