

## روشی توزیع شده برای زمان بندی سلول در شبکه های بی سیم مبتنی بر 802.15.4e با هدف کاهش تأثیر پدیده قیفی

مهدی سبزواری<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، محمد نصیری<sup>۲</sup>، استادیار

۱ - گروه مهندسی کامپیوتر - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران - mehdi.sabzevari@basu.ac.ir

۲ - گروه مهندسی کامپیوتر - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران - m.nassiri@basu.ac.ir

چکیده: استاندارد 802.15.4e برای افزایش قابلیت اطمینان به هنگام انتقال بسته ها در زیرلایه کنترل دسترسی و برای استفاده در شبکه های کم توان و مستعد خطا نظیر شبکه های حسگر بی سیم ارائه شده است. امکان استفاده از کانال های متعدد غیرهمپوشان در این استاندارد، احتمال رخداد تصادم بین فرستنده ها را کاهش می دهد که این نیز به نوبه خود باعث افزایش کیفیت سرویس در شبکه و بالاخره کاهش مصرف انرژی می شود. مکانیسم TSCH در این استاندارد هر گره حسگر را قادر می سازد تا با بهره گیری از الگوی پرش فرکانسی، ارسال بسته داده خود را بر روی یک کانال خاص و در یک اسلات زمانی معین زمان بندی کند. با این حال نحوه تخصیص کانال / اسلات و الگوریتم زمان بندی آن در استاندارد مذکور مشخص نشده است. در این مقاله، یک مکانیسم زمان بندی اسلات / کانال مبتنی بر 802.15.4e-TSCH برای شبکه های حسگر چندگانه ارائه می شود. در مکانیسم پیشنهادی، هر گره با دریافت ماتریس های زمان بندی سلول از گره های همسایه و نیز بر اساس حجم ترافیک عبوری، سلول های مورد نیاز برای ارسال بسته های خود را تعیین می کند. در این روش با تخصیص اسلات های اختصاصی بیش تر به گره های نزدیک چاهک و نیز به گره های پرتراфик، مشکل پدیده قیفی تا حدودی تعدیل می گردد. نتایج شبیه سازی بر روی بستر OpenWSN حاکی از کارآمدی روش پیشنهادی است.

واژه های کلیدی: شبکه های حسگر، استاندارد 802.15.4e، TSCH، زمان بندی سلول، پدیده قیفی، بستر OpenWSN و ترافیک همگرا

## A distributed mechanism for cell scheduling to reduce funneling effect in 802.15.4e-based wireless networks

M. Sabzevari, M.Sc<sup>1</sup>, M. Nassiri, Assistant Professor<sup>2</sup>

1- Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Email: mehdi.sabzevari@basu.ac.ir

2- Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Email: m.nassiri@basu.ac.ir

**Abstract:** The IEEE 802.15.4e standard was proposed to improve the reliability of data transmission at the MAC layer for low power and lossy networks such as wireless sensor networks. The possibility of using multiple non-overlapping channels decreases the probability of collision among competing nodes, which, in turn, results in improving the quality of service as well as reducing energy consumption. The TSCH mechanism permits scheduling each data transmission on a pair of channel/timeslot using frequency hopping. However, the standard does not specify how to allocate channel/timeslot for scheduling data transmissions. In this paper, we propose a channel/slot scheduling based on 802.15.4e-TSCH mechanism for wireless sensor networks. In our mechanism, each node determines its requirements in terms of channel/slots by receiving scheduling matrices from its neighbors and according to the traffic volume passing through it. In this mechanism, we allocate dedicated cells for the nodes in the vicinity of the sink and also for the congested nodes. This mitigates the funneling effect. The simulation results over OpenWSN emulator confirm the efficiency of our mechanism.

**Keywords:** Sensor network, 802.15.4e standard, TSCH, cell scheduling, funneling effect, OpenWSN, converge-cast traffic.

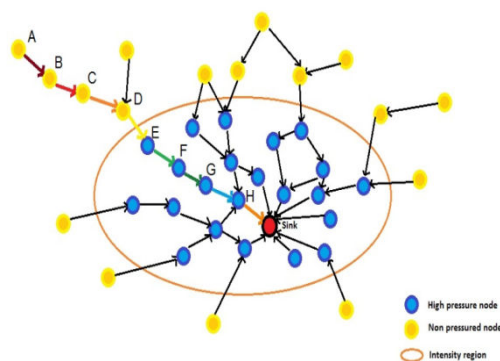
تاریخ ارسال مقاله: ۹۴/۰۶/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۱/۲۷

نام نویسنده مسئول: محمد نصیری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - همدان - بلوار شهید احمدی روشن - دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده مهندسی



شکل ۱: پدیده کیفی در یک شبکه حسگر بی سیم

در این مقاله یک مکانیسم زمان بندی بر اساس استاندارد IEEE802.15.4e-TSCH ارائه می شود که مشکل پدیده کیفی در ترافیک های همگرا به سمت چاهک را بهبود می بخشد. در ساختار اسلات فریم، که یک بازه زمانی شامل چندین سلول است، امکان انتساب سلول های اختصاصی یا اشتراکی وجود دارد. هر سلول یک زوج کانال/اسلات زمانی است. بر همین اساس، در این مقاله یک مکانیسم زمان بندی سلول برای هر گره ارائه می گردد که برحسب میزان ترافیک عبوری از گره و نیز نوع ترافیک موجود در شبکه، سلول های مناسب را برای ارسال بسته های داده تخصیص می دهد. کلیات روش پیشنهادی به صورت زیر است:

- در صورت وجود ترافیک دوره ای، به منظور اجتناب از تصادم، از سلول های اختصاصی برای انتقال بسته داده در گره مربوطه استفاده می شود.
- در صورت وجود ترافیک گاه و بیگاه و تحت فشار بودن گره (گره هایی که با احتمال بالا داده هایی برای ارسال دارند) از سلول های اختصاصی استفاده می شود.
- در صورت وجود ترافیک گاه و بیگاه و تحت فشار نبودن گره، از سلول های اشتراکی استفاده می شود.

