

# ارائه روشی برای دریافت داده حسگر بی سیم توسط مشتری وب از طریق دروازه اینترنت اشیا مبتنی بر پروتکل CoAP

محمد رضا نیک سرشت، سیدحمید حاج سیدجوادی و مهدی ملامطلبی

بین‌المللی IETF<sup>۴</sup>، استاندارد جهت استفاده از IPv6<sup>۵</sup> در شبکه‌های بی‌سیم پراتلاف کم‌توان با عنوان 6LoWPAN<sup>۶</sup> ارائه شده است. این استاندارد استفاده از IPv6 را روی شبکه‌های LLN<sup>۷</sup> مانند شبکه‌های مبتنی بر IEEE 802.15.4<sup>۸</sup> امکان‌پذیر می‌سازد. یکی از مزیت‌های شبکه مبتنی بر IP روی LLN، امکان پذیردن استفاده از سرویس‌های استاندارد معماری وب در لایه کاربرد آنهاست که باعث می‌شود اشیا بتوانند نه تنها با اینترنت بلکه با وب هم مجتمع<sup>۹</sup> شوند و از طریق پروتکل‌های وب، با یکدیگر مرتبط گردند که این مجتمع‌سازی، وب اشیا (WoT)<sup>۱۰</sup> نامیده می‌شود [۲].

در دنیای اینترنت/وب اشیا<sup>۱۱</sup>، امکان اتصال به حسگرهای بی‌سیم از طریق وب وجود داشته و دایره وسیعی از کاربردها را شامل می‌شود. نمونه‌هایی از این کاربردها، اعمال مدیریت انسانی روی مجموعه حسگرهای بی‌سیم از طریق صفحه وب و همچنین بررسی وضعیت بیمار از راه دور از طریق اطلاعات ارسالی توسط حسگرهای متصل به بدن بیمار هستند. از طرف دیگر، پروتکل‌های سنتی تحت وب مانند HTTP<sup>۱۱</sup> پروتکل‌هایی نیستند که برای اجرا روی دستگاه‌هایی با منابع پردازشی و حافظه محدود مناسب باشند. برای مثال، پروتکل HTTP روی ارتباطات پایدار و مطمئن TCP<sup>۱۲</sup> کار می‌کند در صورتی که ارتباطات روی شبکه‌های بی‌سیم، لزوماً پایدار نمی‌باشند. حسگرهای بی‌سیم معمولاً با باتری کار می‌کنند و دارای حافظه و توان پردازش پایین می‌باشند و از این رو پشتیبانی از پروتکل‌های تحت وب برای آنها پرهزینه است. لذا IETF نسخه سبک‌شده‌ای از HTTP را با عنوان CoAP<sup>۱۳</sup> معرفی کرده که شامل یک پروتکل اختصاصی انتقال وب برای استفاده روی گره‌ها<sup>۱۴</sup> و شبکه‌های محدود<sup>۱۵</sup> است [۳].

دروازه اینترنت اشیا<sup>۱۶</sup> مجموعه تجهیزات و کنترل‌های (نرم‌افزاری و سخت‌افزاری) دسترسی بین شبکه حسگر و اینترنت است و در نقش یک پل میان آنها عمل می‌کند [۴]. همچنین پراکسی<sup>۱۷</sup> یک نرم‌افزار است که

چکیده: پیشرفت فناوری در حوزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم و امکان استفاده از پروتکل اینترنت در اشیا کوچک با منابع محدود (مانند حسگرها)، چشم‌انداز اینترنت را تغییر داده است. نحوه تعامل و روش‌های تبادل اطلاعات یکی از چالش‌های دنیای اینترنت اشیا است. استانداردهای 6LoWPAN و CoAP جهت استفاده از پروتکل‌های تحت وب در شبکه‌های حسگر پراتلاف و کم‌توان (LLN) ارائه شده‌اند. پشته پروتکل 6LoWPAN/CoAP دسترسی به شبکه حسگر را از طریق پروتکل‌های وب امکان‌پذیر می‌کند. این امر، توسعه برنامه‌های کاربردی روی شبکه حسگر و دسترسی به آنها توسط اینترنت را تسهیل می‌نماید. هر کدام از لایه‌های پشته پروتکل 6LoWPAN/CoAP، میزانی سربار بر پیام‌های تبادل‌شونده تحمیل می‌کنند و سربار داده ناشی از آن، در شبکه‌های چندگامی، مصرف انرژی را تشدید می‌کند. در این مقاله، روشی جهت کاهش سربار تحمیلی به بسته‌های کوچک و متوسط در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر 6LoWPAN/CoAP با استفاده از زمان‌بندی و تجمیع بسته‌های CoAP روی گره‌های حسگر آمده است. جهت حصول اهداف تحقیق، تمهیداتی نظیر رده‌بندی درخواست‌ها/پاسخ‌های CoAP از لحاظ اولویت ارسال در شبکه (مشخص‌سازی حداکثر تأخیر مجاز)، مدیریت زمان‌بندی و تجمیع پیام‌های دریافتی روی گره‌های حسگر (بر اساس حداکثر تأخیر مجاز هر کدام) و بازشدن پیام‌های تجمیع‌شده در مقصد انجام گرفته است. نتایج ارزیابی روش پیشنهادی، حاکی از کاهش مصرف انرژی و ترافیک شبکه برای کاربردهایی نظیر نظارت در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر پشته پروتکل 6LoWPAN/CoAP است.

کلیدواژه: اینترنت اشیا، CoAP، 6LoWPAN، چندگامی، مصرف انرژی، IEEE 802.15.4، کاهش ترافیک، تجمیع.

## ۱- مقدمه

شبکه‌های بی‌سیم کم‌توان و با اتلاف بالا نوعی از شبکه هستند که در آنها، مسیریاب‌ها همانند گره‌هایی که به آنها متصل می‌باشند از نظر توان پردازشی، حافظه و منبع تغذیه (معمولاً باتری) دارای محدودیت هستند. از مشخصه‌های ارتباطی آنها می‌توان نرخ بالای از دست دادن<sup>۱</sup> ارتباطات و اطلاعات، نرخ پایین داده<sup>۲</sup> و ناپایداری<sup>۳</sup> ارتباط را نام برد [۱]. توسط سازمان

این مقاله در تاریخ ۱۲ اسفند ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۲ بهمن ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

محمد رضا نیک سرشت، گروه کامپیوتر، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران، (email: nikseresht@buiniau.ac.ir).

سیدحمید حاج سیدجوادی، گروه کامپیوتر، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران، (email: h.s.javadi@shahed.ac.ir).

مهدی ملامطلبی (نویسنده مسئول)، گروه کامپیوتر، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران، (email: motalebi@qiau.ac.ir).

1. High Loss Rates
2. Low Data Rates
3. Instability

4. Internet Engineering Task Force

5. IP Version 6

6. IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Network

7. Low Power and Lossy Network

8. Integrate

9. Web of Things

10. W/IoT

11. Hyper Text Transfer Protocol

12. Transmission Control Protocol

13. Constrained Application Protocol

14. Nodes

15. Constraint Network

16. IoT Gateway

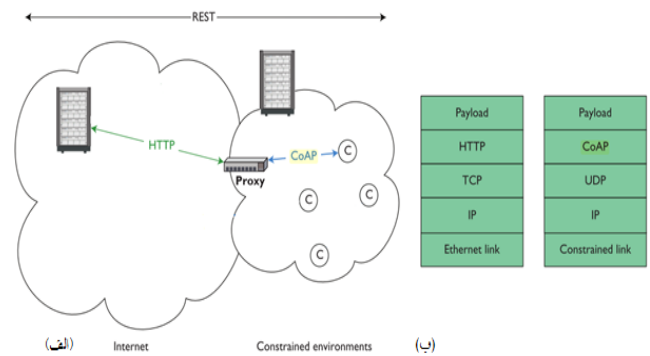
17. Proxy

پیام‌های دریافتی روی گره‌های حسگر (بر اساس حداکثر تأخیر مجاز هر کدام) و بازشدن پیام‌های تجمیع‌شده در مقصد، انجام خواهد گرفت. مقاله در ادامه شامل موارد زیر است: در بخش دوم، مفاهیم و پیشینه موضوع تحقیق مرور می‌گردد. روش پیشنهادی این تحقیق در بخش سوم معرفی شده و در بخش چهارم، نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی با نتایج روش‌های پیشین مقایسه شده و میزان حصول اهداف تحقیق، تحت ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان، فصل پنجم مقاله را نتیجه‌گیری می‌نماید.

## ۲- پیشینه تحقیق

اینترنت اشیا شبکه‌ای است که اشیای قابل شناسایی به صورت منحصربه‌فرد<sup>۸</sup> را به اینترنت وصل می‌کند که این اشیا دارای قابلیت سنجش/تحریک<sup>۹</sup> و برنامه‌ریزی بالقوه<sup>۱۰</sup> می‌باشند. به‌واسطه بهره‌برداری از قابلیت شناسایی منحصربه‌فرد و سنجش، اطلاعات مرتبط با اشیا می‌تواند جمع‌آوری شده و یا وضعیت آنها از هر جایی و در هر زمانی، به‌وسیله هر چیزی تغییر کند [۷]. پروتکل CoAP توسط گروه کاری CoRE<sup>۱۱</sup> از IETF معرفی شد که هدف آن پشتیبانی از وب در شبکه‌هایی با منابع محدود است که کمینه‌کردن مصرف انرژی در آنها حیاتی است [۸]. CoAP جایگزین ساده‌شده‌ای برای HTTP جهت اتصال اشیا با منابع محدود به وب است [۹]. با توجه این که CoAP ساده‌شده پروتکل HTTP است می‌توان به‌واسطه یک پراکسی عبوری ساده، با تغییرات کوچکی در ساختار درخواست‌ها و پاسخ‌ها، متقاضیان تحت وب را به شبکه حسگر وصل نمود. شکل ۱- الف این ارتباط را به‌صورت ساده‌شده نشان می‌دهد.

CoAP مبتنی بر معماری REST<sup>۱۲</sup> است که در آن، دسترسی به منابع (مانند حسگر دما یا رطوبت) توسط متدهای HTTP (PUT، POST، GET، DELETE) و از طریق URI<sup>۱۳</sup> صورت می‌پذیرد [۱۱]. در معماری REST، منبع یک مفهوم انتزاعی است که تحت کنترل خدمتگذار است. خدمتگذار در اینجا سرور CoAP است که جهت نصب روی حسگر طراحی شده و از طریق آن و منطبق با پروتکل CoAP می‌توان به منابع حسگر دسترسی پیدا کرد. در پروتکل ارتباطی در لایه کاربرد باید محدودیت‌های شبکه حسگر مانند محدودیت در سبب بسته‌ها<sup>۱۴</sup> و محدودیت پهنای باند را در نظر گرفت. معمولاً CoAP روی شبکه‌های بی‌سیم محلی و شخصی با نرخ پایین تبادل اطلاعات (LR-WPANs) استفاده می‌شود. برای مثال اگر همانند شکل ۲- ب در لایه فیزیکی<sup>۱۶</sup> و مک<sup>۱۷</sup> (MAC) پروتکل IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ وجود داشته باشد به ازای هر بسته ارسالی، کمتر از ۱۲۷ بیت داده می‌توان داشت [۱۲]. لذا اگر سربار لایه‌های بالاتر مانند لایه کاربرد بالا باشد این امر می‌تواند منجر به افزایش تعداد بسته‌های ارسالی در لایه مک شده و کارایی شبکه را تضعیف نماید.



شکل ۱: الف) ارتباط بین حسگر و مشتری وب از طریق پراکسی عبوری مبتدل HTTP به CoAP و برعکس و ب) پشته پروتکل HTTP در سمت چپ پراکسی و پشته پروتکل CoAP در سمت راست پراکسی عبوری [۱۰].

در نقش میانجی<sup>۱</sup>، درخواست‌های مشتری را دریافت کرده و منابع مورد نیاز برای درخواست را در سرورها جستجو می‌کند. به علت شباهت‌های زیاد پروتکل‌های CoAP و HTTP، شبکه‌هایی که در لایه کاربرد مبتنی بر CoAP کار می‌کنند می‌توانند با شبکه‌هایی که از پروتکل انتقال HTTP استفاده می‌کنند، ارتباط برقرار نمایند و این کار به‌واسطه یک پراکسی عبوری ساده مبتدل CoAP به HTTP<sup>۲</sup> و برعکس انجام می‌شود. می‌توان پراکسی را روی دروازه اینترنت اشیا نصب کرد تا امکان تبدیل پروتکل‌های HTTP و CoAP به یکدیگر فراهم شود که تحت عنوان پراکسی عبوری<sup>۳</sup> نامیده می‌شود.

پراکسی عبوری دروازه اینترنت اشیا نقشی کلیدی در سیستم‌های W/IoT<sup>۴</sup> بازی می‌کند و هدف آن، رسیدن به مکانیسمی تعاملی و ساده بین CoAP و HTTP است [۵]. این پراکسی روی دروازه اینترنت اشیا قرار می‌گیرد و می‌تواند درخواست‌های دریافتی از وب (تحت پروتکل HTTP) را به درخواست مبتنی بر پروتکل CoAP تبدیل کرده و برای گره مورد نظر در شبکه حسگر، ارسال کند. عکس این عمل نیز در ارسال پاسخ شبکه حسگر به مشتری وب، توسط پراکسی عبوری انجام می‌شود و محققان بسیاری تمرکز روی طراحی و پیاده‌سازی آن دارند [۶].

این پژوهش روی مدیریت درخواست‌های مشتریان وب (برای مثال، متخصصان یا مراکز پژوهش‌هایی) که می‌خواهند از طریق اینترنت، اطلاعات مورد درخواست خود را از جامعه مخاطب که در WPAN<sup>۵</sup> می‌باشند (مثلاً مجموعه‌ای از سالمندان، افراد دیابتی تحت درمان خاص و ...) دریافت کنند متمرکز است. هدف مقاله آن است که زمان‌بندی و تجمیع بسته‌های CoAP روی گره‌های حسگر را (در صورت امکان) به‌منظور کاهش تعداد بسته‌های مورد نیاز برای ارسال داده‌های شبکه حسگر اعمال نموده و بدین ترتیب، ترافیک و مصرف انرژی در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر پشته پروتکل LoWPAN/CoAP<sup>۶</sup> (برای کاربرد مانتورینگ) را کاهش دهد. جهت رسیدن به این هدف، کارهایی نظیر رده‌بندی<sup>۷</sup> درخواست‌ها و پاسخ‌های CoAP از لحاظ اولویت ارسال در شبکه (مشخص‌سازی حداکثر تأخیر مجاز)، مدیریت زمان‌بندی و تجمیع<sup>۷</sup>

8. Uniquely Identifiable
9. Sensing/Actuation
10. Potential Programmability Capabilities
11. Constrained Restful Environments
12. Representational State Transfer
13. Uniform Resource Identifier
14. Packet
15. Low-Rate Wireless Personal Area Networks
16. Physical Layer
17. Media Access Control

1. Intermediary
2. HTTP-CoAP Cross Proxy
3. Cross Proxy
4. Web/Interne of Things
5. Wireless Personal Area Network
6. Classification
7. Scheduling and Aggregation Management

جداکننده<sup>۱۷</sup> بسته مک (۱ بایت)، طول بسته مک (۱ بایت) و در ادامه، واحد داده خدمت فیزیکی<sup>۱۸</sup> (PSDU) یا همان بسته مک است [۱۴] و [۱۶]. در نتیجه سربر این لایه بر روی زیرلایه مک ۶ بایت است. سربرار PDU به علاوه سربرار<sup>۱۹</sup> MPDU به هر بسته ارسالی تحمیل می‌شود. این استاندارد ۴ نوع فریم<sup>۲۰</sup> (داده<sup>۲۱</sup>، تصدیق<sup>۲۲</sup>، فریم‌های فرمان لایه مک<sup>۲۳</sup> و فریم‌های علامت<sup>۲۴</sup>) برای لایه مک تعریف می‌کند [۱۷].

