ارائه چارچوب جدیدی برای افزایش پایداری زیرساخت اندازه گیری شبکه‌های هوشمند برق

محمد رضائی[1] ، دانشجوی دکتری، محمد حسین یغمایی مقدم [2]، 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 می‌باشد. زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند به منظور اندازه‌گیری، جمع‌آوری و آنالیز داده‌های مربوط به مصرف برق، مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های کنتورهای هوشمند در تجمیع‌کننده‌های میانی، تجمیع شده و از آنجا به مرکز مدیریت داده‌ها ارسال می‌شوند. تجمیع‌کننده‌ها نقش بسیار حیاتی در زیرساخت اندازه‌گیری هوشمند دارند. داده‌های تجمیع‌کننده‌ها باید از مسیرهای با کمترین تاخیر ارسال شوند. زمانی که یک تجمیع‌کننده با خطا مواجه شود، تمام ترافیکهای ارسالی توسط آن، از بین خواهند 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 تجمیع‌کننده‌های موجود در شبکه، اختصاص می‌دهد. در ساختار پیشنهادی در هر کنترل‌کننده یک تجمیع‌کننده مجازی وجود دارد که به عنوان یک کاربرد در کنترل‌کننده شبکه نرم‌افزار محور قرار می‌گیرد. این تجمیع‌کننده مجازی، کنتورهای هوشمند را بر اساس نیازمندیهای درخواستی به تجمیع‌کننده‌های 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 تجمیع‌کننده‌ها 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.

واژه های کلیدی: شبکه‌های هوشمند برق، تجمیع‌کننده ، 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

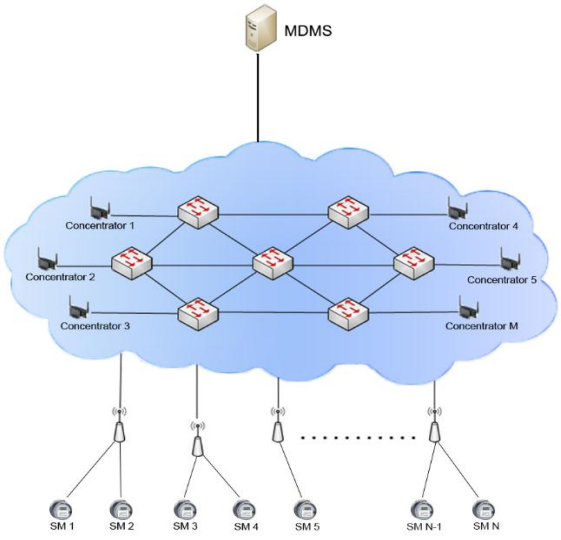
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

۱- مقدمه

شبکه‌های هوشمند برق، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این شبکه‌ها، ارتباط دوطرفه‌ای بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان برقرار می‌گردد[۱]. تولیدکننده‌گان بر اساس اطلاعات دریافتی از شبکه، قیمت و تولید برق را کنترل‌کرده 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 درشبکه 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 جغرافیایی وسیع، پیچیدگی مدیریت شبکه و عملکردهای متنوع را می‌توان به عنوان بخشی از این چالشها نام برد. برای رفع این چالشها، روشهای متفاوتی بیان شده است که یکی از جدیدترین آنها استفاده از ساختار شبکه‌های نرم‌افزار محور [۱](SDN) می‌باشد[۳-۶]. 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 [۲](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 تجمیع‌کننده‌های داده می‌باشد. داده‌های حاوی اطلاعات مصرف مشتریان، توسط کنتورهای هوشمند جمع‌آوری شده و سپس به تجمیع‌کننده‌ها ارسال می‌شوند. تجمیع‌کننده‌ها بسته‌های دریافتی را به مراکز داده [۳](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

اندازه بسته‌های ارسالی از چند بایت تا چندین بایت می‌باشند 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 تجمیع کرد و با این عمل از سربار سرآیند بسته‌ها کاسته خواهد شد. عمل تجمیع توسط تجمیع‌کننده‌ها در شبکه انجام می‌شود و سپس داده‌ها به MDMS ارسال می‌شوند.

با توجه به محدودیت حافظه و پردازشی تجمیع‌کننده‌ها و نیاز به ارسال سریع اطلاعات مصرف، تعداد تجمیع‌کننده‌ها 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 پهنای‌باند مورد نیاز جریانهای ایجاد شده توسط تجمیع‌کننده‌ها را فراهم سازد. از طرف دیگر ، باید احتمال خرابی تجمیع‌کننده‌ها و یا از بین رفتن مسیر در نظر گرفته شود. در صورت خرابی تجمیع‌کننده 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 تجمیع‌کننده‌ها متصل می‌شوند. این تخصیص به‌گونه‌ای انجام می‌شود که هر تجمیع‌کننده 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 تجمیع‌کننده‌ها و از بین رفتن مسیر نیز مقاوم می‌باشد. در صورت خرابی تجمیع‌کننده، کنتورهای متصل به تجمیع‌کننده خراب شده، به سایر تجمیع‌کننده‌های موجود اختصاص می‌یابند.