در ادامه مقاله، در بخش ۲، استاندارد 802.15.4e را به اجمال معرفی و سپس در بخش ۳ برخی پژوهش های مرتبط را مرور می کنیم. در بخش ۴ روش پیشنهادی را معرفی نموده و در بخش ۵ به تحلیل پارامترهای مؤثر بر کارایی آن می پردازیم. در بخش ۶ نتایج شبیه سازی بر روی بستر OpenWSN را گزارش نموده و مورد بررسی قرار می دهیم. بخش پایانی مقاله به نتیجه گیری و سوی کارهای آتی اختصاص می یابد.

## ۲- استاندارد 802.15.4e-TSCH

استاندارد 802.15.4 عملکرد لایه های فیزیکی و پیوند داده را برای شبکه های بی سیم شخصی با نرخ پایین تبیین می کند. با توجه به سازگاری قابلیت های این استاندارد با ویژگی های شبکه های حسگر بی سیم، به عنوان استاندارد رایج دو لایه زیرین در فناوری های مرتبط با این شبکه ها پذیرفته شده است. در سال ۲۰۱۲ استاندارد 802.15.4e [۳] برای بهبود زیرلایه کنترل دسترسی استاندارد اولیه 802.15.4 ارائه

## ۱- مقدمه

شبکه های حسگر بی سیم از تعدادی گره تشکیل می شوند که یک حسگر با کاربرد خاص مانند حسگرهای حرارت، دما، فشار، رطوبت و لرزش و ... روی آن ها تعبیه شده است. شبکه های حسگر در صنعت، کشاورزی، کاربردهای نظامی، مطالعات هواشناسی و بسیاری زمینه های متنوع دیگر کاربرد گسترده ای دارند. گره های حسگر عمدتاً با محدودیت توان پردازشی، حافظه و منبع انرژی مواجه اند. به دلیل استفاده از باتری به عنوان منبع انرژی گره ها، مهم ترین چالش در شبکه های حسگر طول عمر شبکه است. برای نگه داشتن انرژی، هر گره بر اساس مکانیسم زمان بندی خواب/بیداری، تنها در هنگام ضرورت از خواب بیدار شده و اقدام به ارسال و دریافت داده می کند. زیرلایه دسترسی به کانال وظیفه زمان بندی و کنترل دوره خواب و بیداری گره حسگر را بر عهده دارد.

استاندارد IEEE 802.15.4 [۱] عملکرد لایه های فیزیکی و پیوند داده را برای شبکه های بی سیم شخصی با نرخ پایین توصیف می کند. در زیرلایه کنترل دسترسی استاندارد فوق، به منظور هماهنگی بین گره ها برای تبادل داده ها و کنترل دوره های خواب و بیداری از ساختاری به نام سوپر فریم استفاده می شود. یک سوپر فریم حداقل دو بسته متوالی بیکن است که توسط گره های همگام ساز<sup>۱</sup> ارسال می شود. همچنین در این استاندارد همه گره ها بر روی یک کانال مشترک مبادرت به ارسال و دریافت داده می کنند. علاوه بر این از محدوده فرکانسی رادیویی استفاده بهینه ای نمی شود و کل کانال صرف ارسال یک بسته کوچک خواهد شد. بنابراین برای افزایش قابلیت اطمینان در انتقال بسته ها و نیز افزایش ظرفیت انتقال شبکه، در سال ۲۰۱۲ استاندارد 802.15.4e ارائه گردید. ویژگی اصلی این استاندارد امکان استفاده از کانال های متعدد غیرهمپوشان توسط گره های حسگر است. مکانیسم TSCH<sup>۲</sup> در این استاندارد هر گره حسگر را قادر می سازد تا ارسال بسته داده خود را بر روی یک کانال خاص و در یک اسلات زمانی معین زمان بندی کند. با این حال نحوه تخصیص کانال/اسلات و الگوریتم آن در استاندارد مشخص نشده است.

الگوی حرکت ترافیک در اغلب کاربردهای شبکه های حسگر چندگانه، ترافیک همگرا به سمت چاهک است. در این حالت گره های نزدیک تر به چاهک حجم بیش تری از ترافیک را دریافت و به سمت چاهک هدایت می کنند. در این شرایط پدیده ای بنام اثر کیفی<sup>۳</sup> [۲] مطرح می شود که چاهک به عنوان دهانه تنگ تر کیف فرض می شود. گره های نزدیک چاهک نوعی شرایط فشار را تحمل می کنند. این شرایط فشار شامل افزایش نرخ تصادم و در نتیجه از بین رفتن بسته ها به دلیل ارسال همزمان به این گره ها است. این شرایط منجر به افزایش درصد چرخه مشغولی<sup>۴</sup> و نهایتاً کاهش طول عمر شبکه می شود. این پدیده در شکل ۱ مشاهده می شود. در واقع گره های A، B، C و D فشار کم تری نسبت به گره های E، F، G، H و S (چاهک) متحمل می شوند. بنابراین بایستی زمان بندی متناسبی با شرایط فشار بر گره ها ایجاد کنیم.

ارسال می شود. گره های همسایه چاهک که این بسته بیکن را دریافت می کنند، به عنوان گره تحت فشار شناخته می شوند.

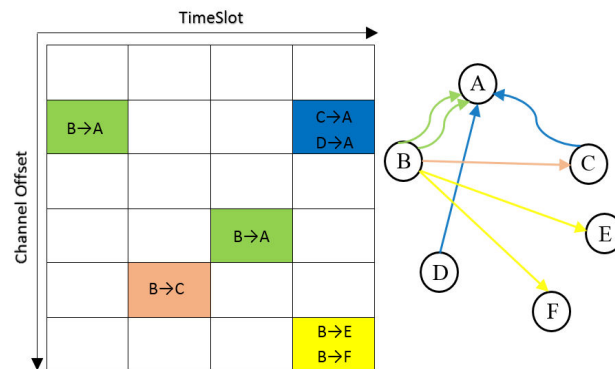
در [۷] ترافیک همگرا به سمت چاهک مورد بررسی قرار گرفته است. این کار نیز مبتنی بر استاندارد 802.15.4 و بر اساس بیکن و با استفاده از یک ساختار درختی، ترافیک را کنترل می کند. این روش با استفاده از اطلاعات مسیریابی، اطلاعاتی از ترافیک همگرا به دست می آورد. مشکل این روش تأخیر سلسله مراتبی به واسطه ساختار درختی است.