گره‌های IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ با یک شناسه منحصر به فرد ۶۴ بیتی با عنوان EUI-۶۴<sup>۲۵</sup> شناسایی می‌شوند. با توجه به وزن ۸ بیتی شناسه EUI-۶۴ و محدودیت ۱۲۷ بیتی سبزه‌ها در لایه مک، ذخیره کردن آدرس مبدأ و مقصد در بسته، حدود یک‌هشتم فضای قابل استفاده از آن را اشغال می‌کند. البته این استاندارد یک فرمت آدرس کوتاه<sup>۲۶</sup> نیز معرفی کرده است. این آدرس کوتاه ۱۶ بیتی بوده و می‌تواند به صورت پویا در راه‌اندازی<sup>۲۷</sup> شبکه به گره تخصیص یابد. این آدرس توسط هماهنگ‌کننده<sup>۲۸</sup> PAN در روال پیوستن<sup>۲۹</sup> تخصیص می‌یابد. در شبکه‌های مبتنی بر LoWPAN<sup>۳۰</sup> مدیریت آدرس‌های کوتاه ۱۶ بیتی بر عهده مسیریاب<sup>۳۱</sup> لبه است که طی روال‌های کشف همسایه<sup>۳۱</sup> انجام می‌شود [۱۵]. IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ فضای آدرس گره‌های مبدأ و مقصد را با استفاده از یک شناسه ۱۶ بیتی<sup>۳۲</sup> PAN افزایش می‌دهد که این شناسه جهت جداسازی شبکه‌های مختلف IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ که در برد رادیویی یکسانی از یکدیگر قرار دارند استفاده می‌شود.

## ۲-۲ پروتکل‌های LoWPAN و UDP (لایه‌های شبکه و انتقال)

LoWPAN<sup>۳۳</sup> مجموعه‌ای از استانداردها جهت استفاده کارآمد از IPv۶ در شبکه‌های بی‌سیم کم‌قدرت<sup>۳۳</sup> و کم‌سرعت<sup>۳۴</sup> بر روی دستگاه‌های ساده تعبیه شده<sup>۳۵</sup> از طریق یک لایه انطباق<sup>۳۶</sup> و بهینه‌سازی پروتکل‌های مرتبط می‌باشد [۱۷]. کاربردهای ایده‌آل LoWPAN در وسایل تعبیه شده‌ای است که نیاز دارند با سرویس‌های تحت اینترنت ارتباط برقرار کنند و شبکه‌های کم‌توان غیر هم‌ریخت<sup>۳۷</sup> که نیاز دارند به یکدیگر متصل شوند. چنین کاربردهایی در اتوماسیون خانه و ساختمان، اتوماسیون بهداشت و

XML	Payload	EXI
HTTP	Application (L7)	CoAP
TCP	Transport (L4)	UDP
IP	Network (L3)	6LoWPAN
Ethernet MAC	Data Link (L2)	IEEE 802.15.4 MAC
Ethernet PHY	Physical (L1)	IEEE 802.15.4 PHY

(الف)

(ب)

شکل ۲: مقایسه (الف) پشته پروتکل HTTP با (ب) پشته پروتکل CoAP [۱۳].

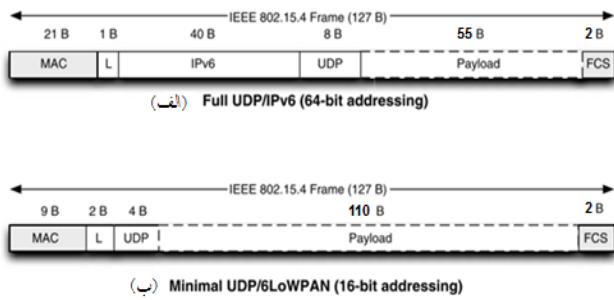
## ۱-۲ استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ (لایه فیزیکی و مک)

شبکه بی‌سیم شخصی با سرعت کم (LR-WPAN) شبکه‌ای ساده و کم‌هزینه است که اجازه ارتباط بی‌سیم در کاربردهایی را می‌دهد که نیازمند مصرف انرژی پایین و توان عملیاتی معمولی هستند. از اهداف این شبکه می‌توان مواردی مانند نصب آسان، انتقال مطمئن داده‌ها، هزینه بسیار پایین ایجاد، کارکرد مبتنی بر باتری و استفاده از یک پروتکل ساده و منعطف را نام برد [۱۴]. بدین منظور استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ ایجاد شده تا یک زیرلایه<sup>۱</sup> برای کنترل دسترسی به رسانه<sup>۲</sup> (MAC) و یک لایه فیزیکی برای شبکه‌های بی‌سیم شخصی با سرعت کم (LR-WPAN) ایجاد کند. مصرف کم انرژی<sup>۳</sup>، نرخ داده کم<sup>۴</sup>، هزینه پایین<sup>۵</sup> و توان عملیاتی بالا در تبادل پیام<sup>۶</sup>، باعث شده تا از این پروتکل در شبکه‌های حسگر بی‌سیم<sup>۷</sup> (WSN)، ارتباطات ماشین به ماشین<sup>۸</sup> (M2M) و اینترنت اشیا استفاده شود [۱۵].

پروتکل IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ یک ارتباط قابل اعتماد<sup>۹</sup> مهیا می‌کند، روی سکوها<sup>۱۰</sup> مختلف قابلیت عملیاتی شدن دارد و می‌تواند در یک شبکه بی‌سیم از تعداد زیادی گره (حدوداً ۶۵ هزار عدد) پشتیبانی کند. همچنین سطح بالایی از سرویس‌های امنیتی، رمزنگاری و احراز هویت<sup>۱۱</sup> را فراهم می‌سازد و با این حال QoS<sup>۱۲</sup> را تضمین نمی‌کند. تمرکز این پروتکل در ارائه خدمات نرخ داده کم به دستگاه‌های با انرژی محدود<sup>۱۳</sup> است و یک پشته پروتکل شبکه کامل برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ایجاد کرده است. زیرلایه فیزیکی در IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ حداکثر می‌تواند بسته‌های ۱۲۷ بیتی از زیرلایه مک<sup>۱۴</sup> را انتقال دهد که البته بخشی از همان ۱۲۷ بایت جهت اهداف لایه دوم شبکه استفاده می‌شود [۱۵]. واحد داده پروتکل فیزیکی<sup>۱۵</sup> (PPDU)، حاوی یک دیباچه<sup>۱۶</sup> (تا ۴ بایت)، یک

1. Sub Layer
2. Media Access Control
3. Low Power Consumption
4. Low Data Rate
5. Low Cost
6. High Message Throughput
7. Wireless Sensor Network
8. ارتباط ماشین به ماشین به ارتباطات فعال دستگاه‌ها با یکدیگر به صورت خودمختار و بدون دخالت انسان گفته می‌شود.
9. Reliable Communication
10. Platforms
11. Authentication
12. Quality of Service
13. Power Constrained Devices
14. MAC Sublayer
15. Physical Protocol Data Unit

16. Preamble
17. Delimiter
18. Physical Service Data Unit
19. MAC Protocol Data Unit
20. Frame
21. Data Frames
22. Acknowledgment Frames
23. MAC Layer Command Frames
24. Beacon Frames
25. 64-Bit Extended Unique Identifier
26. Short Address Format
27. Bootstrapping
28. Personal Area Network Coordinator
29. Association Procedure
30. Edge Router
31. Neighbor Discovery Procedures
32. 16-Bit PAN Identifier
33. Low Power
34. Low Rate
35. Simple Embedded Device
36. Adaption Layer
37. Low-Power Heterogeneous



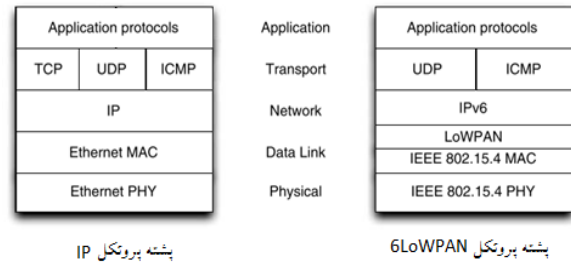
شکل ۴: مثالی از تأثیر 6LoWPAN در فشرده‌سازی سرآیندهای<sup>۱۱</sup> IPv6/UDP [۱۷].

لایه بالاتر از ۵۵ بایت به ۱۰۸ بایت افزایش یافته است. در مقاله حاضر، ارسال بسته‌های لایه کاربرد منطبق با ساختار شکل ۴-ب و در شبکه‌های چندگامی است. در ارتباطات به صورت چندگامی، فشرده‌سازی و بازکردن بسته‌ها در جریان انتقال بسته‌ها روی هر گره میانی درگیر جریان انتقال بسته انجام می‌شود. ضمناً فشرده‌سازی 6LoWPAN به علت این که بی‌وضعیت بوده و مبتنی بر محتوی مشترک<sup>۱۱</sup> است نیازی به وضعیت از پیش تعریف‌شده‌ای برای جریان داده‌ها ندارد و اجازه می‌دهد پروتکل‌های مسیریابی کار خود را به صورت پویا و مستقل انجام دهند.

سرآیند IPv6 فاقد جمع کنترلی<sup>۱۲</sup> (checksum) بوده و در صورت نیاز، جهت بررسی صحت داده‌های ارسالی از الگوریتم کنترلی لایه‌های بالاتر (مانند UDP) استفاده می‌شود. در فشرده‌سازی سرآیند UDP، بخش اندازه آن به طور کامل توسط 6LoWPAN حذف می‌شود، ضمن آن که امکان حذف جمع کنترلی بسته UDP نیز وجود دارد [۱۷]. پیاده‌سازی 6LoWPAN به راحتی بر روی یک حافظه کمتر از ۳۲ کیلوبایت امکان‌پذیر است (کمتر از zigbee و بسیاری از پروتکل‌های دیگر) [۱۸]. اتصال شبکه‌های مبتنی بر 6LoWPAN به اینترنت آسان‌تر از شبکه‌های مبتنی بر Zigbee است چرا که نیاز به یک دروازه پیچیده ندارند و ساختارشان مبتنی بر IP است. این ویژگی‌های مثبت 6LoWPAN آن را پروتکل مناسبی برای اتصال شبکه‌های حسگر بی‌سیم به دنیای اینترنت اشیا کرده است.

### ۳-۲ پروتکل CoAP (لایه کاربرد)

حرکت به سمت اینترنت اشیا نیازمند داشتن پروتکل‌هایی مستقل از کاربرد است تا سیستم‌ها و اجزای مختلف (با پیاده‌سازی‌ها و ویژگی‌های متفاوت) بتوانند با هم تبادل اطلاعات کنند. یک روش موفق که در اینترنت کنونی هم کاربرد فراوان دارد، پروتکل‌های تحت وب می‌باشد و یکی از مدل‌های معماری معروف و پرکاربرد خدمات تحت وب، معماری نمایانگر وضعیت انتقال<sup>۱۳</sup> (REST) است. کارگروه CoRE از IETF با هدف پشتیبانی از خدمات وب در شبکه‌هایی مانند 6LoWPAN [۸]، پروتکل CoAP<sup>۱۴</sup> [RFC۷۲۵۲] را معرفی کرد. CoAP جایگزین ساده‌شده‌ای برای HTTP جهت اتصال اشیا با منابع محدود به وب است [۹]. شکل ۵ نشان‌دهنده تحول پروتکل‌های تحت وب جهت استفاده روی گره‌های با منابع محدود موجود در اینترنت اشیا است.



شکل ۳: پشته پروتکل 6LoWPAN در مقایسه با پشته پروتکل IP [۱۷].

درمان و تدارکات، اندازه‌گیری هوشمند، و نظارت بر محیط زیست قابل مشاهده است. شکل ۳ لایه‌های پشته پروتکل 6LoWPAN را در مقایسه با پشته پروتکل IP کلاسیک نشان می‌دهد.

6LoWPAN فقط از IPv6 پشتیبانی می‌کند. لایه کوچک تطبیق LoWPAN جهت بهینه‌سازی IPv6 روی IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ عرضه شده است. در عمل روی دستگاه‌های تعبیه‌شده و کوچک، لایه‌های تطبیق LoWPAN و IPv6 با هم پیاده‌سازی شده و از هم جدا نیستند. همچنین عموماً پروتکل انتقال در پشته 6LoWPAN، پروتکل UDP<sup>۱</sup> است [۱۷].

مهم‌ترین عملکردهای 6LoWPAN<sup>۲</sup> در لایه تطبیق LoWPAN آن، فشرده‌سازی سرآیند IPv6 و سرآیندهای بعدی آن مانند UDP به همراه قابلیت‌های قطعه‌بندی<sup>۳</sup> و آدرس‌دهی مش<sup>۴</sup> است. سرآیند 6LoWPAN در [RFC۴۹۴۴] تعریف شده و بعداً توسط [RFC۶۲۸۲] و [RFC۶۷۷۵] بهبود و توسعه یافته است. پروتکل‌های IPv6/UDP استاندارد، ۴۸ بایت طول دارند [۱۷]. این سایز در شبکه‌های LoWPAN بخش قابل توجهی از فضای حمل بار<sup>۵</sup> بسته‌های IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ را اشغال می‌کند و فضای کوچکی برای داده‌های لایه کاربرد باقی می‌گذارد که یکی از مشکلات استفاده از IP در شبکه‌های LoWPAN است. یک راه حل مناسب برای حل این مشکل، از بین بردن افزونگی بین لایه‌های دوم و سوم<sup>۶</sup> است و 6LoWPAN به این منظور، فشرده‌سازی در سرآیندش<sup>۷</sup> را انجام داده است. فشرده‌سازی 6LoWPAN بدون وضعیت<sup>۸</sup>، ساده و قابل اعتماد است. این قابلیت مبتنی بر یک سری اطلاعات مشترک بین گره‌ها در حین مشارکت<sup>۹</sup> آنها در LoWPAN و فضای آدرس سلسله‌مراتبی IPv6 کار می‌کند که معمولاً اجازه می‌دهد آدرس حذف شود. شکل ۴ تأثیر فشرده‌سازی 6LoWPAN و قابلیت آدرس‌دهی ۱۶ بیتی IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ بر آزادسازی فضای بسته، جهت استفاده لایه کاربرد نشان می‌دهد.

قالب 6LoWAN در [RFC۴۹۴۴] دو نوع طرح فشرده‌سازی سرآیند HC۱ برای فشرده‌سازی سرآیند IPv6 و HC۲ برای فشرده‌سازی سرآیند UDP را معرفی کرده است [۱۷]. در کنار آن، ساختار آدرس کوتاه مربوط به IEEE ۸۰۲.۱۵.۴، منجر به فشرده‌شدن ساختار بسته IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ از شکل ۴-الف به شکل ۴-ب می‌شود و با این کار، فضا برای

1. User Datagram Protocol
2. Functionality
3. Fragmentation
4. Mesh Addressing
5. Payload Space
6. Data Link and Network Layers
7. 6LoWPAN Header Compression
8. Stateless
9. Participation

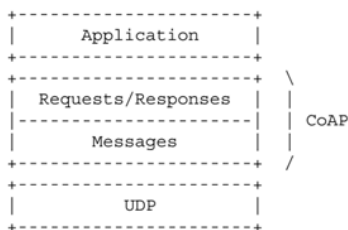
۱۰. شکل فوق اصلاح شده است. در منبع اصلی (کتاب [۱۷]) مقدار FCS در شکل اشتباه درج شده بود و با توجه به سند استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۱۱ اصلاح گردید.

11. Shared-Context

۱۲. الگوریتمی که برای بررسی درستی اطلاعات در مقصد استفاده می‌شود.

۱۳. با توجه به گسترده‌بودن تعریف REST، توضیح این مفهوم در پیوست آمده است.

۱۴. بخشی از شکل اصلی موجود در مرجع که مورد استفاده نبوده، حذف شده است.

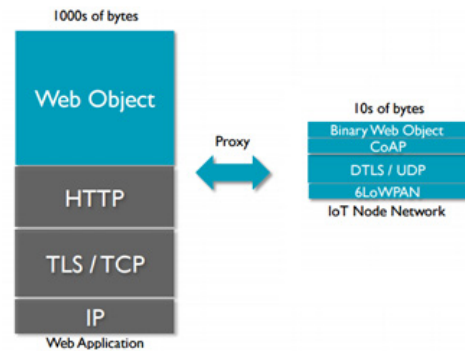


شکل ۶: لایه‌سازی انتزاعی از CoAP.

است. این پیاده‌سازی در یک شبکه چندگامی<sup>۹</sup> پیاده‌سازی شده و نتایج ارزیابی‌اش نشان می‌دهند که مصرف انرژی در زمان استفاده از یک چرخه خدمت رادیویی، پایین‌تر است هرچند که منجر به بدتر شدن عملکرد تأخیر می‌گردد. ضمناً زمانی که مکانیسم RDC فعال نباشد این روش کمکی به مصرف انرژی پایین نمی‌کند.