اساس روش پیشنهادی استفاده از زیرساخت SDN می‌باشد. SDN، 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 کنترل‌کننده کاربرد جدیدی به نام DAAP[۲] پیاده‌سازی شده است. این کاربرد در حقیقت یک تجمیع‌کننده مجازی می‌باشد. بسته‌ها دریافتی از کنتورهای هوشمند

[۱] Dynamic
[۲] Data Aggrigator Application

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

توسط DAAP به تجمیع‌کننده مناسب ارسال می‌شوند و در آنجا پس از تجمیع به مرکز داده ارسال می‌شوند. انتخاب تجمیع‌کننده‌ای که بسته را دریافت می‌کند، بر اساس شرایط بسته و حالت سایر تجمیع‌ها انجام می‌گیرد. با توجه به محدودیت حافظه و پردازش تجمیع‌کننده‌ها، انتخاب تجمیع‌کننده باید بصورتی باشد که در عین برآورده‌کردن محدودیتهای ارسال بسته، از منابع شبکه نیز بصورت بهینه استفاده گردد.

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

برای مسیریابی تجمیع‌کننده‌ها 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[۴] ، بهینه‌ترین مسیر برای تجمیع‌کننده‌ها پیدا شده و پهنای‌باند 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 تجمیع‌کننده مجازی برای AMI که با انتخاب پویای تجمیع‌کننده 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 انتهابه‌انتها 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 صف متناسب 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 تجمیع‌کننده‌ها متمرکز شده است.

در برخی از روشها [۱۴-۱۷] از تجمیع‌کننده‌ها به منظور مدیریت عرضه و تقاضا استفاده شده است. در این روشها تجمیع‌کننده به عنوان واسط بین کاربران و مراکز تولید بکار می‌روند. تجمیع‌کننده به کاربران کمک می‌کند که مصرف خود را مدیریت کنند. در تمام این روشها تعداد تجمیع‌کننده‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در برخی دیگر از روشها [۱۸-۱۹] سعی شده بهترین مکان برای قراردهی تجمیع‌کننده‌ها، قبل از راه‌اندازی شبکه، انتخاب شود. در هر کدام از این روشها بر اساس پارامترهای مختلف، الگوریتمی جهت قراردهی تجمیع‌کننده پیشنهاد شده است بطور مثال در [۱۸] محل تجمیع‌کننده 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 تجمیع کرده و درقالب یک اتصال TCP اطلاعات آنها را ارسال می‌کند. در این روش تمام کنتورهای هوشمند با تجمیع‌کننده اتصال TCP برقرار می‌کنند. تجمیع‌کننده با تجمیع 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 تجمیع‌کننده ،کنتورهای هموشمند، دیگر قادر به برقرار اتصال با MDMS نمی‌باشند. در برخی از روشها [۲۱-۲۳] تجمیع داده‌ها بصورت امن مورد توجه قرار داده شده است.

در اکثر روشها داده‌های ارسالی با استفاده از یک الگوریتم رمزنگاری، رمز شده و سپس ارسال می‌شوند. در [۲۴] هر کنتور هوشمند در ابتدای اتصال، یکی از تجمیع‌کننده‌های موجود را بصورت داینامیک انتخاب می‌کند، و از آن برای ارسال اطلاعات استفاده می‌کند. انتخاب تجمیع‌کننده 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 تجمیع‌کننده، 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 تجمیع‌کننده‌های اضافی تصمیم‌گیری شده است. در این روش برای هر تجمیع‌کننده موجود بررسی شده است که آیا نیاز به یک تجمیع‌کننده پشتیبان دارد یا نه. در مدل ارائه شده سعی شده در عین افزایش اطمینان شبکه ، مسائل اقتصادی نیز در نظر گرفته شود.

در برخی از روشها ساختار درختی برای اتصال تجمیع‌کننده‌ها ایجاد می‌شود. مثلا در روش [۲۶] به منظور کاهش تاخیر، تجمیع کننده‌ها در یک ساختار درختی قرار می‌گیرند و هر تجمیع‌کننده بر اساس موقعیتی که دارد، با توجه به حداکثر تاخیر قابل تحمل داده‌ها، نسبت به تجمیع آنها تصمیم‌گیری می‌کند. با استفاده از یک مدل ریاضی در مورد سطح تجمیع داده‌ها تصمیم‌گیری می‌شود و ممکن است به منظور ارسال سریعتر داده‌ها، بدون تجمیع، ارسال شوند.

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

[۳] Node

[۴] Routing Protocol for Low-Power

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

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 تجمیع‌کننده انتخاب شود.