TASA [۸] یک راهکار زمان بندی سلول است که بر اساس استاندارد 802.15.4e-TSCH پیشنهاد شده است. این روش به صورت متمرکز و با استفاده از مفاهیم رنگ آمیزی گراف زمان بندی گره ها را کنترل می کند. مشکل اصلی این روش زمان بندی، متمرکز بودن آن است که از این جهت برای کاربردهای بلادرنگ مؤثر نیست. از طرفی، پس از اجرای الگوریتم زمان بندی در چاهک، نتیجه زمان بندی بایستی به گره ها اطلاع داده شود که این خود سربار ارتباطی قابل توجه دارد و منجر به افزایش تأخیر در شبکه می گردد.

در [۹]، مکانیسمی به نام DeTAS و بر اساس استاندارد 802.15.4e-TSCH ارائه شده است. در DeTAS، زمان بندی سلول به صورت توزیع شده انجام می شود. DeTAS از یک گراف بدون جهت استفاده می کند و دارای چندین چاهک مجازی است که هر کدام یک ریز-زمان بندی<sup>۷</sup> مخصوص به خود دارند. تجمیع این ریز-زمان بندی ها، زمان بندی کلی<sup>۸</sup> را تشکیل می دهند. عمده ترین مشکل DeTAS سربار زیاد بسته های کنترلی است که از جانب چاهک های مجازی به سمت برگ ها ارسال و پاسخ آن ها جمع آوری می شود.

در [۱۰] روشی متمرکز برای زمان بندی ارسال بسته بر روی کانال های متعدد در یک ساختار همگرای درختی ارائه شده است. در ابتدا گره چاهک اطلاعات مورد نیاز نظیر همبندی شبکه و ساختار درختی آن، میزان بار تخمینی هر گره و مجموعه گره های دارای تداخل با هر کدام را جمع آوری نموده و با حل یک مسئله برنامه ریزی خطی، زمان بندی اولیه را ایجاد می کند. سپس این زمان بندی اولیه از طریق درخت مسیریابی در کل شبکه منتشر می گردد. در MODESA، گره ها بر اساس اولویتشان در اسلات های ابتدایی زمان بندی می گردند. به عبارت دیگر، گره های با بیشترین اولویت در اسلات اول زمان بندی شده و گره های دیگر به ترتیب نزولی اولویت در اسلات های زمانی بعدی زمان بندی می شوند. اولویت هر گره بر اساس شاخص  $remPckt * parentRcv$  تعیین می گردد که  $remPckt$  بیانگر تعداد بسته های باقی مانده در بافر گره مذکور و  $parentRcv$  بیانگر تعداد بسته هایی است که والد آن گره در یک اسلات فریم دریافت می کند. اگر چندین گره دارای یک اولویت یکسان باشند، MODESA گرهی با کوچکترین شناسه را برای زمان بندی انتخاب می کند. گره هایی که با گره های زمان بندی شده در اسلات فعلی تداخل دارند، در اسلات آتی زمان بندی می شوند. علاوه بر این، در این مکانیسم امکان استفاده از چند واسطه رادیویی نیز تعبیه شده است. بر همین اساس، دو گره تنها

گردید. استاندارد 802.15.4e از ۱۶ کانال در محدوده فرکانسی GHz ۲/۴ استفاده می کند که پهنای باند هر کدام ۵ مگاهرتز است. مد TSCH در این استاندارد قالبی را برای به کارگیری کانال های چندگانه ارائه می دهد. در TSCH فرض می شود که گره ها با روشی سراسری با همدیگر همزمان شده اند. مدیریت رسانه در TSCH شبیه FTDMA است.



شکل ۲: اسلات فریم به همراه ماتریس زمان بندی

مکانیسم TSCH، در این استاندارد، ساختار اسلات فریم را جانشین سوپرفریم مرسوم در استاندارد 802.15.4 نموده است که ایده اصلی آن برگرفته از ساختار ارائه شده در [۴] است. همه گره ها در ابتدای اسلات فریم همگام هستند. هر اسلات فریم حداکثر از ۱۶ کانال غیرهمپوشان و چندین اسلات زمانی تشکیل یافته است. تعداد اسلات زمانی، چرخه یک اسلات فریم را مشخص می نماید. بنابراین اسلات فریم متشکل از یک ساختار ماتریسی است که هر درایه آن یک سلول نامیده می شود. هر سلول نشانگر یک زوج اسلات / کانال است. هر سلول برای انتقال یک بسته داده استفاده می شود. دو انتقال بسته از گره های همجوار می تواند بر روی دو سلول با کانال مختلف به صورت همزمان ارسال شود. مکانیسم تخصیص سلول به گره ها برای انتقال بسته در ابتدای اسلات فریم انجام می شود که به این عمل زمان بندی سلول یا زمان بندی اسلات / کانال یا زمان بندی سلول گویند. نمونه ای از این ساختار در شکل ۲ برای یک توپولوژی فرضی نشان داده شده است. یک سلول می تواند بین دو یا چند گره به اشتراک گذاشته شود. در این حالت از مکانیسم CSMA/CA برای جلوگیری از وقوع تصادم استفاده می شود.