در [۲۱] مقایسه‌ای بین CoAP و HTTP از نظر مصرف انرژی انجام گرفته است. همچنین دروازه‌ای<sup>۱۰</sup> برای برقرار کردن ارتباط بین یک شبکه حسگر مبتنی بر CoAP و یک شبکه IP خارجی که از HTTP استفاده می‌کند، طراحی شد. هدف از این کار، ایجاد امکان ارتباط کاربر با شبکه حسگر از طریق مرورگر وب بود. در آزمایش‌ها، یک مشتری در نظر گرفته شده که از یک سرور تعبیه‌شده برای به دست آوردن مقادیر دما و رطوبت، پرس‌وجو می‌کند و انرژی مصرف‌شده با توجه به زمان‌های مختلف رسیدن بسته‌ها اندازه‌گیری شده است. زمان پاسخ نیز در وضعیت‌هایی که سرور در فاصله تک‌گامی<sup>۱۱</sup> و دوگامی<sup>۱۲</sup> از مشتری قرار دارد اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که CoAP عملکرد بهتری را در هر دو پارامتر انرژی مصرف‌شده و زمان صرف‌شده داشته است. این تحقیق به مقایسه HTTP و CoAP اکتفا کرده و پیشنهادی جهت بهبود مصرف انرژی در پروتکل CoAP ارائه نداده است. مقاله حاضر بر آن است که سربر ارسال داده‌ها در چنین کاربردهایی را تا حد امکان کاهش دهد.

در [۲۲] یکی از مشکلات توسعه شبکه‌های حسگر، فقدان لایه شبکه و پروتکل‌های انتقال عمومی تشخیص داده شده است. این تحقیق امکان استفاده از راه‌حل‌های مبتنی بر IP در شبکه‌های حسگر مبتنی بر چرخه خدمت<sup>۱۳</sup> را بررسی کرده و سازگاری آنها را بررسی می‌کند. ضمناً با تغییراتی در لایه چرخه خدمت مربوط به ContikiMAC<sup>۱۴</sup>، کارایی استفاده از UDP/CoAP و TCP را به‌عنوان پروتکل انتقال در این شبکه‌ها افزایش داده است. برای سرعت‌بخشیدن به حمل‌ونقل چندگامی اطلاعات، مکانیسمی را به چرخه خدمت رادیویی اضافه کرده است. وقتی گره بسته‌ای را ارسال می‌کند یا انتقال می‌دهد، در وضعیت مشغول<sup>۱۵</sup> قرار می‌گیرد که به‌صورت پیش‌فرض ۱ ثانیه طول می‌کشد. در این ۱ ثانیه، گره می‌تواند یکی از سه عمل زیر را در پیش گیرد: (۱) رفتار پیش‌فرض<sup>۱۶</sup>



شکل ۵: امکان‌پذیری وب برای گره‌های با منابع محدود موجود در اینترنت اشیا به‌واسطه CoAP [۱۹].

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شبکه‌های محدود مانند LoWPAN می‌توانند به‌واسطه یک پراکسی با پروتکل‌های جاری وب مانند HTTP ارتباط داشته باشند. یکی از اهداف اصلی طراحی CoAP، ایجاد یک پروتکل وب عمومی برای شرایط خاص برای ارتباط در محیط‌های محدود و پایین‌نگه‌داشتن سربار پیام بوده است. هدف CoAP فشرده‌سازی کورکورانه HTTP [RFC۶۶۱۶] نیست بلکه تحقق‌بخشیدن به یک زیرمجموعه مشترک اما بهینه‌سازی شده از REST با HTTP برای برنامه‌های کاربردی M2M است. مدل تعاملی CoAP شبیه به مدل کلاینت-سرور HTTP است. یک درخواست CoAP معادل با یک درخواست HTTP است و توسط یک کلاینت برای درخواست‌کردن یک عمل (با استفاده از یک متد کد) بر روی یک منبع موجود در سرور (که توسط یک URL شناسایی می‌شود) فرستاده می‌شود. پس از آن، سرور یک پاسخ همراه با یک کد پاسخ را بازمی‌گرداند که ممکن است شامل ارائه منبع باشد [۳]. برخلاف HTTP، CoAP با این مبادلات غیر هم‌زمان بر روی یک انتقال داده‌گرا، مانند UDP مواجه است. این امر با استفاده از یک لایه از پیام‌هایی که از قابلیت اطمینان به‌طور اختیاری پشتیبانی می‌کنند انجام می‌گیرد. CoAP چهار نوع پیام نیازمند به تأیید<sup>۲</sup> (CON)، بدون نیاز به تأیید<sup>۳</sup> (NON)، تصدیق<sup>۴</sup> (ACK) و بازنشانی<sup>۵</sup> (RST) را تعریف و از یک رویکرد دولایه‌ای استفاده می‌کند. یک لایه پیام که برای ارتباط با UDP استفاده می‌شود و یک لایه تعاملات درخواست/پاسخ<sup>۶</sup> که از کدهای متد و پاسخ استفاده می‌کنند (شکل ۶).

مدل پیام‌گذاری CoAP بر اساس مبادله پیام‌ها بر روی UDP بین نقاط انتهایی<sup>۷</sup> است. CoAP از یک هدر دودویی با طول ثابت که ممکن است توسط option‌های باینری فشرده و یک payload ادامه داده شود استفاده می‌کند. این فرمت پیام در درخواست‌ها و هم پاسخ‌ها استفاده می‌شود.

## ۲-۴ روش‌های ارائه‌شده پیشین

در [۲۰] یک پیاده‌سازی از CoAP در سیستم عامل Contiki ارائه شده است. هدف این پیاده‌سازی رسیدن به کارآمدی بالا ضمن کاهش مصرف انرژی با بهره‌گیری از یک مکانیسم چرخشی خدمت رادیویی

1. Datagram-Oriented Transfer
2. Confirmable
3. Non-Confirmable
4. Acknowledgement
5. Reset
6. Request/Response
7. Endpoints

8. Radio Duty Cycling

9. Multi-Hop

10. Gateway

11. One-Hop

12. Two-Hops

13. Duty-Cycled

۱۴. چرخه خدمت رادیویی مربوط به سیستم عامل Contiki که از یک مکانیزم انرژی-کارآمد زمان‌بندی بیدارشدن استفاده می‌کند تا گره‌ها بتوانند اکثر اوقات (بیشتر از ۹۹٪ مواقع) فرستنده/گیرنده خود را خاموش نگه دارند.

15. Busy

16. Default

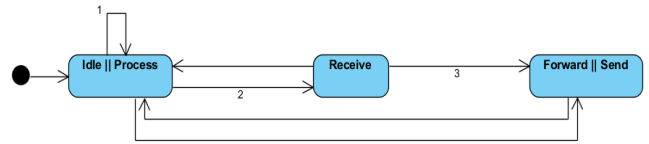
پروتکل نظارت مشروط ارائه شده است. این پروتکل به مشتری اجازه فیلترکردن اطلاع‌رسانی‌هایی را که از طریق یک انتشاردهنده ارسال می‌شوند با توجه به مقدار آستانه مورد نظر می‌دهد. بدین ترتیب، این روش توانسته است تا حدی ترافیک شبکه حسگر و مصرف انرژی گره را کاهش دهد.

در [۲۸] یک چارچوب برای برنامه‌ریزی گام‌های ثبت<sup>۷</sup> مشاهدات CoAP ارائه شده و با تجمیع<sup>۸</sup> و زمان‌بندی<sup>۹</sup> تحویل اطلاع‌رسانی<sup>۱۰</sup> در پراکسی، مصرف انرژی را کاهش داده است. این چارچوب همچنین توانسته است پهنای باند مصرفی و تأخیر را نیز کاهش دهد هرچند که لایه کاربرد را درگیر این کار نموده است. طبق بررسی انجام‌شده در [۲۹]، روش استاندارد معرفی‌شده مبتنی بر IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ و پروتکل‌های استاندارد IETF مناسب‌ترین راه جهت ارتباط اشیا دارای منابع محدود (حسگرها) با اینترنت در راستای تحقق اینترنت اشیا می‌باشد. اکثر کاربردهای اینترنت اشیا نیاز به انتقال چند بیت دارند و این می‌تواند نیاز به استفاده از لایه فیزیکی با نرخ بسیار پایین انتقال اطلاعات در محدوده‌های فرکانسی کوچک را توجیه کند. لایه فیزیکی و مک معرفی‌شده در استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ چنین قابلیت را دارد هرچند که [۱۲] نشان می‌دهد سرآیند این لایه‌ها روی داده‌های کوچک، سربار زیادی تحمیل می‌کنند.

در این بخش سیر تکاملی امکان دسترسی به شبکه‌های حسگر از طریق اینترنت ارائه گردید و پشته پروتکل ۶LoWPAN جهت پشتیبانی شبکه حسگر از IPv۶ معرفی شد. ضمناً برخی فعالیت‌های مرتبط جهت توسعه کاربرد یا بهینه‌سازی سربار تعاملات در شبکه‌های حسگر چندگامی مبتنی بر ۶LoWPAN/CoAP معرفی شد. با توجه به پیشینه پژوهش، پشته پروتکل ۶LoWPAN/CoAP می‌تواند تأثیر مهمی در توسعه اینترنت اشیا داشته باشد. این پشته پروتکل، توسعه اینترنت اشیا از جمله مجتمع‌سازی شبکه‌های حسگر با وب را به‌واسطه CoAP تسهیل می‌کند.

### ۳- روش پیشنهادی

در این بخش، جزئیات روش پیشنهادی که CSAM<sup>۱۱</sup> نام‌گذاری شده است با هدف کاهش سربار تحمیلی به بسته‌های کوچک و متوسط<sup>۱۲</sup> در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر ۶LoWPAN/CoAP ارائه می‌گردد. شکل ۷ نمودار وضعیت<sup>۱۳</sup> دریافت و ارسال بسته توسط گره حسگر در شبکه ۶LoWPAN/CoAP در شرایط عادی (بدون استفاده از روش پیشنهادی) را نشان می‌دهد. وضعیت گره‌هایی که درگیر ارسال روبه‌جلو<sup>۱۴</sup>



شکل ۷: نمودار وضعیت دریافت/ارسال بسته توسط گره در شبکه ۶LoWPAN/CoAP (وضعیت پایه).

که وضعیت مشغول را در نظر نمی‌گیرد و چرخه خدمت، روال عادی کنترلی خود را در پیش می‌گیرد (در ContikiMAC، گره‌ها هر ۱۲۵ میلی‌ثانیه کانال را چک می‌کنند، یعنی ۸ بار در ثانیه)، رفتار جریان<sup>۲</sup> که گره مؤلفه رادیویی خود را روشن نگه می‌دارد و (۳) رفتار تجسس<sup>۳</sup> که گره ۸ برابر وضعیت پیش‌فرض در ثانیه کانال را بررسی می‌کند (۶۴ بار بر ثانیه). این تحقیق از UDP/CoAP و TCP/HTTP به‌عنوان پروتکل انتقال داده برای برنامه‌ریزی مجدد گره‌های یک شبکه حسگر که در فاصله چندگامی قرار داشته‌اند استفاده نموده و نشان داده که با استفاده از رفتارهای جریان و تجسس در وضعیت مشغولی، کارایی و مصرف انرژی زمان استفاده از پروتکل‌های ذکرشده برای انتقال افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، ضعف این روش در آن است که بسته‌های با سایز کوچک را در نظر نگرفته و در این وضعیت اگر گره در وضعیت جریان یا تجسس بماند، مصرف انرژی افزایش می‌یابد.

در [۲۳] چارچوبی برای ارتباطات ماشین به ماشین و مکانیسمی بهبودیافته جهت انتشار/اشتراک<sup>۴</sup> بر اساس CoAP ارائه شد. نتایج ارزیابی این تحقیق نشان‌دهنده برتری استفاده از CoAP به‌جای HTTP بوده است هرچند که مقایسه با MQTT<sup>۵</sup> که یکی از پروتکل‌های تخصصی جهت انتشار/اشتراک با سربار کم است می‌توانست به‌طور مناسب‌تری ارزیابی را محقق نماید. این چارچوب، پروتکل نظارت را توسعه بخشیده است به گونه‌ای که به مشتری امکان می‌دهد تا دوره زمانی دریافت به روز رسانی‌ها را خود مشخص نماید. وجود یک پروکسی CoAP از موضوعات پراهمیت برای اتصال بین شبکه مبتنی بر HTTP و شبکه‌های حسگر مبتنی بر CoAP است. در [۲۴] یک پراکسی برای مجتمع‌سازی شبکه‌های حسگر با وب ارائه گردید که بلوک‌های اصلی سازنده یک دروازه CoAP ساده، جهت نظارت از راه دور بر یک شبکه حسگر را توصیف می‌کند. دروازه به‌عنوان یک پراکسی عبوری عمل می‌کند تا درخواست‌های HTTP را به CoAP ترجمه کند.

در معماری ارائه‌شده در [۲۵] از یک دروازه ۶LoWPAN برای نظارت بر یک شبکه حسگر مبتنی بر CoAP استفاده شده است. یک مسیریاب لبه مبتنی بر ۶LoWPAN به همراه سرور CoAP مسئول ارسال و دریافت بسته‌های ۶LoWPAN در داخل شبکه حسگر بوده و یک وب‌سرور، مسئول ارتباطات خارج شبکه است. برتری روش ارائه‌شده در مقاله حاضر نسبت به این تحقیق، آن است که ارتباط با گره‌های شبکه حسگر، بدون وجود سرور CoAP روی مسیریاب لبه انجام می‌گیرد. همچنین در [۲۶] یک دروازه CoAP برای اتوماسیون خانگی توسعه داده شده و در [۲۷] توسعه‌ای بر پروتکل نظارت<sup>۶</sup> انجام گردیده و تحت عنوان

۱. جهت ساده‌تر شدن نمودار و تمرکز روی صورت مسئله، وضعیت پایان درج نشده و برخی وضعیت‌ها یکسان فرض شده‌اند.

2. Stream
3. Snooping
4. Publish/Subscribe
5. Message Queuing Telemetry Transport
6. Observe

7. Registration
8. Aggregation
9. Scheduling
10. Notification Deliveries
11. Cross Scheduling and Aggregation Management

۱۲. منظور از بسته‌های کوچک (در بزرگ‌ترین بازه ممکن، بر اساس حداقل سربار لایه مک مطابق با IEEE ۸۰۲.۱۵.۴) بسته‌های اطلاعاتی می‌باشند که سایز آنها بین ۶ تا ۵۸ بایت است. این بسته‌ها با هر بسته دیگر در مجموعه بسته‌های کوچک می‌توانند تجمیع شوند زیرا سایز حاصل، کوچک‌تر از حداکثر سایز payload در لایه مک منطبق با استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ خواهد بود. سایز بسته‌های متوسط بین ۵۷ تا ۱۱۵ می‌باشند که این بسته‌ها فقط با بسته‌های کوچک به شرطی که مجموع سایز آنها بیشتر از حداکثر سایز payload در لایه مک نشود می‌توانند جهت کاهش سربار لایه مک تجمیع گردند.

13. State Diagram
14. Packet Forwarding

در مدیریت و بهینه‌سازی ترافیک شبکه، اولویت پیام‌های CoAP<sup>۲</sup> (CMP) در چهار سطح و طبق (۳) تعیین می‌شود

$$0 \leq CMP(p) \leq 3 \quad (2)$$

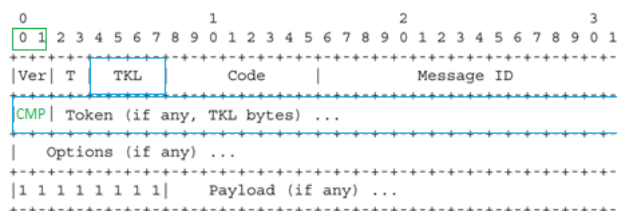
مقدار صفر بیانگر بالاترین سطح اولویت و پایین‌ترین آن ۳ است. محل ذخیره‌سازی این مقدار در پیام‌های CoAP نیز باید مشخص گردد. پروتکل CoAP در ساختار خود دارای فیلدی با عنوان توکن است که مشتری از آن جهت تشخیص پاسخ درخواست‌های خود استفاده می‌کند و به آن شناسه درخواست<sup>۳</sup> هم گفته می‌شود [۳]. دو بیت اول توکن در شبکه جهت درج اولویت پیام CoAP (CMP) در نظر گرفته می‌شود. شکل ۸ محل قرارگیری CMP را نشان می‌دهد.

توسط CMP نه تنها مسئله اولویت بسته‌ها در شبکه، بلکه مسئله اولویت مورد نظر مشتری در دریافت پاسخ را نیز می‌توان مدیریت نمود. فیلد توکن در درخواست، توسط مشتری (در اینجا مسیریاب لبه) پر می‌شود [۳]. مشتری اولویت مورد نیاز خود را در داخل CMP درج کرده و درخواست را برای سرور CoAP می‌فرستد. سرور اولویت موضوع مورد درخواست را با اولویت منع<sup>۴</sup> خود مقایسه می‌کند و مقدار کوچک‌تر (نمایه اولویت بالاتر) را در پیام درج می‌کند. بدین ترتیب مشتری می‌تواند اولویت بسته را برای شبکه تنظیم کند به شرطی که اولویت درخواستی پایین‌تر از اولویت تعیین‌شده توسط سرور نباشد. مزیت این قابلیت در آن است که پراکسی در ارتباط با مشتریان وب می‌تواند بر اساس صف درخواست، یک موضوع را با اولویت بالاتری درخواست کند و در نتیجه، کیفیت سرویس‌دهی آن بالاتر خواهد بود چرا که امکان مدیریت درخواست‌ها را با توجه به اولویت خواهد داشت.