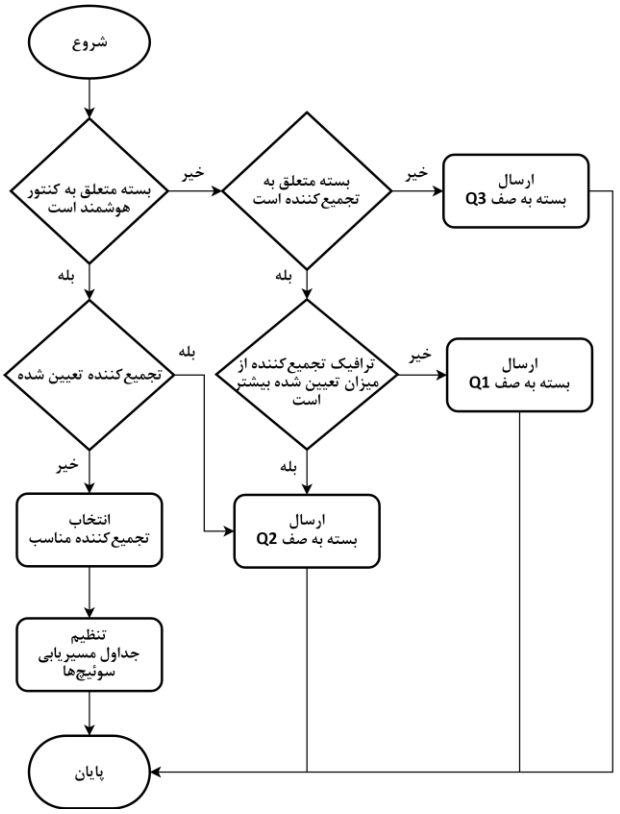
در روش [۲۹] اساس کار، تنظیم یک زمانسنج ارسال داده برای هر کنتور هوشمند می‌باشد تا به این ترتیب از احتمال تداخل در شبکه جلوگیری کرده و تاخیر را کاهش دهد. گره‌ها در یک ساختار درختی قرار گرفته و در زمانهای مشخص شده اقدام به ارسال داده می‌کنند. زمانسنج بر اساس موقعیت هر گره تعیین می‌شود. برای افزایش مقیاس 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، کنتورهای هوشمند، داده‌ها را به چندین تجمیع‌کننده ارسال می‌کنند تا به این ترتیب قابلیت اطمینان را افزایش دهند. این امر باعث افزایش سربار شبکه شده و باعث اتلاف پهنای‌باند شبکه می شود.

همانطور که در روشهای بیان شده مشخص است، نقش تجمیع‌کننده بسیار مهم می‌باشد و نقش کلیدی در ساختار AMI دارد. در تمام روشهای بیان شده، انتخاب تجمیع‌کننده بصورت ایستا و تنها یکبار انجام می‌شود. این امر دارای مشکلات فراوانی می‌باشد. اصلی‌ترین مشکل آن از بین‌رفتن تجمیع‌کننده می‌باشد. در صورتی که تجمیع‌کننده از بین برود، کنتورهای هوشمند متصل به آن قادر به ارسال بسته نمی‌باشند. از طرف دیگر ممکن است یک تجمیع‌کننده با حداکثر توان خود بکار گرفته شود و تجمیع‌کننده دیگر بار کمی داشته باشد. در هیچکدام از روشها سعی در پخش بار در میان تجمیع‌کننده‌ها نشده است. در روش پیشنهادی به دلیل انتخاب پویای تجمیع‌کننده، این مشکلات مرتفع شده است. روش پیشنهادی در مقابل خطا 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 تجمیع‌کننده‌ها 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، تجمیع‌کننده مناسب برای هر کنتور هوشمند تعیین می‌شود. در مرحله دوم عملیات مسیریابی انجام می‌گیرد و مسیریابی به‌گونه‌ای انجام می‌شود که تاخیر در شبکه کاهش یابد. در شکل ۲ روندنمای کلی روش پیشنهادی نمایش داده شده است.



شکل (۲): روندنمای روش پیشنهادی

۳-۱- انتخاب تجمیع‌کننده :

در مرحله اول از روش پیشنهادی، تجمیع‌کننده مناسب هر کنتور هوشمند باید انتخاب شود. تجمیع‌کننده‌ها به لحاظ قدرت محاسباتی و میزان حافظه، یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

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

جریان کار DAAP به شرح زیر است:

مرحله ۱: هنگامی که یک جریان جدید (از یک کنتور هوشمند) به سوئیچ وارد می‌شودکه هیچ قانونی برای آن در جدول جریان موجود نیست، یک پیام Packet-in[۵] را به کنترل‌کننده ارسال می‌کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

مرحله ۲: ماژول DCassignment تجمیع‌کننده مناسب را انتخاب کرده و با پیام Flow-mod[۶] به سوئیچ پاسخ می‌دهد.
مرحله ۳: سوئیچ قانون جدید را در جدول جریان تنظیم می‌کند.

۳-۲- تخصیص تجمیع‌کننده

با دریافت اولین بسته جریان از کنتور هوشمند، سوئیچ برای دریافت مسیر بعدی درخواستی را به کنترل‌کننده ارسال می‌کند. DAAP اطلاعات تمام تجمیع‌کننده‌ها را دارد. این اطلاعات شامل حافظه، قابلیت اطمینان و تاخیر هر تجمیع‌کننده می‌باشد.
تجمیع‌کننده مناسب، با توجه به نیازمندیهای جریان انتخاب می‌شود. روش پیشنهادی تلاش می‌کند جریان را به تجمیع‌کننده‌ای ارسال کند که بتواند نیازمندیهای جریان را برآورده کند.
ماژول DCassignment ، تجمیع‌کننده دلخواه را بر اساس الگوریتم زیر انتخاب می‌کند (تعداد تجمیع‌کننده‌ها n در نظر گرفته می‌شود):

Algorithm 1 Find Best Aggregator for Flow i.