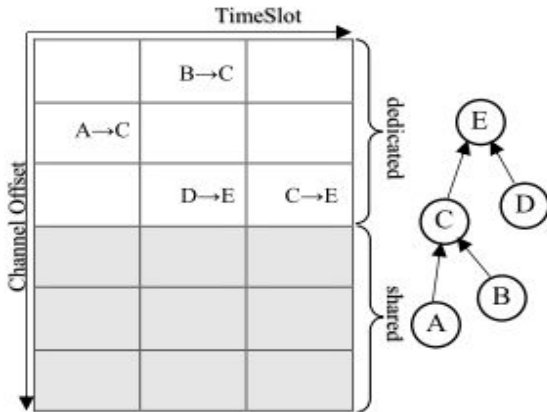
### ۳- کارهای مرتبط

تاکنون کارهای متعددی برای حل چالش های متنوع شبکه های بی سیم ارائه گردیده است [۵-۶]. پدیده اثر قیفی، به عنوان یکی از مسائل مورد توجه در شبکه های بی سیم با الگوی ترافیک همگرا، در چندین پژوهش بررسی شده است. در [۲] اثر قیفی با استفاده از رهیافت TDMA و بر اساس استاندارد 802.15.4 کنترل شده است. در این روش برای یافتن گره های تحت فشار از مفهوم بازه انتشار امواج رادیویی استفاده می شود. یک بسته بیکن از طرف چاهک با توان کنترل شده

در زیربخش های زیر مکانیسم زمان بندی را برای هر یک از انواع ترافیک تشریح می کنیم.

#### ۱-۴ - زمان بندی ترافیک دوره ای

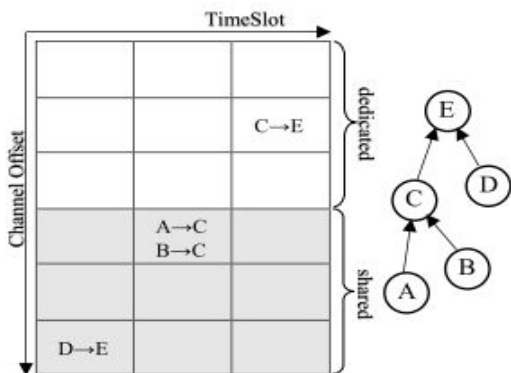
در این نوع ترافیک، گره ها در دوره های مشخص شروع به ارسال بسته ها به سمت چاهک می کنند. این نوع ترافیک اغلب در کاربردهای مانیپولینگ ایجاد می شود. از آنجاکه ارسال داده ها توسط گره های حسگر در بازه های زمانی معین انجام می شود، از سلول های اختصاصی برای ارسال داده از گره فرزند به والد استفاده می کنیم. به طور مثال در شکل ۳، با فرض وجود ترافیک دوره ای در همه گره ها، زمان بندی سلول متناسب در ماتریس زمان بندی نمایش داده شده است.



شکل ۳: زمان بندی ترافیک دوره ای با سلول های اختصاصی

#### ۲-۴ - زمان بندی ترافیک گاه و بیگاه

در برخی کاربردهای شبکه های حسگر، گره ها ترافیک مقطعی یا گاه و بیگاه تولید می کنند. به طور مثال، در کاربردهای تشخیص حرکت یا تشخیص مزاحم، با مشاهده حرکت، یک بسته داده ایجاد و به سمت چاهک ارسال خواهد شد.



شکل ۴: زمان بندی ترکیبی برای ترافیک گاه و بیگاه

در این نوع ترافیک، برای گره های نزدیک چاهک که همان گره های تحت فشار هستند و حجم ترافیک بالایی دارند، از سلول های زمانی اختصاصی استفاده می کنیم. در این حالت رقابتی بین فرزندان گره های تحت فشار برای دستیابی به کانال وجود ندارد و تصادم رخ نخواهد داد. همچنین برای سایر گره ها که تحت فشار نیستند از

در صورتی می توانند در یک اسلات زمان بندی شوند که هرکدام حداقل یک واسط رادیویی آزاد داشته باشند.

در [۱۱] روشی دیگری ارائه می گردد که زمان بندی اولیه آن در گره چاهک و بر اساس روش MODESA محاسبه شده و به همه گره ها اعمال می گردد. سپس هر گره تغییرات در حجم داده ارسالی خود (مانند تغییرات موقتی در نیازهای برنامه کاربردی، باز ارسال و...) را با استفاده از بسته های کنترلی به مؤلفه زمان بند در چاهک ارسال می نماید. پس از دریافت درخواست های جدید در چاهک، مؤلفه زمان بند تلاش می کند تا درخواست های جدید را با استفاده از سلول های خالی در بخش فعال اسلات فریم، به زمان بندی اولیه اضافه نماید. اگر این امکان وجود نداشته باشد، یک اسلات زمانی از بخش غیرفعال فریم فعال گردیده و زمان بندی مورد نیاز به آن اضافه می گردد. یادآوری می شود که در مقاله مذکور، ساختار اسلات فریم از دو بخش فعال و غیرفعال تشکیل شده است. ضمناً تغییرات ایجاد شده در زمان بندی تنها در اسلات فریم جاری اعمال می شود و در اسلات فریم بعدی، زمان بندی به حالت اولیه خود باز می گردد. اگر تغییرات مذکور در بازه طولانی تری استمرار داشته باشند، ماتریس زمان بندی بر اساس مکانیسم MODESA به روز می شود.

در این مقاله، یک مکانیسم زمان بندی توزیع شده برای افزایش قابلیت اطمینان در انتقال داده ها توأم با کاهش مصرف انرژی آن ها ارائه می شود. روش پیشنهادی با استفاده از قابلیت های استاندارد 802.15.4e-TSCH، مشکل تصادم گره های تحت فشار را به حداقل رسانده و در نتیجه استفاده مؤثرتری از پهنای باند شبکه را ممکن می سازد. همچنین در شبکه های با مدل ترافیک همگرا، زمان بندی مناسبی برای بهینه سازی مصرف انرژی ارائه می دهد. علاوه بر این، روش پیشنهادی در پشته پروتکل OpenWSN پیاده سازی و ارزیابی شده است.