حداکثر تأخیر قابل قبول (MAD)<sup>۵</sup> به صورت حداکثر فاصله زمانی‌ای تعریف می‌شود که شبکه مجاز است بسته را از مبدأ به مقصد ارسال کند. این مقدار به ازای هر اولویت پیام (CMP) تعریف می‌شود، لذا روش پیشنهادی به محض دریافت بسته از روی مقدار ۲بیتی CMP داخل بسته می‌تواند مقدار حداکثر تأخیر مجاز بسته را استخراج کند. MAD باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که با پارامترهای حداکثر مهلت زمانی<sup>۶</sup> شبکه (که جزء پارامترهای پیکربندی ارتباطات مبتنی بر CoAP است) تناقض نداشته باشد. هدف کمینه‌کردن مجموع ورودی‌ها و خروجی‌های گره‌های حسگر (طبق (۳)) در دوره زمانی فعالیت شبکه چندگامی مبتنی بر ۶LoWPAN/CoAP<sup>۸</sup> است.

$$\text{minimize} \sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{n_i}^I| + \sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{n_i}^O| \quad (3)$$

تابع هدف ذکرشده در (۳) این امکان را می‌دهد که عملکرد روش پیشنهادی با عملکرد فعلی پشته پروتکل ۶LoWPAN/CoAP قابل مقایسه باشد. با فرض ثابت‌بودن شرایط و مقدار  $\sum_{n_i \in N} L(P_{n_i}^S)$ ، با



شکل ۸: محل قرارگرفتن اولویت در ساختار پیام CoAP [۴].

بسته‌ها هستند شامل وضعیت بیکار<sup>۱</sup>، انتظار برای وقوع یک رخداد، پردازش، دریافت، و ارسال روبه‌جلو است (از این پس به‌جای ارسال روبه‌جلو از کلمه ارسال استفاده می‌شود).

اعداد روی نمودار وضعیت شکل ۷، بیانگر دلیل تغییر وضعیت گره به شرح ذیل می‌باشند: تغییر وضعیت ۱ به معنای آن است که گره در وضعیت بی‌کار است تا بسته‌ای دریافت کند (رخداد/پردازش، بسته‌ای را جهت ارسال ایجاد کند). تغییر وضعیت ۲ بیانگر آن است که بسته توسط لایه مک دریافت شده است. با فرض آن که نمودار وضعیت شکل ۷ مربوط به گره  $n_i$  باشد و متد  $Dst(p)$  مقصد بسته  $p$  را مشخص کند تغییر وضعیت ۳ زمانی اتفاق می‌افتد که  $D(p) \neq n_i$  باشد. شکل فوق بیانگر آن است که روال دریافت/ارسال بسته توسط گره در ۶LoWPAN/CoAP بسیار ساده است (عملاً بسته‌ها به محض دریافت، ارسال می‌شوند) ولی در دنیای واقعی، لزوماً همه بسته‌ها دارای اهمیت یکسان نمی‌باشند و ممکن است با اولویت‌های متفاوتی به مقصد ارسال شوند. از طرفی با توجه به محدودیت سایز بسته‌ها در IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ و سربار سرآیند بسته‌ها در آن، می‌توان بسته‌ها را در هنگام ارسال روبه‌جلو، تجمیع و با حذف سربار سرآیند برخی بسته‌های تجمیع‌شده، پهنای باند را به صورت کاراتری استفاده کرد. همچنین با کاهش سایز بسته‌های ارسالی، می‌توان در مصرف انرژی گره صرفه‌جویی کرد و در نتیجه، عمر شبکه را افزایش داد. جهت نیل به این اهداف در مقاله حاضر، کارهای زیر در شبکه انجام شده است: الف) رده‌بندی درخواست‌ها و پاسخ‌های CoAP از لحاظ اولویت ارسال در شبکه (مشخص‌سازی حداکثر تأخیر مجاز)، ب) مدیریت زمان‌بندی و تجمیع پیام‌های دریافتی روی گره‌های حسگر (بر اساس حداکثر تأخیر مجاز هر کدام) و ج) بازشدن پیام‌های تجمیع‌شده در مقصد.

پیوست حاوی برخی پارامترها، متغیرها و متدهای استفاده‌شده در روش پیشنهادی به همراه تعریف مختصری از مفهوم و کاربرد آنها است. هر جای این بخش از کلمه «بسته» بدون مشخص‌کردن لایه آن استفاده شود، منظور بسته‌های لایه شبکه ۶LoWPAN است و هر کجا از عبارت «بسته با سایز مناسب جهت تجمیع» استفاده شود، یعنی شرط ذکرشده در (۱) برقرار می‌باشد

$$L(p) \leq CUR\_MAX\_PLD\_SZ - L(QB) \quad (1)$$

اطلاعات ارسالی در [RFC۶۴۴۱] observe می‌توانند دارای اولویت‌های متفاوتی باشند ولی در شبکه‌های مبتنی بر ۶LoWPAN/CoAP این اطلاعات در قالب پیام‌هایی با اولویت یکسان ارسال می‌گردند. مثلاً اطلاعات مربوط به نشت گاز در ساختمان هوشمند، با اولویتی یکسان با اطلاعات مربوط به رطوبت کلخانه در شبکه ارسال می‌شوند. جهت برطرف‌نمودن تبعات ناشی از عدم وجود اولویت و با هدف استفاده از آن

2. CoAP Message Priority

3. Request ID

4. Resource

5. Maximum Admissible Delay

۶ مورد تأیید طرفین ارتباط (خدمت‌گزار و مشتری)

7. Time out

۸ در روش پیشنهادی لزوماً مقدار بیشینه حاصل نمی‌شود (به‌علت پویایی محیط) ولی هدف سیستم پیشنهادی، بیشینه‌کردن این مقدار است.

1. Idle

$$w_{n_i}^p = 0 \quad \forall p \in P_{n_i}^I, \forall p \in P_{n_i}^S : type(p) = RST \quad (6)$$

با توجه به محدودیت سایز بسته‌ها در شبکه‌های مبتنی بر ۸۰۲.۱۵.۴ IEEE (در لایه مک) و همچنین حداقل سربار این لایه روی بسته‌ها، سایز بسته‌های لایه شبکه (6LoWPAN) که حاوی پیام‌های CoAP است در بازه معرفی شده در (۷) خواهد بود

$$\begin{aligned} MIN\_MAC\_OH < L(p) \leq 127 \\ \forall p \in P_{n_i}^O, \forall p \in P_{n_i}^I, \forall p \in P_{n_i}^S \end{aligned} \quad (7)$$

محدودیت‌های بالا در تمام مراحل طراحی در نظر گرفته خواهد شد (مثلاً در بخش‌های بعدی هر کجا از  $w_{n_i}^p$  استفاده شود، ارتباط مقدار آن با نوع پیام CoAP و اولویت آن برقرار است).

در ادامه، نمودار وضعیت گره در روش پیشنهادی و شبه‌کدهای مربوط ارائه می‌شوند. شکل ۹ بیانگر نمودار وضعیت روش پیشنهادی، جهت دریافت و ارسال بسته، توسط گره حسگر در شبکه 6LoWPAN/CoAP است. وضعیت‌های انتظار، پیوستن<sup>۵</sup> و جداسازی<sup>۶</sup> بر اساس الگوریتم‌هایی که در ادامه بیان می‌شوند، عملیات تجمیع<sup>۷</sup> و جداسازی بسته‌ها را با تأخیر قابل قبول<sup>۸</sup> خواهند داد.

اعداد روی نمودار وضعیت، بیانگر دلیل تغییر وضعیت‌های گره  $n_i$  به شرح ذیل می‌باشند: عدد ۱ بیانگر آن است که گره در وضعیت بی‌کار است تا بسته‌ای دریافت کند (یا رخدادی/پردازشی، بسته‌ای را جهت ارسال ایجاد کند). عدد ۲ یعنی بسته توسط لایه مک دریافت شده است. تغییر وضعیت شماره ۳ زمانی اتفاق می‌افتد که شرط ذکر شده در (۸) برقرار باشد، یعنی زمانی که بسته دریافتی حاوی یک پیام CoAP است و مقصد آن گره جاری نبوده و بسته دارای اولویت بالا است یا مؤلفه تصمیم‌گیری گره، دریافت بسته با سایز مناسب و در زمان قابل قبول را برای بسته جاری پیش‌بینی نکرده است. لذا در این وضعیت، بسته به گره بعدی ارسال می‌شود و انتظار آن روی گره تقریباً برابر با صفر خواهد بود

$$\begin{aligned} bs_{n_i}^p = 0 \wedge Dst(p) \neq n_i \wedge (CMP(p) = 0 \vee \\ DMW\_CanWait(CUR\_MAX\_PLD\_SZ - \\ L(p) - L(QB) - \Delta, w_{n_i}^p) = 0) \end{aligned} \quad (8)$$

تغییر وضعیت شماره ۴ زمانی رخ می‌دهد که شرط ذکر شده در (۹) برقرار باشد، یعنی زمانی که بسته دریافتی حاوی یک پیام CoAP است و مقصد آن گره جاری نیست ولی بسته دارای اولویت بالا نبوده و یا مؤلفه تصمیم‌گیری جهت انتظار گره، دریافت بسته با سایز مناسب و در زمان قابل قبول را برای بسته پیش‌بینی کرده است (ساختار مؤلفه تصمیم‌گیری جهت انتظار به همراه نحوه عملکرد آن در بخش مؤلفه DMW شرح داده می‌شود)

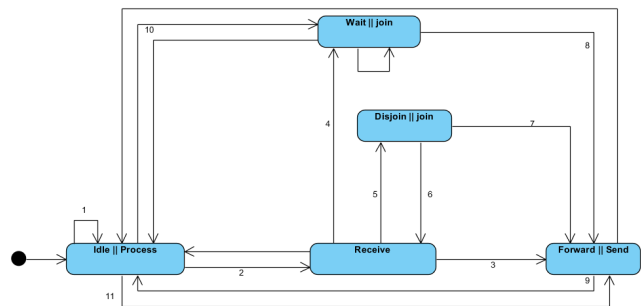
$$\begin{aligned} bs_{n_i}^p = 0 \wedge Dst(p) \neq n_i \wedge CMP(p) \neq 0 \wedge \\ (DMW\_CanWait(CUR\_MAX\_PLD\_SZ - \\ L(p) - L(QB) - \Delta, w_{n_i}^p) = 1) \end{aligned} \quad (9)$$

5. Join

6. Disjoin (to Undo the Joining of)

۷. در این پژوهش عبارت تجمیع (aggregate) مترادف با پیوستن (join) به کار می‌رود.

۸. در روش پیشنهادی به حداکثر تأخیر مورد تأیید طرفین ارتباط (خدمتگذار و مشتری) جهت رسیدن بسته از گره مبدأ به گره مقصد در شبکه بی‌سیم، حداکثر تأخیر قابل قبول (Maximum Admissible Delay) گفته می‌شود.



شکل ۹: نمودار وضعیت گره در روش پیشنهادی<sup>۱</sup> (دریافت و ارسال بسته توسط گره در شبکه 6LoWPAN/CoAP).

محاسبه عبارت بالا در روش SPS<sup>۲</sup> و روش پیشنهادی می‌توان میزان تأثیر روش پیشنهادی را به صورت کمی بررسی نمود.

روش CSAM هنگام دریافت اطلاعات از مسیر یاب لبه، بر کاهش تعداد بسته‌های وارد شده به گره‌ها تأثیر می‌گذارد که منجر به کوچک‌تر شدن مقدار حاصل از جمله  $\sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{n_i}^I|$  می‌شود. همچنین در ارسال پاسخ از گره‌های حسگر به مسیر یاب لبه، سعی بر کاهش تعداد بسته‌های خارج شده از گره‌ها است که منجر به کوچک‌تر شدن حاصل جمله  $\sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{n_i}^O|$  خواهد شد (علامت کاردینالیته<sup>۳</sup> در عبارت بالا تعداد اعضای مجموعه را برمی‌گرداند).  $w_{n_i}^p$  به عنوان ماکسیمم زمان مجاز جهت نگه‌داشتن بسته  $p$  روی گره  $n_i$  تعریف می‌شود (ماکسیمم فاصله زمانی مجاز بین دریافت بسته  $p$  و ارسال آن روی گره  $n_i$ ). این مقدار بیانگر زمان است و طبق (۴) مقداری مثبت خواهد بود<sup>۴</sup>

$$w_{n_i}^p \geq 0 \quad (4)$$

اگر پیام از نوع NON، CON، ACK باشد این مقدار برابر است با کمترین مقدار بین حداکثر تأخیر قابل قبول و حداکثر زمان اعتبار اطلاعات موجود در بسته CoAP منهای مجموع فاصله زمانی که طول می‌کشد تا بسته از گره  $n_i$  به مقصد (در اینجا مسیر یاب لبه) برسد. زمانی که به طور میانگین جهت پردازش‌های مرتبط با بسته  $p$  روی  $n_i$  صرف می‌شود طبق (۵) به دست می‌آید

$$w_{n_i}^p < \min \{MaxAge(p), MAD(p)\} - \\ OW D_{ER}^n - PT_{n_i}^p \quad (5)$$

$$\forall p \in P_{n_i}^I, \forall p \in P_{n_i}^S : type(p) \in \{CON, NON, ACK\}$$

پیام اگر از نوع RST باشد ماکسیمم زمان مجاز گره  $n_i$  جهت نگه‌داشتن آن طبق (۶) برابر صفر خواهد بود

۱. با توجه به این که فقط وضعیت‌های ارتباطی جهت بررسی مهم می‌باشند، جهت ساده‌تر شدن ظاهر شکل، وضعیت پردازش در کنار وضعیت بی‌کار درج شده است (وگر نه دو وضعیت جدا هستند). همچنین وضعیت‌های ارسال روبه‌جلو و ارسال نیز یک وضعیت در نظر گرفته شده‌اند ولی عملاً در لایه مک، فقط مفهوم ارسال وجود دارد و در لایه شبکه (شبکه‌های چندگامی) مفهوم ارسال روبه‌جلو نیز وجود دارد که عملاً همان ارسال را در لایه مک صدا می‌زند (با مقصد و هدف مشخص). چون در این پژوهش به صورت Cross با همه لایه‌ها کار داریم برجسب Forward در کنار Send درج شده تا شرح نمودار حالت و انتقال وضعیت‌ها در نمودار خلوت‌تری قابل بیان باشد. به همین دلیل، وضعیت پایان نیز درج نشده است ولی امکان گذار حالت از همه وضعیت‌ها به وضعیت پایان وجود دارد (مثلاً خاموش شدن گره).

۲. منظور از آخرین روش موجود پشته پروتکل معرفی شده در [۲۹] است.

3. Cardinality

۴. واحد این متغیر بر حسب دقت مورد نیاز در شبکه و نرخ تولید اطلاعات توسط گره‌های شبکه می‌تواند ثانیه یا میلی‌ثانیه باشد.