Require: *Packet-in* Message from new flow.
1: S = *flow(i).source*;
2: D_s = *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** $\left(\left(\boldsymbol{d}_{Sj} + \boldsymbol{d}_{jMDMS}\right) < D_s\right) and (R_j R_{SJ}^{path} \geq R)$
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 پارامترهای استفاده شده آمده است.

جدول (۱): پارامترهای الگوریتم ۱

مبدا جریان i	*flow(i).source*
حداکثر تاخیر قابل تحمل جریان i	*flow(i).delay*
میزان قابلیت اطمینان درخواستی جریان i	*flow(i).reliability*
تاخیر بین گره S و j	d_{Sj}
حداکثر تاخیر جریان S	D_s
میزان اعتماد مورد نیاز جریان S	R_S
میزان اطمینان لینک	R_{SJ}^{path}
مسیر ارسال جریان	*out_ path*
میزان اطمینان گره j	R_j

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

$$R_{path} = \prod_{i=1}^{L}(1 - f_i) \qquad (۱)$$

متغییر L نشان دهنده طول مسیر است و f_i احتمال شکست لینک می‌باشد.

۴- الگوریتم مسیریابی

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

$$\text{Min Max}_{(p,q)\in E}\{\sum_{(i,j)\in E} d_{ij} y_{ij}^{pq}\} \qquad (۲)$$

$$\sum_{j\,|\,(i\,j)\in E} y_{ij}^{pq} - \sum_{j\,|\,(j\,i)\in E} y_{ji}^{pq} = 1 \quad \forall\, p,q \in Q\,, if\ i = p \qquad (۳)$$

$$\sum_{j\,|\,(i\,j)\in E} y_{ij}^{pq} - \sum_{j\,|\,(j\,i)\in E} y_{ji}^{pq} = 0 \quad \forall\, p,q \in Q\,, i(\neq p,q) \in V \qquad (۴)$$

$$\sum_{(p,q)\in Q} y_{ij}^{pq} R_{pq} \leq B_{ij} \qquad \forall\,(i,j) \in E \qquad (۵)$$

$$y_{ij}^{pq} + y_{ji}^{pq} \leq 1 \qquad \forall\,(i,j) \in E \qquad (۶)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

$$y_{ij}^{pq} \in \{0,1\} \quad \forall (i\,j) \in E\,, (p,q) \in Q \qquad (۷)$$

جدول (۲): پارامترهای مدل

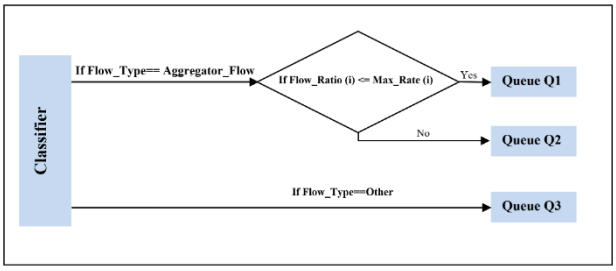
اگر ۱ باشد، لینک (i,j) در مسیر بین p به q قرار می‌گیرد.	y_{ij}^{pq}
تاخیر لینک (i,j)	$d_{i\,j}$
پهنای‌باند مورد نیاز از گره p به q	R_{pq}
پهنای‌باند لینک (i,j)	B_{ij}

تابع هدف به‌گونه‌ای است که سعی می‌کند مسیری انتخاب کند که حداکثر 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 تجمیع‌کننده به مرکز کنترل را مشخص می‌کند. در تابع هدف سعی می‌شود حداکثر 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 مسیر از p به q انتخاب می شود. در این مدل q برابر با MDMS می‌باشد. معادله‌های ۳و 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:

$$Min\ T \qquad (۸)$$

$$\sum_{(i,j)\in E} y_{ij}^{pq} d_{ij} \le T \qquad \forall\,(p,q) \in Q \qquad (۹)$$

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 تجمیع‌کننده به MDMS مشخص می‌شود.
پس از محاسبه مسیر توسط مدل ارائه شده، پهنای‌باند مورد نیاز برای هر تجمیع‌کننده 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 این منظور، در هر پورت خروجی سه صف ایجاد شده است (شکل ۳)، صف q1، q2 و q3. داده‌های مربوط به تجمیع‌کننده‌ها در صف q1 و q2 قرار می گیرند و داده‌های مربوط به ترافیکهای دیگر در صف q3 قرار می‌گیرند. تنظیمات برای هر صف به‌گونه‌ای انجام می‌شود که حداقل پهنای‌باند مورد نیاز برای جریانهای تولید شده توسط تجمیع‌کننده فراهم شود . این باعث کاهش تاخیر انتهابه‌انتها و 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 تعریف 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-Service) و حداکثر (Max-Rate-Service) پهنای باند برای هر صف را می‌توان مشخص کرد.
در روش پیشنهادی، یک Meter برای جریانهای ورودی به هر سوئیچ متعلق به تجمیع‌کننده‌ها تنظیم شده است. نرخ سرویس آن بر اساس پهنای‌باند کل محاسبه شده توسط تمام تجمیع‌کننده‌هایی است که از سوئیچ مربوطه برای ارسال داده‌های خود استفاده می‌کنند. اگر ترافیک ورودی از تجمیع کننده در هر سوئیچ بیش از مقدار مشخص شده برای آن باشد، ترافیک اضافی در صف q2 قرار خواهد گرفت. مقدار ترافیک ورودی به صف q2 برای تعیین ترافیک مورد نیاز تجمیع‌کننده‌ها در دوره بعدی محاسبه مسیر، استفاده می‌شود. این امر می‌تواند پهنای‌باند بیشتری را به تجمیع کننده‌ای اضافه کند که ترافیک بیشتری را تولید می‌کند و از حذف بسته‌ها جلوگیری کند.
در ادامه نحوه تنظیم و کاربرد هر صف شرح داده شده است:
صف q1 : جریان مربوط به تجمیع‌کننده‌ها در این صف قرار می‌گیرد. از دستورات OF-Config[۷] برای تنظیم این صف استفاده شده است. پارامتر Min-Rate این صف معادل مقدار کل پهنای‌باند مورد نیاز تمام تجمیع‌کننده‌هایی است که از این لینک استفاده می‌کنند. با تنظیم این پارامتر، این سوئیچ تلاش می کند حداقل به همان اندازه، از پهنای باند موجود را به جریان‌های این صف ارائه دهد. در نتیجه پهنای‌باند مورد نیاز هر تجمیع‌کننده تامین می‌شود و در تمام سوئیچ‌های موجود در مسیر رزرو می‌شود. همانطور که ذکر شد، این امر باعث کاهش تاخیر انتهابه‌انتها در شبکه می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