#### ۴- روش پیشنهادی برای زمان بندی سلول

روش زمان بندی پیشنهادی بر اساس مدل ترافیک موجود در شبکه عمل می نماید. برخی از مفروضات مورد استفاده در روش پیشنهادی عبارت اند از:

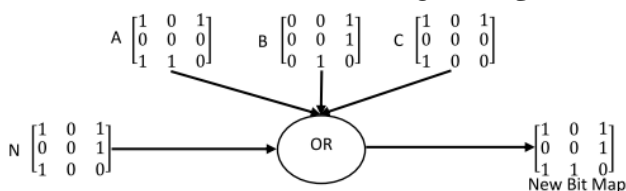
- تداخل سیگنال و تصادم تنها بین فرزندان یک گره رخ می دهد. از انواع دیگر تصادم ها صرف نظر می شود.
- تنها تراشه رادیویی را به عنوان منبع مصرف انرژی در نظر می گیریم و از انرژی مصرفی توسط سایر منابع مانند پردازنده صرف نظر می کنیم.
- هنگام رخداد تصادم، برای ارزیابی حالت رادیو و انرژی مصرفی آن، به دلیل متغیر بودن طول بسته های ارسالی و نیز مشخص نبودن تعداد ارسال های مجدد، انرژی مصرفی برای دریافت بسته را مدنظر قرار می دهیم.

ارسال می شوند و بنابراین هر گره تنها بسته های اعلان مربوط به گره های همسایه خود را دریافت می کند.

هر گره، در بسته اعلان، وضعیت سلول های اسلات فریم در همسایگی خود را در یک ساختار داده ای قرار داده و به همسایگان گزارش می دهد. این ساختار داده ای یک نگاشت بیتی (bitmap) از وضعیت سلول های اسلات فریم است. عدد ۱ در هر درایه نشانگر این است که سلول مورد نظر توسط یک گره رزرو گردیده است و عدد ۰ نشانگر آزاد بودن آن سلول است. به طور مثال چنانچه اندازه اسلات فریم ۸ اسلات و ۴ کانال باشد، ساختار bitmap به صورت زیر است:

```
00000000 (0x00)
01010001 (0x51)
00110000 (0x30)
00011100 (0x1B)
=0x0051301B
```

در انتهای اولین اسلات، هر گره، نگاشت بیتی دریافتی از گره های همسایه را مطابق شکل ۶ با همدیگر OR می نماید تا از سلول های آزاد در همسایگی خود مطلع شود.



شکل ۶: دریافت بسته های اعلان و تشخیص سلول های آزاد در همسایگی

هر گره، سلول های مورد نیاز برای ارتباط با والد خود را از بین سلول های آزاد و در طی دومین اسلات زمانی رزرو می نماید. بسته درخواست رزرو شامل اطلاعات متعدد از جمله آفست کانال، آفست اسلات، تعداد سلول مورد نیاز و نیز شناسه گره والد است. توجه نمایید که تعداد و نوع سلول های درخواستی یک گره تابعی از میزان بار عبوری از آن گره است.

از آنجاکه گره های موجود در یک همسایگی، درخواست های همسایگان خود را در طول دومین اسلات زمانی مشاهده می کنند، تلاش می کنند تا سلول های پیشنهادی خود را به نحوی انتخاب کنند که کمترین تداخل را با سلول های پیشنهادی گره های همسایه داشته باشد.

شبهه کد زمان بندی سلول در یک گره، در الگوریتم ۱ آورده شده است. این الگوریتم، در هر گره، به صورت پیرو دیک و در طی دو اسلات زمانی ابتدای هر اسلات فریم اجرا می گردد.

همان طور که در الگوریتم نشان داده شده است، در ابتدای هر اسلات فریم و در طول اولین اسلات زمانی، بسته های اعلان مبادله می شوند (خطوط ۹ تا ۱۱). سپس، هر گره بر حسب نوع و حجم ترافیک، با یکی از سه وضعیت زیر روبرو می شود:

(۱) ترافیک گاه و بیگاه و کم حجم: در این حالت گره تحت فشار نیست و بنابراین برای صرفه جویی در مصرف انرژی، تنها یک سلول اشتراکی

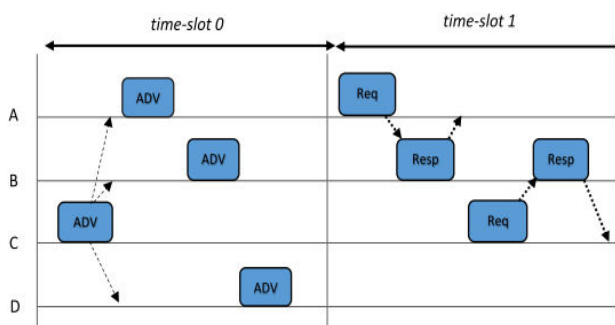
سلول های اشتراکی استفاده می کنیم. برای مثال، در شکل ۴، برای لینک  $E \rightarrow C$  یک سلول اختصاصی و برای لینک های دیگر سلول اشتراکی در نظر گرفته می شود.

#### ۴-۳- روال زمان بندی

یک عامل اصلی برای در نظر گرفتن یک گره به عنوان گره تحت فشار، احتمال ارسال بسته توسط آن است. بنابراین، احتمال بالای ارسال (مانند ترافیک دوره ای) به معنی تلقی گره به عنوان گره تحت فشار است. عامل مهم دیگر میزان بار عبوری از یک گره است. به صورت پیش فرض و تا زمانی که گره تحت فشار تشخیص داده نشده است، از سلول های اشتراکی برای زمان بندی ارسال بسته استفاده می شود. در غیر این صورت، تحت یکی از شرایط زیر از سلول های اختصاصی استفاده می شود:

- به صورت دوره ای اندازه صف بسته ها اندازه گیری شده و چنانچه در فواصل زمانی یکسان، تعداد بسته هایی موجود در صف تقریباً یکسان باشد، ترافیک دوره ای فرض شده و در نتیجه گره تحت فشار تشخیص داده می شود. در این صورت گره مذکور به سلول اختصاصی برای زمان بندی ارسال بسته نیاز دارد.
- اگر به میزان PR\_THR از صف پر باشد، گره جاری نیز تحت فشار فرض شده و برای زمان بندی ارسال بسته ها از سلول های اختصاصی بهره می برد.
- اگر به میزان CR\_THR از صف پر باشد، گره پرتراffic در نظر گرفته می شود و به آن یک دسته<sup>۹</sup> سلول شامل مجموعه ای از چند سلول متوالی تخصیص می یابد.