در تغییر وضعیت شماره ۷، طبق شرط ذکر شده در (۱۴) اگر مقصد زیربسته‌های استخراج شده گره جاری نباشد، بعد از هر جداسازی، بسته‌ها بر اساس اشتراک مسیر در گام بعدی<sup>۲</sup> دسته‌بندی شده و بعد از تجمع، متد ارسال روبه‌جلو فراخوانی می‌شود

$$\text{if } bs_{n_i}^p = \setminus \text{ then } \forall sub_j^p \in P \text{ if } Dst(sub_j^p) = n_k : \\ n_k \neq n_i \text{ Disjoin}(sub_j^p, P) \text{ and } Join(sub_j^p, P_k). \quad (14) \\ \text{call Forward}(P_k)$$

تغییر وضعیت شماره ۸ زمانی اتفاق می‌افتد که بسته با ساین مناسب جهت تجمع با  $QB$ ، دریافت و تغییر وضعیت شماره ۹ زمانی رخ می‌دهد که متد ارسال بسته در لایه ۶LoWPAN فراخوانی شده باشد. در صورت عدم موفقیت در ارسال بسته، پروتکل CoAP (لایه بالاتر)، در مکانیزم تبادل پیام خود الگوریتم مشخصی برای سعی مجدد دارد، لذا عدم موفقیت در ارسال برای نمودار وضعیت نشان داده شده در شکل ۱۰ که مربوط به لایه ۶LoWPAN/CoAP از پشته پروتکل است. به اهمیت ندارد. با فرض این که  $p_g$  بسته ایجاد شده توسط گره به واسطه حس کردن رخدادی در محیط باشد، تغییر وضعیت شماره ۱۰ زمانی رخ می‌دهد که شرط ذکر شده در (۱۵) برقرار باشد

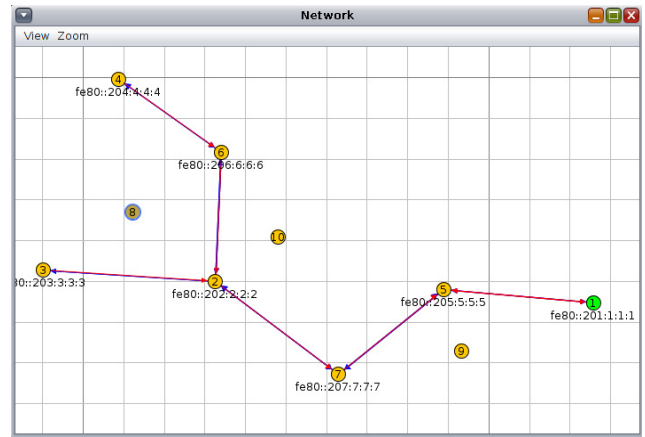
$$CMP(p_g) \neq 0 \wedge \\ (DMW\_CanWait(CUR\_MAX\_PLD\_SZ - \Delta, w_{n_i}^p) = 1) \\ L(p_g) - L(QB) - \Delta, w_{n_i}^p = 1) \quad (15)$$

تغییر وضعیت شماره ۱۱ زمانی اتفاق می‌افتد که شرط ذکر شده در (۱۶) برقرار باشد

$$CMP(p_g) = 0 \vee \\ (DMW\_CanWait(CUR\_MAX\_PLD\_SZ - \Delta, w_{n_i}^p) = 0) \\ L(p_g) - L(QB) - \Delta, w_{n_i}^p = 0) \quad (16)$$

با توجه به توضیحات داده شده در خصوص نمودار وضعیت پیشنهادی، در ادامه شبه‌کدهای کلیدی وضعیت‌های دریافت، انتظار و جداسازی به فرم ریاضی<sup>۳</sup> ارائه می‌شوند. شبه‌کد وضعیت دریافت، جهت کنترل گذار وضعیت‌های ۳، ۴ و ۵ در الگوریتم ۱ و شبه‌کد وضعیت جداسازی، جهت کنترل گذار وضعیت‌های ۶ و ۷ در الگوریتم ۲ ارائه شده است.

۲. در این مقاله فرض بر این است که مقصد همه بسته‌ها مسیریاب لبه می‌باشد (کاربردی مانند مانیتورینگ به واسطه قابلیت مشاهده در CoAP، گره یک بار درخواست را دریافت کرده و بارها تغییر وضعیت منبع را در قالب پاسخ ارسال می‌کند). جداسازی بسته‌ها بر اساس اشتراک مسیر در گام بعدی به کاهش ترافیک ناشی از بسته‌های ارسالی مسیریاب لبه به داخل شبکه حسگر کمک می‌کند، لذا جزئیات این بخش مطرح نخواهد شد.



شکل ۱۰: انتقال اطلاعات تجمع شده در چند گام.

اعمالی که در وضعیت انتظار انجام می‌شوند به شرح ذیل می‌باشند:  
الف) تنظیم تایمر WT: طبق (۱۰) اگر تایمر WT دارای مقدار اولیه نباشد با مقدار  $w_{n_i}^p$  مقداردهی اولیه می‌شود و در غیر این صورت کوچک‌ترین مقدار بین WT جاری و  $w_{n_i}^p$  در آن قرار می‌گیرد. به عبارتی در زمان دریافت بسته، جهت درج در صف انتظار QB، مقدار تایمر WT بر اساس حداکثر تأخیر قابل قبول بسته، به روز رسانی می‌شود

$$WT \leftarrow \min\{WT, w_{n_i}^p\} \quad (10)$$

ب) درج بسته  $p$  در بافر صف QB

$$QB \leftarrow Join(p, QB) \quad (10-1)$$

ج) انتظار برای دریافت بسته بعدی تا زمانی که شرط موجود در (۱۱) برقرار باشد. در غیر این صورت اگر فقط  $L(QB) > 0$  باشد، مقدار  $CMP(p)$  به روز رسانی شده<sup>۱</sup> و ارسال روبه‌جلوی QB انجام خواهد شد و تایمر WT و بافر QB بازنشانی می‌گردند

$$\leq L(QB) < CUR\_MAX\_PLD\_SZ - \Gamma \wedge WT \neq \\ \cdot \wedge DMW\_CanWait(CUR\_MAX\_PLD\_SZ - \Delta, w_{n_i}^p) = 1 \\ - L(QB) - \Delta, WT = 1) \quad (11)$$

تغییر وضعیت شماره ۵ زمانی اتفاق می‌افتد که شرط ذکر شده در (۱۲) برقرار است، یعنی زمانی که بسته دریافتی حاوی بیش از یک پیام باشد (به عبارتی پیام دریافتی حاوی مجموعه‌ای از زیربسته‌ها است که هر کدام پیامی برای لایه UDP/CoAP می‌باشند). در این مرحله، تمامی زیربسته‌ها با مقصد  $n_i$  جداسازی می‌شوند

$$\text{if } bs_{n_i}^p = \setminus \text{ then } \forall sub_j^p \in P \text{ if } Dst(sub_j^p) = n_i , \\ Disjoin(sub_j^p, P) \quad (12)$$

اگر مقصد زیربسته‌های استخراج شده، گره جاری باشد بعد از هر جداسازی با مهیاسازی بافر و فراخوانی متد دریافت، تغییر وضعیت شماره ۶ اتفاق می‌افتد تا دریافت عادی بسته شبیه‌سازی شود. شرط ذکر شده در (۱۳) بیانگر تغییر وضعیت‌های شماره ۵ و ۶ است

$$\text{if } bs_{n_i}^p = \setminus \text{ then } \forall sub_j^p \in P \text{ if } Dst(sub_j^p) = n_i , \\ Disjoin(sub_j^p, P) \text{ and call Recieve}(p_j) \quad (13)$$

۱. متناسب با انتظار اولویت بسته بالاتر خواهد رفت.

**Algorithm Wait****input** Packet  $p$ **output** void

(Note :  $Wait(p)$  method, Keep Packets in Queue Buffer consider to  $DMW\_CanWait$  Receive Packet length and admissible Packet Delay)

 $WT \leftarrow \min\{WT, w_{n_i}^p\}$  $QB \leftarrow Join(p, QB)$ **While**  $\cdot \leq L(QB) < MAX\_PLD\_SZ - \Gamma$  **and** $WT \neq \cdot$  **and**  $DMW\_CanWait(CUR\_MAX\_PLD\_SZ - L(QB) - \Delta, WT) = \setminus$  **do**

Wait for event

**if** event = Receive\_event **then** $WT \leftarrow \min\{WT, w_{n_i}^p\}$  $QB \leftarrow Join(p, QB)$ **else if** event = Time\_event

continue

**end if****end while** $WT \leftarrow \cdot$ call Forward( $QB$ )state  $\leftarrow$  Forward**return**

الگوریتم ۳: شبه کد وضعیت انتظار.

**Algorithm Forward****input** Packet  $p$ **output** voidoutput( $P_m$ ) $P_m \leftarrow null$ state  $\leftarrow$  Idle**return**

الگوریتم ۴: شبه کد وضعیت ارسال و ارسال روبه جلو.

**Algorithm Process\_Generated\_Packet****input** Packet  $p$ **output** void(Note :  $Send(p)$  method, Process Node

Generated Packet)

**if**  $CMP(p_g) \neq \cdot$  **and** ( $DMW\_CanWait(CUR\_MAX\_PLD\_SZ - L(p_g) - L(QB) - \Delta, w_{n_i}^p) = \setminus$ ) **then**call  $Wait(p_g)$ state  $\leftarrow$  wait**else if**  $CMP(p_g) = \cdot$  **or** ( $DMW\_CanWait(CUR\_MAX\_PLD\_SZ - L(p_g) - L(QB) - \Delta, w_{n_i}^p) = \cdot$ ) **then**call Forward( $p_g$ )state  $\leftarrow$  Send**return**

الگوریتم ۵: شبه کد وضعیت بی کار / پردازش.

**Algorithm Receive****input** Packet  $p$ **output** void(Note :  $Receive(p)$  method,

Process Node Received Packet)

**if** ( $bs_{n_i}^p = \cdot$ ) **and**  $Dst(p) \neq n_i$  **then****if**  $CMP(p) = \cdot$  **then**Forward( $p$ )**else if**  $CMP(p) \neq \cdot$  **and**  $DMW\_CanWait$ ( $CUR\_MAX\_PLD\_SZ - L(p) - L(QB) -$  $\Delta, w_{n_i}^p) = \setminus$  **then**call  $Wait(p)$ //state  $\leftarrow$  wait**end if****end if****if** ( $bs_{n_i}^p = \setminus$ )Disjoin( $sub_j^p, P$ )**return**

الگوریتم ۱: شبه کد وضعیت دریافت.

**Algorithm Disjoin****input** Packet  $p$ **output** void(Note :  $Disjoin(p)$  method, Extract Subpackets from input Packet and determine Next state)**if** ( $bs_{n_i}^p = \setminus$ ) **then****for each**  $sub_j^p$  **in**  $P$  **do** $p_j \leftarrow Extract(sub_j^p, P)$ **if**  $Dst(p_j) = n_k$  **and**  $n_k \neq n_i$  **then**Group by next hop and join( $p_j, P_k$ )**else if**  $Dst(p_j) = n_i$  **then**call  $Recieve(p_j)$ state  $\leftarrow$  Recieve**end if****end loop**call Forward( $P_k$ )state  $\leftarrow$  Forward**end if****return**

الگوریتم ۲: شبه کد وضعیت جداسازی.

همچنین شبه کد وضعیت انتظار، جهت کنترل گذار وضعیت ۸ در الگوریتم ۳ و شبه کد وضعیت ارسال و ارسال روبه جلو جهت کنترل گذار وضعیت ۹ در الگوریتم ۴ ارائه شده است. الگوریتم ۵ نیز بخشی از وضعیت بی کار / پردازش<sup>۱</sup> است که پردازش بسته های ایجاد شده توسط گره و گذار وضعیت های ۱۰ و ۱۱ را کنترل می کند.

۱. فقط بخشی از روال های بیکار / پردازش که مورد بحث می باشد در این قسمت درج شده است و گرنه وضعیت بیکار دارای پردازش های بیشتری از جمله کنترل رخداد می باشد.

سیستم را از تصمیم برای اقدام جدا کرد. به عبارتی با فرض بر منفی بودن مقدار اولیه این فیلد و یک واحد اضافه شدن آن به ازای هر موفقیت، زمانی سیستم اقدام به عمل می‌کند که قبلاً در پیش‌بینی خود، تجربه‌ای موفق کسب کرده باشد.

فیلد `reset_counter` در ساختار خانه‌های جدول  $T_{ni}^x$ ، مقادیری گسسته بین صفر تا ۳ می‌تواند داشته باشد. اگر فیلد `score` به مقدار ۱- برسد، مقدار `reset_counter` به اندازه یک واحد افزوده می‌شود و مادامی که `score` سیستم برابر ۱- است، `reset_counter` همچنان افزایش می‌یابد. اگر مقدار `reset_counter` برابر ۳ شود، خانه متناظر (کلاس طول-اولویت یکسان) از جدول  $T_{ni}^x$  با مقدار پیش‌فرض بازنشانی می‌گردد. دلیل این بازنشانی جلوگیری از گرفتارشدن الگوریتم در یک مقدار بیشینه ناشی از نوسانات شدید بازه زمانی دریافت پیام با یک کلاس مشخص (طول-اولویت) است چرا که هر خانه  $T_{ni}^x$  همواره با مقدار بیشینه بازه‌های زمانی دریافت یک کلاس مشخص پیام به‌روزرسانی می‌گردد تا بر اساس بدترین تجربه، پیش‌بینی محتمل‌تری ارائه شود. بنابراین بازنشانی این مقدار، منجر به جلوگیری از گرفتارشدن الگوریتم در نوسانات زمانی می‌شود. فیلد `reserved` در ساختار خانه‌های جدول  $T_{ni}^x$  یک مقدار باینری در ساختار کنترلی جدول  $T_{ni}^x$  است. اگر مقدار این فیلد برابر ۱ باشد بدین معنی است که پیامی در صف انتظار، جهت تجمیع با این پیام قرار گرفته است، لذا تا خروج پیام از صف انتظار، کلاس پیام مرتبط (طول-اولویت) جهت تجمیع با پیام‌های دیگر در نظر گرفته نخواهد شد. در شرح الگوریتم سیستم تصمیم‌گیری، نقش این فیلد در تصمیم‌گیری جهت انتظار روشن‌تر خواهد شد. متغیرهای آماری  $TP^5$  و  $FP^6$  در رابطه با عملکرد DMW در محیط پویا مؤثر هستند. متغیر  $TP$ ، مثبت حقیقی است و زمانی اتفاق می‌افتد که DMW، دریافت بسته در یک بازه زمانی مشخص را تخمین زده باشد و بسته در عمل هم در همین بازه دریافت گردد. متغیر  $FP$ ، مثبت کاذب است و زمانی اتفاق می‌افتد که DMW، دریافت بسته در یک بازه زمانی مشخص را تخمین زده باشد و بسته مناسب جهت تجمیع در این بازه، دریافت نگردد. ارزش پیش‌بینی مثبت  $(PPV)^7$  نشان می‌دهد چقدر احتمال وجود دارد که پیش‌بینی DMW در واقعیت رخ دهد. مقدار PPV از (۱۹) محاسبه می‌شود

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP} \quad (19)$$

در حین عملکرد DMW، مقادیر  $TP$  و  $FP$  به‌صورت برخط به روز رسانی می‌گردند و هر زمان که لازم باشد DMW بر اساس این مقادیر، تصمیم‌گیری می‌کند بدین صورت که ابتدا PPV را محاسبه می‌کند، اگر این مقدار از آخرین مقدار محاسبه شده برای PPV بزرگ‌تر باشد (PPV) رو به افزایش باشد) یا این مقدار بزرگ‌تر یا مساوی  $MIN\_PPV$  (حداقل ارزش پیش‌بینی مورد نیاز برای عملکرد سیستم) باشد، سیستم بر اساس تصمیمات DMW اقدام می‌کند. در غیر این صورت، فقط مشاهدات صورت پذیرفته و بسته در وضعیت انتظار قرار نمی‌گیرد. با PPV عملکرد کل DMW کنترل می‌گردد. مقدار  $MIN\_PPV$  به‌عنوان پارامتری در پیکربندی DMW با مقداری بین ۰ و ۱ تنظیم می‌گردد.<sup>۸</sup>

مراحل الگوریتم مؤلفه تصمیم‌گیری (DMW) جهت انتظار عبارتند از

5. True Positive
6. False Positive
7. Positive Predictive Value

۸. مثلاً در شبیه‌سازی بخش ۴، این مقدار روی ۰/۸۵ تنظیم خواهد شد.