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

صف q3 : داده‌های متعلق به سایر جریان‌ها در این صف قرار می گیرند. تنظیمات این صف شبیه به تنظیمات صف q2 است. مقدار پارامتر Max-Rate به میزان حداکثر پهنای‌باند لینک تنظیم می‌شود. این اجازه می‌دهد پهنای‌باند باقیمانده بین ترافیک سرریز تجمیع‌کننده‌ها و جریان‌های دیگر به اشتراک گذاشته شود .

۵- هزینه تولید برق

تجمیع‌کننده اطلاعات مصرف برق را از کنتورهای جمع‌آوری می‌کند و آنها را به MDMS می فرستند. تولیدکنندگان تقاضای مصرف برق را با استفاده از این اطلاعات تخمین می زنند و رزرو منابع را با توجه به تقاضای برآورد شده انجام می‌دهند. هنگامی که یک تجمیع‌کننده نتواند اطلاعات را ارسال کند، میزان تقاضای برق نمی‌تواند توسط MDMS دریافت شود و تولیدکنندگان از داده‌های قبلی برای محاسبه تقاضای برق استفاده می‌کند. 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 برآورد 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 تجمیع‌کننده از بین می‌رود ، هزینه خطای تخمین تقاضای برق را می‌توان از [۲۵] بدست آورد.

$$C_c = C_o + C_u \quad (۱۱)$$

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]:

$$C_o = \int_0^E E - a\, f_A(a)\, p_{uc}\, da \quad (۱۲)$$

$$C_u = \int_E^{Max} a - E\, f_A(a)\, p_{ed}\, da \quad (۱۳)$$

بنابراین، هزینه شبکه می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$C_{net} = \sum_{i=1}^{n} (1 - R_i) C_C \quad (۱۴)$$

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 تجمیع‌کننده یک کنتور هوشمند از بین برود، تجمیع‌کننده جدیدی برای آن انتخاب می‌شود. این امر باعث افزایش مقاومت شبکه در مقابل خطاها و افزایش قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. در روشهای دیگر، هنگامی که تجمیع‌کننده نتواند کار کند، کنتورهای هوشمند متصل به آن نمی‌توانند اطلاعاتشان را به MDMS ارسال کنند. بنابراین تولیدکنندگان باید از داده های 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 تجمیع‌کننده از بین برود، تجمیع‌کننده جدیدی انتخاب می‌شود و این عمل تا زمانی که حداقل یک تجمیع‌کننده وجود داشته باشد انجام می‌شود و همه تجمیع‌کننده‌های موجود می‌توانند به عنوان تجمیع‌کننده پشتیبان مورد استفاده قرار گیرند. در روشهای فعلی، در مرحله اولیه راه اندازی شبکه، کنتورهای هوشمند به تجمیع‌کننده‌ها متصل می‌شوند و در طول عمر شبکه تغییر نمی‌کنند.

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

$$R = 1 - (1 - R_1)^N \quad (۱۵)$$

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

$$A(i) = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad (۱۶)$$

که در آن :