لازم به ذکر است که در ساختار اسلات فریم، اسلات اول برای تبادل بسته های اعلان یا ADV و اسلات دوم برای تبادل بسته های رزرو و بقیه اسلات ها برای تبادل بسته های داده به کار می روند.



شکل ۵: ارسال بسته های اعلان و رزرو سلول ها در دو اسلات زمانی ابتدای یک اسلات فریم

همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، اندازه بسته اعلان نسبت به اندازه یک اسلات زمانی آن قدر کوچک است که چندین همسایه می توانند بسته های خود را در خلال اولین اسلات زمانی ارسال نمایند. ذکر این نکته لازم است که بسته های اعلان به صورت broadcast

الگوریتم ۱: شبه کد زمان بندی سلول در هر ایستگاه	
1:	<b>Input:</b> node $n$
2:	<b>Output:</b> $Cell[1..\#Chans][1..\#Slots]$ : scheduled cells
3:	<b>Initialization:</b>
4:	$q\_thr \leftarrow PR\_THR$ // threshold for pressured queue
5:	$q\_thr\_crowded \leftarrow CR\_THR$ // threshold for pressured and crowded queue
6:	$qLen \leftarrow current\ queue\ size$
7:	
8:	<b>At the beginning of each slot frame:</b>
9:	$Send\_Bitmap(n)$ ;
10:	$/*\ OR\ received\ bitmaps\ to\ know\ cell\ usage$
11:	$Update\_Bitmap(ADV_s)$ ;
12:	
13:	<b>if</b> $lis\_pressured(n)$ <b>then</b>
14:	Reserve a shared cell in $Cell[\#chans/2..\#chans][2..\#slots]$
15:	<b>else</b>
16:	$/*\ Node\ is\ pressured\ */$
17:	<b>if</b> $qLen < q\_thr\_crowded$ <b>then</b>
18:	Reserve a dedicated cell in $Cell[1..\#chans/2][2..\#slots]$
19:	<b>else</b>
20:	$/*\ Node\ is\ pressured\ with\ high\ traffic\ */$
21:	Reserve dedicated bundled cells (up to 3) in $Cell[1..\#chans/2][2..\#slots]$
22:	<b>end if</b>
23:	<b>end if</b>

#### ۵- تحلیل کارایی روش پیشنهادی

در این بخش، برخی پارامترهای مؤثر بر عملکرد روش پیشنهادی آورده می شود. به طور نمونه میزان انرژی مصرفی در شبکه های حسگر به عوامل زیر وابسته است ([۱۲-۱۳]):

- نوع سلول: در صورت استفاده از سلول های اختصاصی، تصادم رخ نمی دهد. به عبارت دیگر انرژی مصرفی مورد نیاز برای ارسال های تکراری صرفه جویی می شود.
- فزونی ترافیک<sup>۱۳</sup>: هرچه حجم بسته های تولیدی و هدایت شده توسط گره ها بیش تر باشد، احتمال رخداد تصادم نیز بیش تر خواهد بود.
- پارامترهای CSMA-CA: تصادم زمانی رخ می دهد که حداقل ۲ ایستگاه که دارای کم ترین مقدار backoff یکسان باشند، در ابتدای یک اسلات شروع به ارسال نمایند. در این مقاله از مقادیر پیش فرض استاندارد IEEE 802.15.4e استفاده می شود. به منظور بررسی روابط انرژی در روش پیشنهادی، در ادامه مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان انرژی مصرفی را معرفی می نمایم.

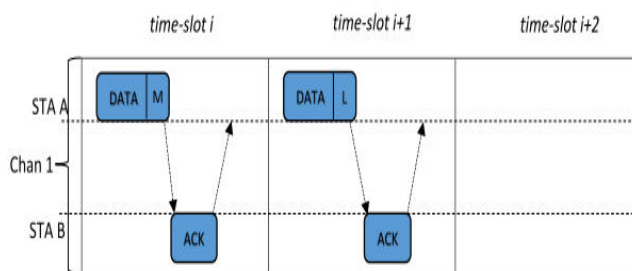
#### ۵-۱- تعداد ایستگاه های فرستنده رقیب

تصادم زمانی رخ می دهد که حداقل دو گره در یک سلول شروع به ارسال همزمان نمایند. چنانچه  $K$  گره رقیب (فرزندان یک گره والد) بخواهند بسته ای را ارسال کنند، احتمال آنکه  $i$  گره ارسال همزمان (در ابتدای یک اسلات) داشته باشند به صورت زیر محاسبه می شود:

برای ارسال داده ها به گره والد کافی است (خطوط ۱۳ و ۱۴). یک نمونه از این گونه تخصیص در شکل ۴ می شود.

۲) گره تحت فشار با ترافیک پررودیک: در صورتی که اندازه صف گره جاری بیش از  $PR\_THR$  و کم تر از آستانه  $CR\_THR$  باشد یا الگوی ترافیک عبوری پررودیک باشد، گره تحت فشار فرض می شود (خطوط ۱۷ و ۱۸). در این صورت گره بایستی در خلال اسلات دوم درخواست رزرو یک سلول اختصاصی را به گره والد ارسال نماید (شکل ۵ سمت راست).