طبق اطلاعات موجود در ویرایش ۲۰۱۱ از استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ حداکثر سباز بسته در `LoWAPN/CoAP` (مقدار `MAX_PLD_SZ`) برابر با ۱۱۶ بایت است. ضمناً با توجه به حداقل سباز ۴ بایتی `CoAP` [۴] و حداقل سباز ۲ بایتی `LoWAPN` و `UDP` در وضعیت فعال بودن فشرده‌سازی سرآیند [۱۷] حداقل سباز بسته در `LoWAPN/CoAP` برابر ۶ بایت خواهد بود.<sup>۱</sup> جهت استفاده بهینه از حافظه و کاهش محاسبات، بسته‌های دریافتی را که طول آنها بین ۶ تا ۱۱۶ بایت است دسته‌بندی می‌کنیم. دسته‌بندی به‌صورت پیش‌فرض در قالب ۱۰ بایتی انجام می‌شود<sup>۲</sup> و کلاس طول یک بسته طبق (۱۷) محاسبه می‌گردد

$$C_L(P_{ni}^l) = \frac{L(P_{ni}^l)}{10} + 1 \quad (17)$$

بنابراین همواره در لایه `LoWAPN` شماره کلاس طول بسته‌ها طبق (۱۸) خواهد بود

$$1 \leq C_L(P_{ni}^l) \leq 11 \quad (18)$$

با توجه به اطلاعات بالا می‌توان جدولی تعریف کرد که بتوان پیام‌های `CoAP` را بر اساس کلاس طول و اولویت پیام در آنها دسته‌بندی کرد. سه جدول  $T_{ni}^1$ ،  $T_{ni}^2$  و  $T_{ni}^3$  در ابعاد  $3 \times 11$  ایجاد می‌گردند. جدول  $T_{ni}^1$  حاوی مقادیر زمانی بوده و هر خانه آن حاوی زمان آخرین دریافت پیام از یک کلاس طول و اولویت مشخص است. جدول  $T_{ni}^2$  حاوی بازه‌های زمانی بوده و هر خانه آن بیانگر ماکسیمم فاصله بین دو دریافت از یک کلاس طول و اولویت مشخص است. هر خانه جدول  $T_{ni}^3$  حاوی یک ساختار<sup>۳</sup> کنترلی با ۳ فیلد به نام‌های `score`، `reserved` و `reset_counter` است. از این پس هر جا از کلمه کلاس پیام (کلاس طول-اولویت پیام) در یک جدول استفاده شد، منظور آدرس مشخص یکی از خانه‌های جدول بالا است که ردیف آن در جدول برابر  $C_L(P_{ni}^l)$  و ستون آن در جدول  $CMP(P_{ni}^l)$  است. فیلد `score` در ساختار خانه‌های جدول  $T_{ni}^3$ ، شاخص عددی عملکرد سیستم متأثر از فواصل زمانی ورودی‌ها است که مقدار اولیه آن عددی منفی است (در اینجا ۱-).<sup>۴</sup> اگر سیستم در تشخیص حداکثر زمان دریافت بسته بعدی در یک کلاس مشخص موفق عمل کند، به این مقدار یک واحد اضافه می‌شود و برعکس اگر به علت پویایی محیط (و به‌تبع آن پویایی زمان ورودی‌ها) پیش‌بینی حداکثر زمان دریافت بسته بعدی صحیح نباشد، از این مقدار یک واحد کسر می‌شود. لذا مقدار فیلد `score` بسته به عملکرد سیستم، منفی یا مثبت خواهد بود. بزرگ‌تر یا مساوی بودن این مقدار با صفر، شرط لازم برای سیستم جهت انتظار است. دلیل وجود این فیلد کنترلی این است که بتوان مشاهدات و پیش‌بینی‌های

۱. البته در کاربرد مورد نظر این پژوهش که مشاهدات می‌باشد تمامی بسته‌های مورد تحلیل دارای فیلد توکن می‌باشند که طول آن متغیر است. لذا قطعاً سباز حداقل بیشتر از ۶ بایت خواهد بود ولی چون قرار است روی بازه حداقل و حداکثر، دسته‌بندی صورت گیرد، سباز حداقل را همان سباز حداقل قطعی این پروتکل‌ها/استانداردها در نظر می‌گیریم.
۲. این مقدار می‌تواند در پیکربندی شبکه تعریف و قابل تنظیم باشد. مقادیر پایین این پارامتر دقت در درج مشاهدات را بالاتر می‌برد ولی محاسبات را جهت پیش‌بینی زیاد می‌کند (زیرا باعث افزایش یکی از ابعاد ماتریس طول-اولویت که تعریف خواهد شد می‌شود).

### 3. Structure

۴. دلیل انتخاب ۱- این است که مقدار پیش‌فرض هرچه بیشتر نزدیک به صفر باشد، سیستم سریع‌تر عملکرد خود را تطبیق می‌دهد. با توجه به این که شاخص عددی عملکرد سیستم مقداری صحیح است، نزدیک‌ترین عدد منفی نزدیک به صفر به عنوان مقدار پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شود.

**Algorithm DMW\_GetReceivedPackets\_Info****input**  $p_n^l$ **output** void(Note :  $DM_{GetReceivedPackets\_}$ Info( $p_n^l$ ) method, Update DM Tables) $i = C_L(p_n^l)$  $j = CMP(p_n^l)$ **if** ( $T_{ni}^v[i][j] \geq 0$ ) **then**

TimeDiffBetweenReceive =

ReceivedTime( $p_n^l$ ) -  $T_{ni}^v[i][j]$ **end if** $T_{ni}^v[i][j] \leftarrow ReceivedTime(p_n^l)$ **if** ( $T_{ni}^v[i][j] \geq 0$ ) **then****if** TimeDiffBetweenReceive >  $T_{ni}^v[i][j]$  **then** $T_{ni}^v[i][j] \leftarrow TimeDiffBetweenReceive$ **if** ( $T_{ni}^v[i][j].reset\_counter \geq 3$ ) **then** $T_{ni}^v[i][j] \leftarrow -1$  $T_{ni}^v[i][j].score \leftarrow -1$  $T_{ni}^v[i][j].reserved \leftarrow 0$  $T_{ni}^v[i][j].reset\_counter \leftarrow 0$ **end if****if** ( $T_{ni}^v[i][j].score = -1$ ) **then** $T_{ni}^v[i][j].reset\_counter ++$ **else** $T_{ni}^v[i][j].score --$ **end if**

FP ++

**else**

TP ++

**if** ( $T_{ni}^v[i][j].score < 1$ ) **then** $T_{ni}^v[i][j].score ++$ **end if** $T_{ni}^v[i][j].reset\_counter \leftarrow 0$ **if** $T_{ni}^v[i][j].reserved \leftarrow 0$ **else** $T_{ni}^v[i][j] \leftarrow 0$ **end if****return**

الگوریتم ۷: شبه‌کد بخش ناظر مؤلفه DMW بر ترافیک ورودی گره.

جداول زمانی و جدول کنترلی سیستم و گام ۵ تصمیم‌گیری را انجام می‌دهند. بخش‌های مؤلفه DMW در قالب شبه‌کدهای زیر (جهت استفاده در وضعیت‌های مختلف نمودار وضعیت سیستم) ارائه می‌گردند. شبه‌کد مقداردهی اولیه مؤلفه DMW در الگوریتم ۶ و شبه‌کد بخش ناظر مؤلفه DMW بر ترافیک ورودی گره (جریان بسته‌های دریافتی در لایه LowPAN) در الگوریتم ۷ ارائه شده است. شبه‌کد بخش تصمیم‌گیری در رابطه با نگاه‌داشتن یک بسته روی گره

**Algorithm DMW\_Initialize****input** void**output** void(Note :  $DM\_Initialize()$  method,

Initialize DM Tables)

**for each**  $T_{ni}^v[i][j]$  **in**  $T_{ni}^v, T_{ni}^v, T_{ni}^v$  **do** $T_{ni}^v[i][j] \leftarrow -1$  $T_{ni}^v[i][j] \leftarrow -1$  $T_{ni}^v[i][j].score \leftarrow -1$  $T_{ni}^v[i][j].reserved \leftarrow 0$  $T_{ni}^v[i][j].reset\_counter \leftarrow 0$ **end loop**TP  $\leftarrow 0$ FP  $\leftarrow 0$ **return**

الگوریتم ۸: شبه‌کد مقداردهی اولیه مؤلفه DMW.

(۱) جداول  $T_{ni}^v, T_{ni}^v, T_{ni}^v$  با مقادیر نامعتبر و پیش‌فرض، مقداردهی اولیه می‌شوند. (۲) در زمان دریافت یک بسته، در صورت معتبر بودن مقدار موجود در جدول  $T_{ni}^v$  بازه زمانی دو دریافت از یک کلاس پیام (طول-اولویت) محاسبه می‌شود. (۳) جدول  $T_{ni}^v$  بر اساس زمان دریافت بسته در کلاس مربوط به روز رسانی می‌شود. (۴) اگر بازه زمانی دو دریافت از مقدار متناظر کلاس پیام دریافتی در جدول  $T_{ni}^v$  بزرگ‌تر باشد، مقدار جدید در آدرس خانه مربوط در جدول  $T_{ni}^v$  درج می‌گردد. اگر عنصر مرتبط در جدول  $T_{ni}^v$  با مقدار بالاتر جایگزین شود از مقدار فیلد score از خانه متناظر در جدول  $T_{ni}^v$  یک واحد کسر می‌شود. اگر مقدار این فیلد به واسطه شکست‌های متوالی روی مقدار  $-1$  باقی بماند (حداکثر ۳ بار)، مقادیر مرتبط موجود در جداول  $T_{ni}^v$  و  $T_{ni}^v$  بازنشانی می‌شوند. این عمل باعث می‌شود الگوریتم در مقادیر بیشینه فاصله دو ورود (ناشی از نوسانات زمانی) گرفتار نشود. ضمناً به ازای هر شکست، مقدار FP یک واحد افزایش می‌یابد و در غیر این صورت (هنگام موفقیت در پیش‌بینی)، مقدار TP و مقدار فیلد score از خانه متناظر در جدول  $T_{ni}^v$ ، یک واحد اضافه می‌شوند و فیلدهای reserved و reset\_counter به صفر بازنشانی می‌گردند. (۵) در این مرحله، الگوریتم بر اساس ۳ پارامتر تصمیم می‌گیرد که آیا بسته می‌تواند جهت تجمیع با بسته مکمل از نظر سایز منتظر بماند یا خیر.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در تصمیم‌گیری، مقدار  $w_{ni}^p$  است که بیانگر حداکثر زمان مجاز برای بسته  $p$  جهت حضور روی گره  $n_i$  است. سپس مقادیری که در تصمیم‌گیری دخیل می‌باشند، فیلدهای reserved و score در ردیف-ستون متناظر با کلاس پیام در جدول  $T_{ni}^v$  هستند. اگر سیستم تجربه موفق در پیش‌بینی داشته است (مقدار score بزرگ‌تر یا مساوی صفر باشد) و قبلاً کلاس جاری برای بسته در انتظار دیگری، ذخیره نشده باشد (مقدار reserve برابر با صفر باشد) و به شرط این که مقدار متناظر با کلاس پیام در جدول  $T_{ni}^v$  موجود بوده و کوچک‌تر از  $w_{ni}^p$  باشد بسته می‌تواند در بافر انتظار QB قرار گیرد.

گام ۱ از الگوریتم بالا، عملیات مقداردهی اولیه جداول زمانی و جدول کنترلی را انجام می‌دهد. گام‌های ۲ تا ۴ کارهای مرتبط با به‌روزرسانی

معرفی شده در [۲۹] که از این پس تحت عنوان SPS<sup>۲</sup> نام برده می‌شود مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد که اخیرترین روش ارائه شده جهت کاهش سربار پشته پروتکل ۶LoWPAN/IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ در انتقال داده‌های لایه کاربرد است. جهت پیاده‌سازی از شبیه‌ساز [۳۰] cooja تحت سیستم عامل contiki [۳۱] استفاده شده است. contiki دارای یک موتور پردازشگر با مصرف انرژی کم به نام Erbium است که CoAP را پیاده‌سازی کرده است [۳۲]. همچنین از Copper که افزونه‌ای برای مرورگر Firefox به منظور پشتیبانی از CoAP است جهت ارسال درخواست CoAP/Observe از طریق وب به شبکه شبیه‌سازی شده در cooja استفاده شده است. با توجه به این که تأکید روش پیشنهادی بر کاهش ترافیک از گره‌های حسگر به مسیر یاب لبه (در کاربردهایی نظیر مانیتورینگ) است، شاخص‌های ارزیابی عملکرد در انتقال بسته‌های گره‌های شبکه حسگر به مسیر یاب لبه در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر ۶LoWPAN/CoAP جهت کاربرد مانیتورینگ در زیر معرفی می‌گردند.

#### ۴-۱ درصد موفقیت در کاهش بسته‌های خروجی (SP<sub>t</sub><sup>N</sup>)

با فرض این که مسیر بسته‌ها از داخل شبکه به سمت مسیر یاب لبه است، شاخص SP<sub>t</sub><sup>N</sup> جهت اندازه‌گیری میزان کاهش تعداد کل بسته‌های خارج شده از گره‌های حسگر به مقصد مسیر یاب لبه نسبت به مجموع کل بسته‌های خروجی در روش SPS تا زمان  $t$  است و مقدار آن از (۲۰) محاسبه می‌شود

$$SP_t^N = \frac{M_t^N}{X_t^N} \times 100 \quad (20)$$

$$Dst(p) = ER, \forall p \in P_{ni}^I, \forall p \in P_{ni}^S$$

که در آن  $M_t^N$  تعداد بسته‌های کاهش یافته از خروجی مجموعه گره‌های حسگر (به جز مسیر یاب لبه) به واسطه استفاده از روش پیشنهادی، از زمان شروع به کار شبکه تا زمان  $t$  بوده و مقدار آن از (۲۱) محاسبه می‌شود.  $X_t^N$  نیز تعداد کل بسته‌های ورودی یا ایجاد شده در روش SPS برای کل مجموعه گره‌های حسگر (به جز مسیر یاب لبه) از زمان شروع به کار شبکه تا زمان  $t$  است که مقدار آن از (۲۲) محاسبه می‌شود

$$M_t^N = \sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{ni}^I| + \sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{ni}^S| - \sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{ni}^O| \quad (21)$$

$$X_t^N = \sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{ni}^I| + \sum_{n_i \in N \setminus ER} |P_{ni}^S| \quad (22)$$

#### ۴-۲ میزان کاهش ترافیک وابسته به کاربرد و عملکرد

##### پشته پروتکل ۶LoWPAN (RTR<sub>t</sub><sup>N</sup>)

ترافیک شبکه برابر با مقدار داده در حال حرکت در سراسر شبکه در یک نقطه معین از زمان و متأثر از پارامترها و متغیرهای ساختاری و محیطی مختلفی است. در اینجا ترافیک ناشی از کاربرد (پاسخ گره‌ها به مشاهدات ثبت شده روی آنها مانند کاربرد مانیتورینگ) و عملکرد پشته ۶LoWPAN در کاهش خروجی گره‌ها مد نظر است. دو پارامتر PHY\_OH (سربار لایه فیزیکی) و ACK\_OH (سربار تصدیق در لایه فیزیکی) بر اندازه‌گیری این ترافیک تأثیرگذار هستند. سربار لایه فیزیکی، همان سربار واحد داده پروتکل لایه فیزیکی PPDU روی بسته‌های

#### Algorithm DMW\_CanWait

input  $L, w_{ni}^p$

output  $\cdot$  or  $\setminus$

(Note: DM\_CanWait( $L, w_{ni}^p$ ) method,

return decision for keep  $L$  on Node)

for  $i = \cdot$  to  $C_L(L)$  do

for  $j = \cdot$  to getCMP( $w_{ni}^p$ ) do

if  $T_{ni}^x[i][j] > \cdot$  then

if  $T_{ni}^x[i][j] \leq w_{ni}^p$  and  $T_{ni}^x[i][j].reserved = \cdot$

and  $T_{ni}^x[i][j].score \geq \cdot$  then

$T_{ni}^x[i][j].reserved \leftarrow \setminus$

if  $TP = \cdot$  return  $\cdot$

$$PPV \leftarrow \left( \frac{TP}{TP + FP} \right)$$

if  $(PPV \geq pastPPV)$  or

$(PPV \geq MIN\_PPV)$  then

$pastPPV \leftarrow PPV$

return  $\setminus$

else

$pastPPV \leftarrow PPV$

return  $\cdot$

end if

end if

end if

end loop

end loop

return  $\cdot$

الگوریتم ۸: شبه‌کد بخش تصمیم‌گیری از مؤلفه DMW.

(جهت انتظار) در الگوریتم ۸ ارائه شده است. مقدار  $pastPPV$  در این شبه‌کد، یک مقدار محلی و استاتیک از نوع شناور<sup>۱</sup> با مقدار اولیه صفر است. در این بخش، روش پیشنهادی این مقاله جهت کاهش سربار لایه فیزیکی و مک IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ روی بسته‌های لایه شبکه ۶LoWPAN با هدف انتقال پیام‌های کوچک مبتنی بر پروتکل CoAP جهت کاربردهایی مانند مانیتورینگ ارائه شد. روش پیشنهادی سبک‌وزن بوده و روی گره‌های با منابع محدود قابل استفاده است. همچنین لایه‌های استاندارد شبکه، مک و فیزیکی را دستکاری نکرده و عملکرد آن از دید کاربر پشته پروتکل ۶LoWPAN پنهان است. در بخش بعد میزان تأثیر مثبت روش پیشنهادی بر ترافیک شبکه و مصرف انرژی گره‌ها در مقایسه با ساختار پایه‌ای پشته پروتکل ۶LoWPAN/CoAP (در شبکه‌های چندگامی با کاربرد مانیتورینگ و هدف انتقال داده‌های کوچک) بررسی می‌گردد.

#### ۴-۳ شبیه‌سازی و ارزیابی

در این بخش ابتدا شاخص‌هایی کمی جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی معرفی شده و سپس عملکرد آن مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. عملکرد روش پیشنهادی با عملکرد پشته پروتکل استاندارد

2. Standard Protocol Stack

3. Success Percent

1. Static Float

جدول ۱: ساختار بسته لایه فیزیکی در IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ ویرایش ۲۰۱۱ [۱۴].