λ = آهنگ از کار افتادن تجمیع‌کننده

μ= آهنگ تعمیر تجمیع‌کننده

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

$$A = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - A(i)) \quad (۱۷)$$

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

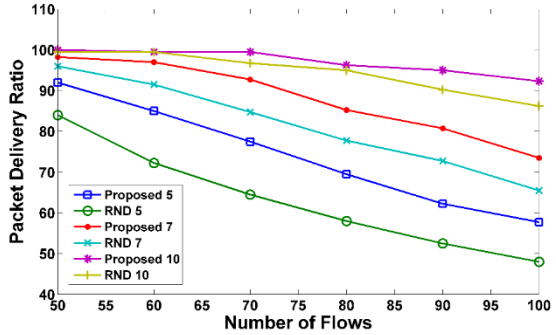
۷- ارزیابی

در این بخش، روش پیشنهادی را ارزیابی کرده و آن را با روشهای فعلی مقایسه می‌کنیم. در زیرساخت فعلی، در هنگام اتصال کنتور هوشمند، تجمیع‌کننده آن بطور ایستا انتخاب شده و در طول عمر شبکه تغییر نمی‌کند ازینرو برای پیاده‌سازی روشهای فعلی، تجمیع‌کننده‌ها به طور ایستا و در ابتدای شبیه‌سازی به کنتورهای هوشمند متصل شده‌اند (RND). از شبیه ساز Mininet [۳۲]، کنترل‌کننده RYU [۳۳] و OpenFlow 1.3 برای شبیه سازی استفاده شده است. توپولوژی شبیه سازی شامل ۵ سوئیچ و چند میزبان است. چندین میزبان، به عنوان تجمیع‌کننده عمل می‌کنند و میزبان های دیگر، رفتارهای کنتور هوشمند را شبیه سازی می‌کنند. کنتورهای هوشمند داده‌ها را به تجمیع‌کننده‌ها ارسال می‌کنند. یک MDMS در توپولوژی شبیه سازی وجود دارد. تجمیع‌کننده‌ها به طور مستقیم به سوئیچ‌ها متصل می‌شوند. شکل ۱ توپولوژی شبکه مورد استفاده در شبیه سازی را نشان می‌دهد. برای محاسبه دسترس‌پذیری، آهنگ تعمیر تجمیع‌کننده ۰.۱ و آهنگ از کار افتادن تجمیع‌کننده ۰.۰۰۱ در نظر گرفته‌شده 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 تجمیع‌کننده‌ها (۵، ۷ و ۱۰)) ، نرخ تحویل بسته، ارزیابی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تحویل بسته با افزایش جریان در شبکه کاهش می یابد. افزایش جریان منجر به افزایش ترافیک در شبکه می‌شود و میزان تحویل بسته را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر افزایش تعداد تجمیع‌کننده‌ها منجر به توزیع بار بر روی شبکه می‌شود و بنابراین نسبت تحویل بسته را افزایش می‌دهد.
به عنوان مثال در روش پیشنهادی، زمانی که تعداد تجمیع‌کننده‌ها ۱۰ عدد می‌باشد (Proposed 10)، میزان تحویل بیشتر از حالتی است که تعداد تجمیع‌کننده‌ها ۵ است (Proposed 5).

در روش مسیریابی پیشنهادی پهنای‌باند مورد نیاز تجمیع‌کننده‌ها 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، جریان ها به تجمیع کننده مناسب مطابق با منابع باقیمانده تجمیع‌کننده اختصاص داده می‌شوند و کنترل‌کننده، بار را در بین تجمیع‌کننده‌ها توزیع می کند. بنابراین کل بار ارتباطی به درستی بر روی تجمیع‌کننده‌های موجود توزیع می‌شود. در نتیجه، در روش پیشنهادی با افزایش تعداد تجمیع‌کننده‌ها، نسبت تحویل بسته نیز در مقایسه با روش RND افزایش می‌یابد. بطور مثال همانطور که درشکل ۴ مشاهده می‌شود، زمانی که تعداد کل تجمیع‌کننده‌ها ۵ است، میزان تحویل روش پیشنهادی (Proposed 5) از روش RND (RND 5) بیشتر است.

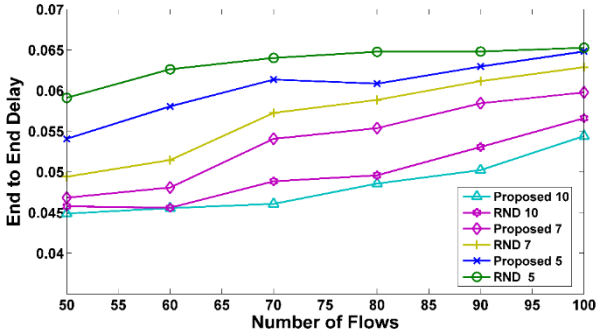


شکل (۴): نرخ تحویل بسته در مقابل تعداد جریان

۷-۲- سناریو دوم : بررسی میزان تاخیر انتهابه‌انتها

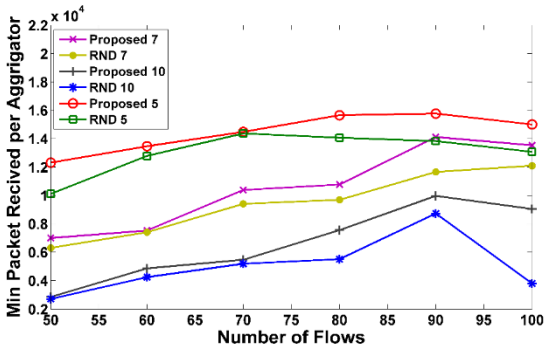
در سناریوی بعدی، تاخیر انتهابه‌انتها در تعداد جریان‌ها مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشخص است، با افزایش تعداد جریان‌ها ، تعداد بسته‌های دریافتی کاهش می‌یابد و این موجب افزایش تاخیر انتهابه‌انتها در شبکه می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش تعداد تجمیع‌کننده‌ها، تاخیر انتهابه‌انتها کاهش می‌یابد. این به دلیل پخش ترافیک در شبکه می‌باشد. در شکل ۵، متوسط میزان تاخیر انتهابه‌انتها در تعداد مختلف تجمیع‌کننده نشان داده شده است. همانطور مشخص است، با افزایش تعداد جریان، تاخیر انتهابه‌انتها نیز افزایش می یابد. از سوی دیگر، با افزایش تعداد تجمیع‌کننده‌ها (به عنوان مثال در روش پیشنهادی که تعدادی تجمیع‌کننده‌ها از ۵ تا ۷ تغییر می‌کنند (Proposed 5، Proposed 7)، تاخیر انتهابه‌انتها کاهش می‌یابد.
در روش پیشنهادی، تاخیر انتهابه‌انتها یکی از پارامترهای انتخاب تجمیع کننده است. از سوی دیگر، در الگوریتم مسیریابی پیشنهادی، تجمیع‌کننده‌ها داده‌های خود را از کوتاه ترین مسیر به MDMS ارسال می‌کنند. این امر تاخیر انتهابه‌انتها 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 تجمیع‌کننده در زمان راه اندازی شبکه انجام می‌شود و تغییر نمی‌کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