۳) گره تحت فشار و دارای ازدحام: در صورتی که اندازه صف گره جاری بیش از آستانه  $CR\_THR$  باشد، گره تحت فشار و پرتراфик فرض می شود (خطوط ۱۹ و ۲۰). در این صورت گره در خلال اسلات دوم درخواست رزرو یک دسته سلول اختصاصی را به گره والد ارسال می نماید (شکل ۵ سمت راست). در واقع این گره با گره والد خود توافق می کند که در خلال دسته سلول های مذکور بیدار مانده و به تبادل داده بپردازند. این مسئله در شکل ۷ نشان داده شده است. دو ایستگاه A و B در دو اسلات زمانی متوالی بیدار مانده اند تا ایستگاه A بتواند داده های خود را به B ارسال نماید. بیت M در اولین بسته داده ای ارسال نشانی این است که فرستنده در اسلات زمانی بعدی نیز قصد ارسال دارد و بنابراین گره B بیدار می ماند.



شکل ۷: یک دسته سلول برای ارسال متوالی بسته ها به گره والد

لازم به یادآوری است که روال رزرو کردن یک فرآیند دوسویه است که شامل فرآیند درخواست زمان بندی<sup>۱۴</sup> و پاسخ زمان بندی<sup>۱۱</sup> است. با تشخیص تحت فشار بودن یک گره، روال رزرو سلول در طی اسلات زمانی دوم آغاز می شود که هدف آن تخصیص سلول های اختصاصی جدید است.

روش پیشنهادی برای کاهش تأثیر پدیده کیفی را FA-TSCH<sup>۱۲</sup> نامیده ایم. در این روش، به طور کلی کم تر از نیمی از سلول ها به صورت اشتراکی توسط گره ها استفاده می شوند و سایر سلول ها به صورت اختصاصی به گره ها تخصیص یافته اند. علاوه بر این، روش زمان بندی دیگری را بنام Rand-TSCH پیاده سازی نموده ایم که در آن همه سلول های زمان بندی شده از نوع اشتراکی اند و بنابراین گره های رقیب از یک مکانیسم دسترسی تصادفی برای انتقال داده در این سلول ها بهره می برند. هر دو روش از پارامترهای پیش فرض در استاندارد استفاده می کنند.

شکل ۹ مشاهده می شود با افزایش تعداد ایستگاه های متداخل احتمال رخداد تصادم نیز افزایش می یابد.

### ۵-۳- احتمال رخداد خطا توسط CSMA-CA

در این بخش تأثیرات مکانیسم CSMA-CA بر احتمال رخداد تصادم مورد بررسی قرار می گیرند. چنانچه کلیه ایستگاه ها مقادیر backoff متفاوتی انتخاب کنند، تصادم رخ نمی دهد. یادآوری می شود که ایستگاه ها یک مقدار backoff را به احتمال  $\frac{1}{2^{BE} - BE_{min}}$  انتخاب می کنند [۱۴-۱۵]. هر ایستگاه پس از رخداد تصادم مقدار backoff خود را به صورت تصادفی در بازه  $[BE_{min}, 2^{BE}-1]$  انتخاب می کند. با توجه به اینکه از میان  $i$  ایستگاه از  $K$  ایستگاه رقیب، می توان  $j$  ایستگاه را با کم ترین مقدار backoff انتخاب کرد، بنابراین احتمال ارسال همزمان  $j$  ایستگاه در ابتدای یک اسلات (به هنگام انتخاب backoff) برابر است با:

$$P_{collCSMA}(i) = \binom{i}{j} * \left(\frac{1}{2^{BE} - BE_{min}}\right)^j \quad (۴)$$

### ۵-۴- احتمال وجود یک بسته برای ارسال

احتمال ارسال یک بسته با  $P_{packet}$  نمایش داده می شود. این احتمال وابسته به ترافیک تولید شده و هدایت شده توسط ایستگاه فرستنده است. بنابراین:

- چنانچه  $P_{packet}$  بسیار بزرگ باشد، تصادم بیش تری رخ می دهد.
  - چنانچه  $P_{packet}$  بسیار کوچک باشد مقدار انرژی بیش تری برای گوش دادن در حالت بیکاری<sup>۱۴</sup> توسط رادیو مصرف می شود.
- محاسبه  $P_{packet}$  وابسته به محاسبه دقیق تعداد ایستگاه ها و میزان دقیق ترافیک تجمعی تولید شده توسط آن ها به سمت چاهک است. در این مقاله این پارامتر ثابت فرض می شود. پارامترهای مورد استفاده در تحلیل روش پیشنهادی در جدول ۱ آورده شده اند.

### ۵-۵- روابط انرژی مصرفی

یکی از اهداف فرآیند زمان بندی اسلات / کانال کاهش میزان انرژی مصرفی در شبکه است [۱۶]. میزان کل انرژی مصرفی توسط گره ها به شکل زیر محاسبه می شود:

$$E_{total} = \bar{E}_{tx} + \bar{E}_{rx} + \bar{E}_{overhearing} + \bar{E}_{idle} \quad (۵)$$

که در آن  $\bar{E}_{tx}$ ،  $\bar{E}_{rx}$ ،  $\bar{E}_{overhearing}$  و  $\bar{E}_{idle}$  به ترتیب متوسط میزان مصرف انرژی در حالات ارسال، دریافت، شنیدن بسته گره های دیگر و حالت بیکار است. در یک ایستگاه، امکان وقوع یکی از حالات زیر وجود دارد:

- بسته ای دریافت می شود ولی ایستگاه دریافت کننده مقصد آن نیست که در این حالت داریم:

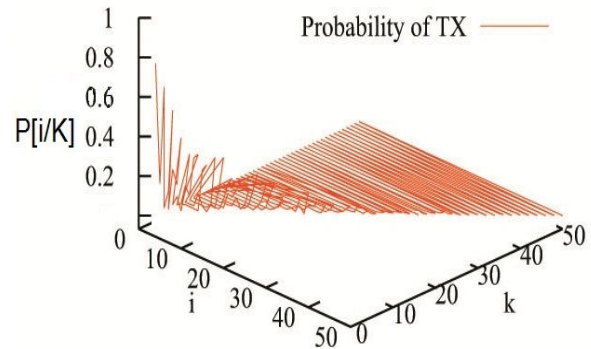
$$E_{overhearing} = T_{packet} * P_{rx} \quad (۶)$$