ساختار PDU			
PSDU		سرآیند PDU	
بسته لایه مک	طول بسته مک	سرآیند هماهنگ سازی <sup>۱</sup> (SHR)	
تا ۱۲۷ بایت	۱ بایت	۱ بایت	۴ بایت

۱. Synchronization Header

جدول ۲: فرمت و ساختار بسته تصدیق در لایه مک از استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ ویرایش ۲۰۱۱ [۱۴].

سرآیند بسته تصدیق در لایه مک		
سرآیند بسته تصدیق در لایه مک		(FCS) دنباله
فیلد کنترل قاب <sup>۲</sup>	فیلد شماره ترتیب	چک قاب
۲ بایت	۱ بایت	۲ بایت

۱. Frame Check Sequence

۲. Frame Control

مصرفی جهت ارسال بسته در [۳۳]، انرژی صرف شده در شبکه برای انتقال یک بایت از (۲۶) محاسبه می شود

$$E^i = E_{send}^i + E_{Receive}^i \quad (26)$$

که در آن  $E_{send}^i$  انرژی مورد نیاز برای ارسال یک بایت از گره  $i$  به گره همسایه (در یک گام) و  $E_{Receive}^i$  انرژی مورد نیاز برای دریافت همان یک بایت توسط گره  $j$  است. با توجه به موارد فوق، میزان کاهش انرژی مصرف شده جهت انتقال بسته ها از گره  $n_i$  به گره  $n_j$  توسط (۲۷) محاسبه می شود

$$RES_{n_i}^{n_j} = (E^i \times H_{n_i}^{n_j} \times RTR_i^{n_j}) - (\varepsilon \times M_i^{n_j}) \quad (27)$$

که در آن  $RTR_i^{n_j}$  میزان کاهش تعداد بایت ارسال شده توسط گره تا زمان  $t$ ،  $H_{n_i}^{n_j}$  تعداد گام ها از  $n_i$  تا  $n_j$  و  $\varepsilon$  برابر میانگین انرژی محاسباتی مورد نیاز جهت تجمیع بسته در گره  $n_i$  است. با استفاده از (۲۷) می توان میزان کاهش انرژی مصرفی وابسته توسط کل شبکه را بر اساس اتصال<sup>۶</sup> بین گره ها و مسیر جریان بسته ها از گره های داخل شبکه تا مسیر یاب لبه، محاسبه کرد. با توجه به این که در [۳۳] میزان انرژی حسگرهای TmoteSky اندازه گیری شده و شبیه ساز cooja قابلیت شبیه سازی این گونه حسگرها را دارد، جهت اندازه گیری مقدار انرژی مصرفی توسط گره ها در شبیه سازی از TmoteSky استفاده نموده و میزان انرژی مصرفی اش با مؤلفه رادیویی CC۲۴۲۰ برای انتقال یک بایت برابر مقدار درج شده در [۳۳] یعنی  $0.12 \text{ mJ}$  قرار داده شده است. لذا (۲۷) را می توان برای TmoteSky با مؤلفه رادیویی CC۲۴۲۰ به صورت (۲۸) باز نویسی کرد

$$RES_{n_i}^{n_j} \cong 0.24 \times H_{n_i}^{n_j} \times RTR_i^{n_j} \quad (28)$$

با توجه به این که در [۳۳] میزان مصرف انرژی جهت انتقال یک بیت برابر میزان انرژی مورد نیاز برای انجام  $700,000$  محاسبه اعلام شده است از سر بار محاسبات به علت سبک بودن الگوریتم های روش پیشنهادی صرف نظر گردیده و بنابراین (۲۸) جهت محاسبه کاهش مصرف انرژی برای انتقال یک بیت، قابل استفاده است. شکل ۱۰ توپولوژی توری چندگامی شبکه مورد نظر را نشان می دهد که در آن، گره های ۸، ۹ و ۱۰ فعال نیستند. همچنین گره های ۷ و ۵ وظیفه انتقال بسته ها بین گره ۲ و مسیر یاب لبه را بر عهده دارند.

روی گره های ۲، ۳، ۴ و ۶ موضوعاتی جهت مشاهده ثبت شده<sup>۸</sup> است که رخداد مرتبط با آنها دارای مقدار ۵ تا ۱۳ بیتی است. جدول ۳ حاوی برخی مشخصه های شبکه شبیه سازی شده و پارامترهای روش پیشنهادی است.

در توپولوژی نشان داده شده در شکل ۱۱، اطلاعات تجمیع شده در گره

6. Link

۷. میلی ژول

8. Subjects for Observe

ارسالی مطابق ویرایش ۲۰۱۱ استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ است که در جدول ۱ نشان داده شده است. این سر بار همواره در ارسال بسته های لایه مک به بسته تحمیل می شود.

اگر فرستنده بسته، فیلد درخواست تصدیق<sup>۱</sup> (AR) را در سرآیند بسته مک برابر ۱ تنظیم کرده باشد، دریافت کننده باید یک بسته تصدیق در پاسخ ارسال کند. جدول ۲ ساختار و سر بار این بسته را نشان می دهد.

با توجه به این که کاهش هر بسته در لایه شبکه (به واسطه تجمیع اطلاعات)، منجر به کاهش سر بار لایه فیزیکی (PHY\_OH) به علاوه سر بار جاری لایه مک<sup>۲</sup> (CUR\_MAC\_OH) و سر بار ناشی از پیام تصدیق (ACK\_OH) می گردد، لذا میزان کاهش ترافیک وابسته بر حسب بایت<sup>۳</sup> ( $RTR_i^N$ ) در بازه زمانی  $t$  از (۲۳) محاسبه می شود

$$RTR_i^N = M_i^N \times (PHY\_OH + CUR\_MAC\_OH + ACK\_OH) - M_i^N \text{ byte} \quad (23)$$

علامت تفریق در این رابطه، بیانگر آن است که کاهش هر بسته از خروجی به معنی تجمیع آن با یک بسته دیگر است. سر بار تجمیع، یک بایت بوده<sup>۴</sup> و لذا تعداد بسته های کاهش یافته از کل سر بار حذف شده، کم می گردد. مقدار فوق برای یک گره برابر با میزان کاهش خروجی گره بر حسب بایت است و از (۲۴) محاسبه می شود

$$RTR_i^{n_j} = M_i^{n_j} \times (PHY\_OH + CUR\_MAC\_OH + ACK\_OH) - M_i^{n_j} \text{ byte} \quad (24)$$

که در آن  $M_i^{n_j}$  برابر تعداد بسته های کاهش یافته از خروجی گره  $n_i$  است و از  $RTR_i^{n_j}$  جهت محاسبه کاهش مصرف انرژی در گره استفاده می شود. همچنین میانگین کاهش ترافیک وابسته توسط روش پیشنهادی از (۲۵) قابل محاسبه است

$$RTR_i^N = \frac{RTR_i^N}{t} \text{ byte/s} \quad (25)$$

### ۳-۴ میزان کاهش مصرف انرژی وابسته به کاربرد و عملکرد پشته پروتکل LoWPAN<sup>۵</sup> ( $RES_{n_i}^{n_j}$ )

برای محاسبه میزان مصرف انرژی صرف شده در شبکه جهت انتقال یک بایت، هم باید انرژی مورد نیاز برای ارسال بسته و هم انرژی مورد نیاز برای دریافت آن را در نظر گرفت. اگر انتقال در یک گام انجام شود، با فرض یکسان بودن نوع گره ها در شبکه، ثابت بودن شرایط محیطی و فاصله بین مبدأ و مقصد، همچنین خطی بودن فرمول محاسبه انرژی

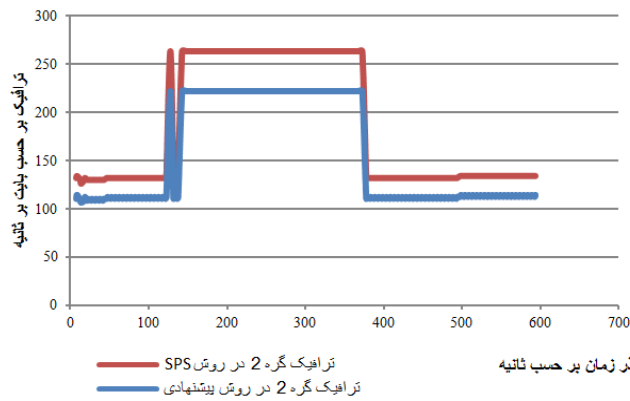
1. Acknowledgment Request

۲. در پیوست تعریف شده است.

3. Relative Traffic Reduction

۴. یک بیت علامت این که بسته حاوی زیر بسته می باشد و ۷ بیت برای مشخص کردن طول زیر بسته.

5. Relative Energy Saving



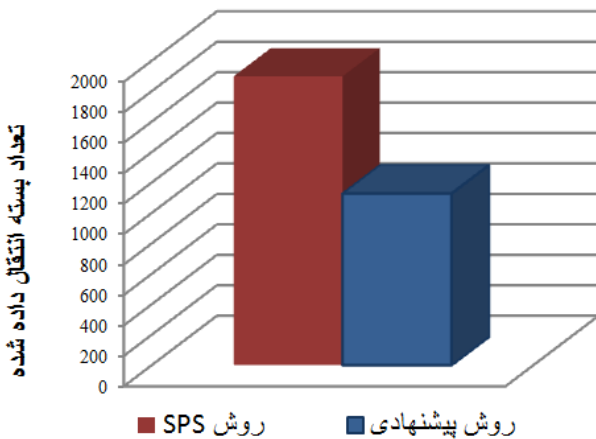
شکل ۱۲: تفاوت روش پیشنهادی و روش SPS در ترافیک خروجی گره شماره ۲ (در ۶۰۰ ثانیه).



شکل ۱۱: تفاوت روش پیشنهادی و روش SPS در تعداد بسته‌های خروجی گره شماره ۲ (در ۶۰۰ ثانیه).

جدول ۳: پارامترها و مقادیر شبیه‌سازی شبکه در روش پیشنهادی.

مقدار	پارامتر
۱۹ تا ۲۷ بایت	سایز بسته‌های ایجادشده در لایه کاربرد
۴۵ تا ۵۳ بایت	سایز بسته در لایه شبکه (LoWPAN)
۶۶ تا ۷۴ بایت	سایز بسته در لایه مک
۲۳۷ بسته	تعداد بسته ایجادشده روی هر گره در زمان شبیه‌سازی
۴۵۴۷ تا ۵۱۹ میلی‌ثانیه	فاصله زمانی ایجاد بسته در گره
۶۰۰ ثانیه	زمان شبیه‌سازی
۲ (پیام‌هایی با اولویت معمولی)	اولویت بسته‌ها (CMP)
۵ ثانیه	حداکثر تأخیر قابل قبول (MAD)
۰.۹۵	MIN_PPV



شکل ۱۳: مقایسه سرجمع ترافیک شبکه بین روش SPS و روش پیشنهادی (بر حسب تعداد بسته در ۶۰۰ ثانیه).

$$RTR_{t=600}^N = M_t^N \times (PHY_{OH} + CUR_{MAC_{OH}} + ACK_{OH}) - M_t^N = (1.09 + 22.0 \times 3) \times (6 + 21 + 11) - (1.09 + 22.0 \times 3) = 28453 \text{ Byte} \quad (30)$$

همچنین میانگین کاهش ترافیک وابسته برای شبکه شبیه‌سازی شده، توسط روش پیشنهادی نسبت به روش SPS برابر است با

$$RTR_N = \frac{RTR_{t=600}^N}{t} = \frac{28453}{600} = 47.42 \text{ byte/s} \quad (31)$$

گره شماره ۲ در شبکه شبیه‌سازی شده، یک نقطه گلوگاهی بوده و کاهش ترافیک روی این نوع گره‌ها می‌تواند در کارایی شبکه و افزایش طول عمر آن، تأثیر مثبت داشته باشد. شکل ۱۲ بر اساس محاسبه ترافیک خروجی گره شماره ۲ نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی، ترافیک خروجی این گره را کاهش داده است.

رابطه (۲۸) خطی بودن ارتباط بین میزان کاهش ترافیک و انرژی مصرفی را نشان می‌دهد، لذا مصرف انرژی گره ۲ نیز متناسب با شکل ۱۲ (در زمان شبیه‌سازی) کاهش می‌یابد. میزان کاهش مصرف انرژی کل شبکه توسط روش پیشنهادی نسبت به روش SPS برابر است با

$$RES \cong RES_{n_2}^n + RES_{n_2}^n = (0.24 \times 1 \times 1.09 \times 38) + (0.24 \times 3 \times 22.0 \times 38) = 70.13728 \text{ mj} \quad (32)$$

در شکل ۱۳ تعداد کل بسته‌های ایجادشده در گره‌ها و تعداد کل بسته‌های انتقال‌یافته بین گره‌ها در طول ۶۰۰ ثانیه شبیه‌سازی شده، آمده است.

۲، طی ۳ گام به مسیر یاب لبه می‌رسد و حاصل تجمیع بسته‌های گره ۴ و ۶ طی ۴ گام به مسیر یاب لبه می‌رسند. جهت بررسی درصد موفقیت<sup>۱</sup> از نظر کاهش بسته‌های خروجی، شبیه‌سازی به مدت ۱۰ دقیقه انجام گرفت. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های روش پیشنهادی روی داده ایجادشده در شبکه جهت ارسال رو به جلوی بسته در مقایسه با روش SPS و در شرایط یکسان در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

این نمودار، اطلاعات بسته خارج‌شده از گره شماره ۲ که دارای پیکربندی شکل ۱۰ است، را نشان می‌دهد. نمودار قرمز رنگ مربوط به عملکرد عادی شبکه (تعداد بسته خارج‌شده از گره ۲) در ارسال روبه‌جلوی بسته‌های دریافت‌شده از گره‌های ۶ و ۳ را نمایش می‌دهد. نمودار آبی نشان می‌دهد با اجرای الگوریتم‌های مرتبط با DMW از روش پیشنهادی روی جریان داده در شرایط یکسان، تعداد بسته خارج‌شده از گره ۲ در طول زمان، کاهش یافته است. شاخص  $SP_t^N$  جهت اندازه‌گیری درصد بهبود (تعداد کل بسته‌های کاهش‌یافته در زمان کارکرد شبکه) به‌واسطه استفاده از روش پیشنهادی به صورت زیر محاسبه می‌گردد. البته این بهینه‌سازی متأثر از نظم تقریبی رخدادهای ایجادشده است و در محیط‌های پویا متفاوت خواهد بود

$$SP_{t=600}^N = \frac{1.09 + 22.0 \times 3}{1897} \times 100 = 4.06\% \quad (29)$$

میزان کل کاهش ترافیک وابسته برای شبکه شبیه‌سازی شده به واسطه استفاده از روش پیشنهادی طبق (۲۴) در طی ۶۰۰ ثانیه برابر است با