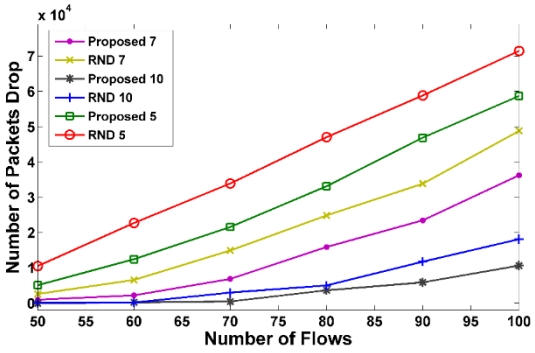


شکل (۵): تاخیر در مقابل تعداد جریان

در شکل ۶، حداقل تعداد بسته‌های دریافتی در هر تجمیع‌کننده در مقایسه با تعداد جریان های ترافیکی نشان داده شده است. همانطور که می بینیم، روش پیشنهادی منصفانه است و جریان‌های ورودی به هر تجمیع کننده تقریبا یکسان است. همانطور که نتایج نشان می دهد، 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 شده 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.



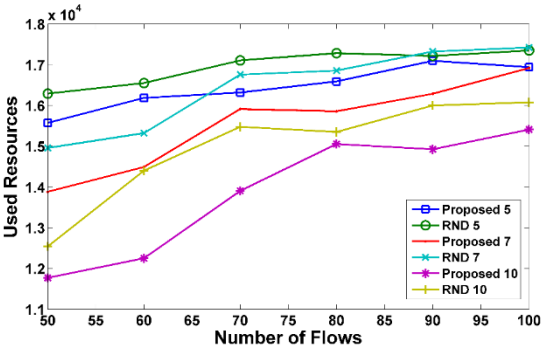
شکل (۶): حداقل تعداد بسته دریافتی در برابر تعداد جریان



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

۷-۳- سناریو سوم : بررسی میزان مصرف منابع

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

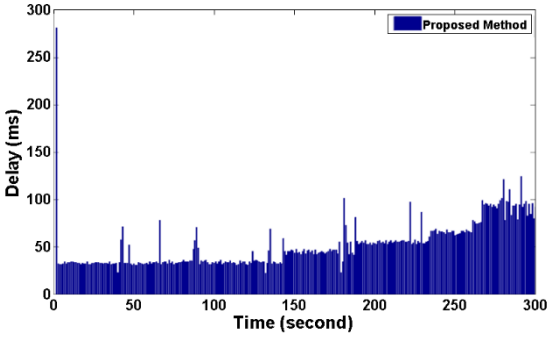


شکل (۸): منابع مورد استفاده در مقابل تعداد جریان

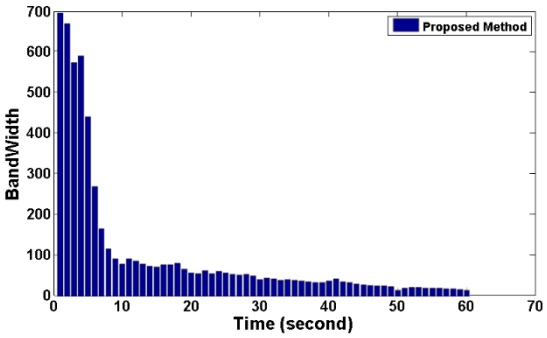
۷-۴- سناریو چهارم : بررسی قابلیت اطمینان

در سناریوی بعدی، ما به بررسی قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی در هنگام خرابی تجمیع‌کننده می پردازیم. در روش پیشنهادی وقتی یک تجمیع‌کننده از مدار خارج می‌شود، کنترل‌کننده یک تجمیع‌کننده مناسب دیگر را از میان تجمیع کننده‌های فعال انتخاب می کند و تغییرات لازم را در جداول سوئیچ‌ها به منظور جایگزینی تجمیع‌کننده خراب با تجمیع‌کننده 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 می یابد و سپس مقدار تاخیر کمی بالاتر از مقدار قبل می رود. این عمل با حذف هر تجمیع‌کننده تکرار می‌شود. همانطوریکه نمودار نشان می‌دهد، مسیریابی مجدد جریان باعث ایجاد تاخیر می‌شود. در روش پیشنهادی هنگامی که یک تجمیع‌کننده از بین می‌رود ترافیک در سایر تجمیع‌کننده‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار تاخیر نیز افزایش می یابد. شکل ۱۰ پهنای‌باند موجود در زمان های مختلف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با خرابی هر تجمیع‌کننده، به دلیل اختصاص کنتورهای هوشمند مرتبط به سایر تجمیع‌کننده‌ها، پهنای‌باند موجود کاهش می‌یابد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

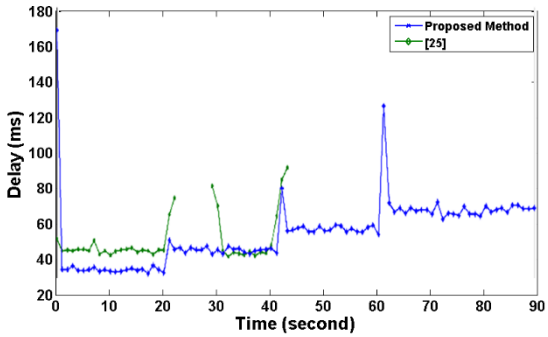


شکل (۹): تاخیر در برابر از بین رفتن تجمیع‌کننده



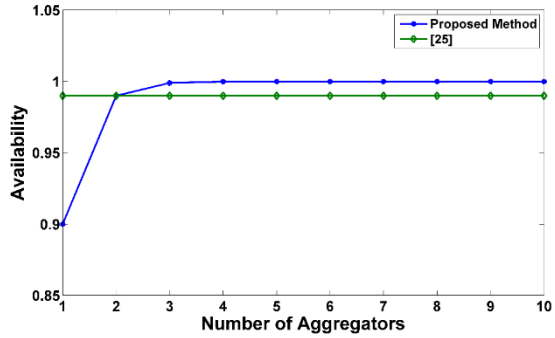
شکل (۱۰): پهنای‌باند در مقابل از بین رفتن تجمیع‌کنندها

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



شکل (۱۱): تاخیر در برابر از بین رفتن تجمیع‌کننده

در ادامه دسترس‌پذیری روش پیشنهادی مورد بررسی قرارگرفته است. همانطور که در شکل ۱۲ مشخص شده است، در روش پیشنهادی با افزایش تعداد تجمیع‌کننده‌ها، دسترس‌پذیری افزایش پیدا می‌کند. در روش پیشنهادی در صورتی که تجمیع‌کننده یک کنتور هوشمند از شبکه خارج شود، کنتور هوشمند به یکی از تجمیع‌کننده‌های موجود متصل می‌شود که این امر باعث افزایش دسترس‌پذیری در شبکه خواهد شد.



شکل (۱۲): دسترس‌پذیری در تعداد تجمیع‌کننده‌های مختلف

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 تجمیع‌کننده بصورت پویا انجام می‌شود. این امر باعث می‌شود در صورت خرابی یکی از تجمیع‌کننده‌ها، ارتباط کنتورهای هوشمند از طریق تجمیع‌کننده دیگری انجام شود و مقاومت شبکه در برابر خطا افزایش یابد. از طرف دیگر انتخاب توزیع شده تجمیع‌کننده 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 پهنای‌باند درخواستی جریانها

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

در طول مسیر رزرو می‌شود. به این ترتیب با در اختیار قراردادن منابع مورد نیاز برای هر مسیر، نرخ حذف بسته و تاخیر انتهابه‌انتها کاهش می‌یابد. علاوه بر این با ارائه الگوریتم صف‌بندی مناسب، داده‌های متعلق به تجمیع‌کننده‌ها 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 دسترس‌پذیری 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 کنترل‌کننده‌های متن باز فراوان، توسعه ساختار SDN هزینه زیادی ندارد.

مراجع

[1] 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

[2] 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

[3] 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

[4] 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

[5] 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/iucc/dasc/picom.2015.112

[6] 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.bjp.2013.12.021

[7] 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

[8] 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

[9] 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

[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] Niyato, 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., & Salonidis, 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., Mohsenian-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/iucc/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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]

[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/

[۱] Software Defined Network

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

[۲] Advanced metering infrastructure

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 کنتورهای هوشمند و تجمیع‌کننده‌های داده می‌باشد. داده‌ها دریافتی که حاوی اطلاعات مصرف مشتریان می‌باشند، توسط کنتورهای هوشمند جمع‌آوری شده و سپس به تجمیع‌کننده‌ها و از آنجا به مرکز کنترل ارسال می شوند.

[۳] Meter Data Management System

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

[۴] OpenFlow

پروتکل ارتباطی بین کنترل‌کننده شبکه SDN و سوئیچ‌ها می‌باشد. کنترل‌کننده با استفاده از این پروتکل، سوئیچ‌ها را مدیریت می‌کند.

[۵] Packet-in

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

[۶] Flow-mod

کنترل‌کننده برای تغییر در جداول سوئیچ، از این ساختار بسته استفاده می‌کند.

[۷] OF-Config

مخفف OpenFlow Configuration and Management Protocol می‌باشد و به مجموعه قوانینی گفته می‌شود که مکانیزم مدیریت سوئیچ توسط کنترل‌کننده را مشخص می‌کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.3.8]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.10]