## مراجع

- [1] E. T. Winter and E. P. Thubert, "RFC 6550 RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks," IETF Stand. Track, 2012.
  - [2] W. Colitti, K. Steenhaut, N. De Caro, B. Buta, and V. Dobrota, "Evaluation of constrained application protocol for wireless sensor networks," in *Proc. 18th IEEE Work. Local Metrop. Area Networks, LANMAN'11*, 6 pp., Chapel Hill, NC, USA, 13-14 Oct. 2011.
  - [3] Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, *RFC 7252 The Constrained Application Protocol (CoAP)*, Rfc 7252, p. 112, 2014.
  - [4] W. Li-Hong, T. Hai-Kun, and Y. G. Hua, "Sensors access scheme design based on internet of things gateways," in *Proc. Fifth Int. Conf. Intell. Syst. Des. Eng. Appl.*, pp. 901-904, Hunan, China, 15-16 Jun.. 2014.
  - [5] M. Castro, A. J. Jara, and A. F. Skarmeta, "Enabling end-to-end CoAP-based communications for the web of things," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 59, no. C, pp. 230-236, Jan. 2014.
  - [6] H. Kuo, "Design and implementation of light-weight smart home gateway for social web of things," in *Proc. 6th Int. Conf. on Ubiquitous and Future Networks, ICUFN'14*, pp. 425-430, Shanghai, China, 8-10 Jul. 2014.
  - [7] R. Minerva, A. Biru, and D. Rotondi, "Towards a definition of the internet of things (IoT)," *IEEE Internet Things*, Rev. 1, 2017.
  - [8] A. Ludovici and A. Calveras, "A proxy design to leverage the interconnection of CoAP wireless sensor networks with web applications," *Sensors*, vol. 15, no. 1, pp. 1217-1244, Jan. 2015.
  - [9] T. Leva, O. Mazhelis, and H. Suomi, "Comparing the cost-efficiency of CoAP and HTTP in web of things applications," *Decis. Support Syst.*, vol. 63, pp. 23-38, Oct. 2014.
  - [10] C. Bormann, A. P. Castellani, and Z. Shelby, "CoAP: an application protocol for billions of tiny internet nodes," *IEEE Internet Comput.*, vol. 16, no. 2, pp. 62-67, Mar./Apr. 2012.
  - [11] C. Science, "Toward the Internet of things tpplication and management: a Practical approach," in *Proc of IEEE Int. Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Sydney, NSW, Australia, 19-19 Jun. 2014.
  - [12] I. Ishaq, et al., "IETF standardization in the field of the internet of things (IoT): a survey," *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 2, no. 2, pp. 235-287, 2013.
  - [13] M. Laine, "RESTful Web Services for the Internet of Things," pp. 2-4.
  - [14] I. Standard and I. C. Society, "Local and metropolitan area networks-Part 15. 4: low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs) IEEE Computer Society," vol. 2011, no. September, 2011.
  - [15] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols and applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 4, no. 99, pp. 2347-2376, Fourth Quarter 2015.
  - [16] N. S. Bhat, "Design and implementation of IEEE 802.15.4 Mac protocol on FPGA," pp. 4-8, 2011.
  - [17] S. and C. B. Zach, 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. 2011.
  - [18] G. Mulligan, "The 6LoWPAN architecture," 6LoWPAN Work. Gr. Internet Eng. Task Force, p. 78, 2007.
  - [19] "ARM IoT Tutorial CoAP: The web of things protocol," 2014. [Online]. Available: [https://community.arm.com/servlet/JiveServlet/previewBody/8633-102-2-15471/ARM CoAP Tutorial April 30 2014.pdf](https://community.arm.com/servlet/JiveServlet/previewBody/8633-102-2-15471/ARM%20CoAP%20Tutorial%20April%2030%202014.pdf). [Accessed: 04-Aug-2016].
  - [20] M. Kovatsch, S. Duquennoy, and A. Dunkels, "A low-power CoAP for Contiki," in *Proc. 8th IEEE Int. Conf. Mob. Ad-hoc Sens. Syst. MASS.11*, pp. 855-860, Valencia, Spain, 17-22 Oct. 2011.
  - [21] W. Colitti, K. Steenhaut, and N. De Caro, "Integrating wireless sensor networks with the web," in *Proc. Conf. Inf. Process. Sens. Networks, IP+ SN'11*, pp. 2-6, Chicago, IL, USA, 12-14 Apr. 2011.
  - [22] S. Duquennoy, N. Wirstrom, N. Tsiftes, and A. Dunkels, "Leveraging IP for Sensor Network Deployment," Sics.Se, 2011.
  - [23] S. Elias and S. Shivashankar, "A REST based design for web of things in smart environments," in *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Parallel, Distributed and Grid Computing*, pp. 337-342, Solan, India, 6-8 Dec. 2012.
  - [24] W. Colitti, K. Steenhaut, N. De Caro, B. Buta, and V. Dobrota, "REST enabled wireless sensor networks for seamless integration with web applications," in *Proc. IEEE Eighth Int. Conf. Mob. Ad-Hoc Sens. Syst.*, pp. 867-872, Valencia, Spain, 17-22 Oct. 2011.
  - [25] Y. Park, N. T. Dinh, and Y. Kim, "A network monitoring system in 6LoWPAN networks," in *Proc. 4th Int. Conf. Commun. Electron. ICCE11*, pp. 69-73, Hue, Vietnam, 1-3 Aug. 2012.
- با توجه به موارد فوق، بررسی‌های انجام‌شده نشان‌دهنده آن است که برای کاربردهایی مانند مشاهده<sup>۱</sup> تغییرات دوره‌ای موضوعاتی<sup>۲</sup> که بسته‌های مربوط به آنها کوچک بوده و باید تغییرات آنها به‌صورت دوره‌ای به مرکز اعلام شود، استفاده از روش پیشنهادی در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر پشته پروتکل 6LoWPAN/CoAP منجر به کاهش ترافیک شبکه و مصرف انرژی گره‌ها می‌شود.
- ### ۵- نتیجه‌گیری و کارهای آینده
- در کنار مزیت‌های شبکه‌های مبتنی بر 6LoWPAN/CoAP انتقال داده‌های کوچک در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر آن به علت سربار ناشی از لایه‌های شبکه، ترافیک زیادی را به شبکه تحمیل می‌کند. روشی با هدف کاهش سربار لایه فیزیکی و مک 802.15.4 IEEE روی بسته‌های لایه شبکه 6LoWPAN در این مقاله پیشنهاد شد. این روش از نظر مصرف انرژی، توان پردازشی و حافظه مورد نیاز، سبک‌وزن بوده و روی گره‌های با منابع محدود قابل استفاده است. همچنین لایه‌های استاندارد شبکه، مک و فیزیکی را دست‌کاری نکرده و عملکرد آن از دید کاربر پشته پروتکل 6LoWPAN پنهان است. نتایج ارزیابی‌ها نشان داده که برای کاربردهایی مانند مانیتورینگ، استفاده از روش پیشنهادی در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر پشته پروتکل 6LoWPAN/CoAP ترافیک شبکه و مصرف انرژی گره‌ها را کاهش می‌دهد. این روش برای اولین بار در رابطه با کاهش ترافیک و مصرف انرژی ناشی از انتقال پیام‌های CoAP در شبکه‌های چندگامی مبتنی بر پشته پروتکل 6LoWPAN مطرح شده است. به علت پیچیدگی و گستردگی ویژگی‌ها و عملکرد لایه‌های مختلف این پشته پروتکل و کاربرد آن در حوزه مانیتورینگ، بر روی لایه‌های زیرین لایه شبکه از بُعد تصمیم‌گیری جهت انتظار (توسط DMW) تمرکز شده است.
- تحقیقات آینده می‌تواند به کاهش سربار ناشی از لایه UDP بپردازند. با توجه به این که مقصد تمامی بسته‌های UDP حاوی پیام‌های CoAP مسیریاب لیه است، می‌توان در عملیات تجمیع بسته‌های شبکه، بخش پورت مقصد و فیلد سرجمع را حذف و در لایه شبکه گره مقصد، قبل از تحویل بسته به پروتکل لایه بالا (UDP) آن را بازسازی نمود. همچنین با توجه به اولویت متفاوت درخواست‌های دریافتی از مشتریان وب، قابلیت نهان‌سازی و حداکثر زمان اعتبار پیام‌های پاسخ در پروتکل CoAP، می‌توان به کمک ایجاد و مدیریت صف اولویت درخواست‌ها در مسیریاب لیه، دسته‌بندی و مدیریت مناسب‌تری بر روی درخواست‌های دریافت‌شده توسط شبکه LR-WPAN مبتنی بر پشته پروتکل 6LoWPAN/CoAP و پاسخ به آنها اعمال نمود. به علاوه با شناسایی الگوی مراجعه به شبکه، می‌توان قبل از این که درخواست دریافت شود، اطلاعات مورد نیاز احتمالی را با بهره‌بردن از مدل‌های سری زمانی بازایی نموده و کاربرد شبکه‌های مبتنی بر پشته پروتکل 6LoWPAN در حوزه سلامت و امنیت را توسعه بخشید.
- ### پیوست
- در جدول پ-۱، نشانه‌گذاری و تعاریف مقاله آمده است.
1. Observe
  2. Subjects



جدول پ-۱: جدول نشانه‌گذاری و تعاریف.

علامت	شرح
$N$	مجموعه نودهای شبکه حسگر مبتنی بر پشته پروتکل 6LoWPAN/CoAP
$n_i$	گره $i$ از شبکه حسگر
$ER$	مسیریاب لبه
$P_n^I$	مجموعه بسته‌های ورودی به گره $n_i$ (با فرمت 6LoWPAN UDP CoAP)
$P_n^O$	مجموعه بسته‌های خروجی از گره $n_i$ (با فرمت 6LoWPAN UDP CoAP)
$P_n^S$	مجموعه بسته‌های ایجاد و ارسال شده توسط $n_i$ (با فرمت 6LoWPAN UDP CoAP)
$L()$	متد دریافت مجموع ساین بسته‌های یک مجموعه و یا یک بسته (به بایت)
$Dst()$	متد بازیابی مقصد بسته
$w_{n_i}^p$	میزان حداکثر مجاز انتظار یک بسته در گره $n_i$ (اندازه بازه زمانی دریافت تا ارسال روبه‌جلوی بسته)
$WT$	تایمر حداکثر زمان حضور محتوی بافر صف QB روی گره که صفرشدن به این معنی است که بسته QB فوری باید ارسال شود و حداکثر مقدار آن برابر $w_{n_i}^p$ است.
$MaxAge(p)$	متد دریافت حداکثر عمر بسته $p$ (با توجه به کم‌ترین عمر منابع موجود در آن)
$\forall OW D_{ER}^n$	تأخیر از $n_i$ به ER (در اینجا $RTT/2$ فرض می‌شود <sup>۱</sup> )
$PT_{n_i}^p$	مجموع زمان پردازش‌های مرتبط با بسته $p$ روی $n_i$ (شامل زمان بررسی نوع کلاس تأخیر مجاز بسته، زمان پیدا کردن MaxAge به علاوه زمان تجمیع احتمالی با یک بسته دیگر)
$CMP()$	متد بازیابی اولویت پیام CoAP. مقدار بازگشتی این متد عضو مجموعه {۰، ۱، ۲، ۳} است. مقدار صفر بالاترین اولویت و مقدار ۳ پایین‌ترین اولویت است.
$MAD()$	متد بازیابی ماکسیمم تأخیر قابل قبول پیام CoAP
$type()$	متد بازیابی نوع پیام CoAP
$PROCESSING\_DELAY$	فاصله زمانی دریافت یک پیام CON تا ارسال تأیید آن (پیام ACK)
$MIN\_MAC\_OH$	حداقل و حداکثر سربار ممکن لایه مک (منطبق با IEEE ۸۰۲.۱۵.۴). طبق استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ و برایش ۲۰۱۱ مقدار
$MAX\_MAC\_OH$	سربار لایه مک در پیکربندی جاری شبکه <sup>۲</sup> . مقدار ثابت CUR_MAC_OH بسته به تنظیمات شبکه در لایه IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ مشخص شده <sup>۴</sup> است.
$CUR\_MAC\_OH$	حداکثر ساین بسته‌ای که می‌توان جهت ارسال از لایه 6LoWPAN به لایه مک فرستاد (حداکثر ساین payload استاندارد IEEE ۸۰۲.۱۵.۴).
$MAX_{PLD_{SZ}} =$	این بافر در حافظه گره، محل نگهداری پیام‌های در صف انتظار برای ارسال است. حداکثر ساین این بافر کوچک مقدار
$127 - MIN\_MAC\_OH$	$L(QB) \leq MAX\_PLD\_SZ$ خواهد بود.
$QB$	حداکثر ساین بسته لایه 6LoWPAN در پیکربندی جاری شبکه (حداکثر ساین payload لایه IEEE ۸۰۲.۱۵.۴ بر اساس پیکربندی جاری)
$CUR_{MAX_{PLD_{SZ}}} =$	سربار تجمیع دو پیام با یکدیگر در یک بسته (به بایت)
$127 - CUR\_MAC\_OH$	پارامتر از پیش تعریف شده، جهت کنترل خروج از وضعیت انتظار به‌واسطه رشد ساین بافر صف QB. اگر ساین بسته در وضعیت
$\Delta$	متغیری باینری که یک‌بودن آن بیانگر این است که بسته $p$ روی گره $n_i$ حاوی مجموعه‌ای از زیربسته‌های تجمیع شده است. مقدار صفر بیانگر آن است که $p$ حاوی یک پیام می‌باشد.
$\Gamma$	جداول زمان بندی گره $n_i$ :
$bs_{n_i}^p$	جدول $T_{n_i}^1$ : حاوی زمان دریافت آخرین بسته بر اساس کلاس ساین و اولویت بسته است (فاصله زمانی دریافت بسته از شروع کار سیستم به ثانیه <sup>۵</sup> ).
$T_{n_i}^1, T_{n_i}^2, T_{n_i}^3$	جدول $T_{n_i}^2$ : ماکسیمم فاصله زمانی بین دریافت‌های متوالی پیام‌های دارای کلاس ساین و اولویت یکسان
	جدول $T_{n_i}^3$ : جدول کنترلی، حاوی شاخص عملکرد سیستم متأثر از فواصل زمانی ورودی‌ها و علامت‌گذاری یک کلاس پیام و اولویت جهت تجمیع با بسته جاری در حال انتظار

۱. زمان تأخیر چرخشی (RTT) به مدت زمانی گویند که تأیید دریافت یک سیگنال ارسال شده دریافت گردد.

۲. این نشانه از [۲۸] آورده شده است.

۳. مثلاً این مقدار در پیکربندی پیش فرض شبکه در شبیه‌ساز cooja از سیستم عامل contiki برابر با ۲۱ بایت می‌باشد.

۴. مثلاً این مقدار در سیستم عامل ۲.۶ contiki به صورت پیش فرض (با توجه به تنظیمات لایه مک) مقدار ۲۵ بایت می‌باشد.

۵. این واحد می‌تواند میلی‌ثانیه نیز باشد.

[28] D. Sacramento and N. Correia, "Aggregation and scheduling in CoAP/observe based wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications, ICC'15*, pp. 2263-2269, London, UK, 8-12 Jun. 2015.

[26] O. Bergmann, K. T. Hillmann, and S. Gerdes, "A CoAP-gateway for smart homes," in *Proc. Int. Conf. Comput. Netw. Commun. ICNC'12*, pp. 446-450, Maui, HI, USA, 30 Jan.-2 Feb. 2012.

[27] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, "Conditional observe in CoAP draft-li-core-conditional-observe-05," *Internet-Draft*, vol. 5, 2014.

**سیدحمید حاج سیدجوادی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد ریاضی و کامپیوتر به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۷۶ از دانشگاه امیرکبیر به پایان رسانده است. همچنین وی تحصیلات خود در مقطع دکتری تخصصی جبر را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه امیرکبیر به پایان رسانده است. ایشان اکنون دانشیار دانشکده علوم پایه دانشگاه شاهد، و مدرس مدعو در دانشگاه‌های آزاد اسلامی پزند، بروجرد و علوم و تحقیقات تهران بوده و زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تئوری بازی‌ها، شبکه‌های کامپیوتری و حسگر بی‌سیم، امنیت شبکه، و ماشین‌های یادگیرنده.

**مهدی ملامطلبی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۳ از دانشگاه آزاد اسلامی قزوین و دانشگاه آزاد اسلامی اراک به پایان رسانده است. همچنین وی تحصیلات خود در مقطع دکتری تخصصی را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه تکنولوژی مالزی به پایان رسانده است. ایشان اکنون استادیار دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی بوئین‌زهرا، و مدرس مدعو در دانشگاه‌های آزاد اسلامی قزوین و کرج و دانشگاه علامه رفیعی بوده و عضو کمیته بین‌المللی IEEE است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: رایانش خوشه‌ای و توری و ابری و مه، شبکه‌های کامپیوتری و حسگر بی‌سیم، اینترنت اشیا، خانه‌های هوشمند، و امنیت شبکه.

- [29] M. R. Palattella, *et al.*, "Standardized protocol stack for the internet of (important) things," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1389-1406, Third Quarter 2013.
- [30] -, *An Introduction to Cooja*, [Online]. Available: <https://github.com/contiki-os/contiki/wiki/An-Introduction-to-Cooja>. [Accessed: 04-Mar-2017].
- [31] "Contiki.org," [Online]. Available: <http://www.contiki-os.org/index.html>. [Accessed: 11-Sep-2016].
- [32] C. Lerche, K. Hartke, and M. Kovatsch, "Industry adoption of the internet of things: a constrained application protocol survey," in *Proc. IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom., ETFA'12*, 6 pp., Krakow, Poland, 17-21 Sept. 2012.
- [33] M. Amiri, *Measurements of Energy Consumption and Execution Time of Different Operations on Tmote Sky Sensor Motes*, Ph.D. Thesis, p. 46, 2010.

**محمدرضا نیک سرشت** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر (نرم‌افزار) به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ از دانشگاه پیام نور شمیرانات و دانشگاه آزاد اسلامی بوئین‌زهرا به پایان رسانده است. ایشان از سال ۱۳۸۷ تاکنون در زمینه توسعه نرم‌افزارهای خاص منظوره بانکی در شرکت به پرداخت ملت، فعالیت می‌نماید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل اینترنت اشیا، بلاکچین، راهکارهای نوین پرداخت، تئوری بازی‌ها، یادگیری ماشین، DevOps و فرآیندهای توسعه نرم افزار است.