- ایستگاه چیزی دریافت نمی کند که در این حالت بیکار است:

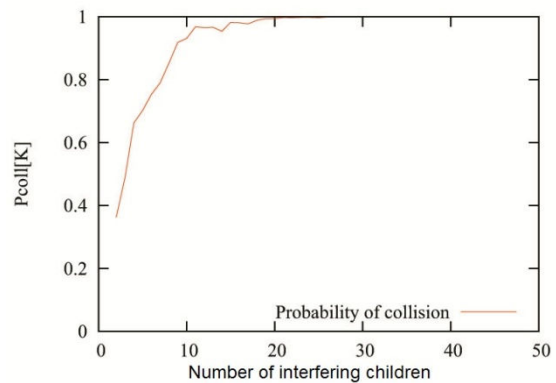
$$E_{idle} = T_{Timeslot} * P_{idle} \quad (۷)$$

$$P_{tx}(i, K) = \binom{K}{i} (P_{Packet})^i * (1 - P_{Packet})^{K-i} \quad (۱)$$

که در آن  $P_{packet}$  احتمال تولید بسته یا هدایت بسته دیگران در یک چرخه از اسلات فریم است. در واقع هر گره با این احتمال در هر سلول بسته ای برای ارسال خواهد داشت. شکل ۸ احتمال انتخاب یک سلول توسط  $i$  فرزند از بین  $K$  فرزند یک والد را نشان می دهد.



شکل ۸: احتمال ارسال همزمان در یک سلول



شکل ۹: احتمال رخداد تصادم

### ۵-۲- احتمال رخداد تصادم

احتمال رخداد تصادم که با  $P_{coll}(i)$  نمایش داده می شود، بیانگر ارسال همزمان چندین ایستگاه متداخل است. متغیر  $i$  تعداد گره های فرستنده را نشان می دهد. در واقع چنانچه حداقل دو ایستگاه فرستنده متداخل ( $2 \leq i \leq N$ ) داشته باشیم که کم ترین مقدار backoff یکسان دارند، تصادم رخ می دهد. اگر تنها یک ایستگاه فرستنده وجود داشته باشد آنگاه احتمال رخداد تصادم صفر است.

$$P_{coll}(1) = 0 \quad (۲)$$

در غیر این صورت خواهیم داشت:

$$P_{coll}(K) = \sum_{i=1}^K P_{tx}(i, K) * P_{collCSMA}(i) \quad (۳)$$

که در آن  $P_{collCSMA}(i)$  احتمال رخداد تصادم به واسطه مکانیسم CSMA-CA برای  $i$  ایستگاه در حال رقابت است. همان گونه که در

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده در تحلیل روش پیشنهادی

پارامتر	توضیح
$T_{packet}$	زمان مورد نیاز برای ارسال بسته
$T_{timeslot}$	زمان یک اسلات در اسلات فریم
$P_{tx/rx}$	میزان توان مصرفی توسط تراشه رادیویی برای ارسال/دریافت یک بیت
$P_{idle}$	میزان توان مصرفی توسط تراشه رادیویی برای شنود بیکار یک بیت
$g(k,n)$	تعداد ایستگاه های متداخل از مجموع $k$ فرزند یک ایستگاه
$E_{tx/rx_{packet}}$	میزان انرژی مصرفی برای ارسال/دریافت یک بسته
$E_{tx/rx_{Ack}}$	میزان انرژی مصرفی برای ارسال/دریافت یک Ack
$E_{coll}$	میزان انرژی مصرفی یک تصادم

### ۶- پیاده سازی و ارزیابی کارایی

در این مقاله برای پیاده سازی روش پیشنهادی و ارزیابی آن از بستر همانند ساز<sup>۱۵</sup> OpenWSN [۱۷] استفاده شده است. بستر مذکور امکان اجرا بر روی ایستگاه های حسگر واقعی را دارا بوده و پشته پروتکل شبکه ای متناسب با نیاز شبکه های حسگر به زبان C و Python را پیاده سازی نموده است. زیر لایه کنترل دسترسی در این بستر بر اساس استاندارد 802.15.4e طراحی و پیاده سازی شده است. با این حال هیچ روش زمان بندی سلول در این بستر پیاده سازی نشده است. ما ابتدا روش پیشنهادی را پیاده سازی کردیم و سپس برای مقایسه و ارزیابی روش خود، روش زمان بندی تصادفی سلول را نیز بر روی بستر فوق پیاده سازی نمودیم. ضمناً روش های TASA و DeTAS تاکنون در بستر OpenWSN پیاده سازی نشده اند و به همین دلیل نتایج ارزیابی آن ها در این بخش گزارش نشده است.

زمان بندی FA-TSCH به صورت دوره ای توسط تمامی گره ها شبکه اجرا می شود. کلیه گره ها به غیر از چاهک فرستنده هستند و به صورت مستقل مکانیسم زمان بندی را اجرا می کنند. هر کدام از گره ها یک تایمر دارد. این تایمر می تواند دارای دوره منظم برای ایجاد یک ترافیک دوره ای، یا دارای یک دوره تصادفی و نامنظم برای ایجاد ترافیک گاه و بیگاه باشد. حداکثر فاصله زمانی برای کلیه گره ها نیم ثانیه است که گره های با ترافیک دوره ای در این بازه حتماً بسته ای برای ارسال دارند و گره های با ترافیک گاه و بیگاه ممکن است بسته ای برای ارسال نداشته باشند. در شبیه سازی های مختلف، به صورت متوسط، حدود ۵۰ درصد گره ها در هر اجرا تحت فشار هستند.

ویژگی ها و پارامترهای مورداستفاده در فرآیند شبیه سازی در جدول ۲ آورده شده است. بستر OpenWSN، پشته پروتکلی برای استفاده در اینترنت اشیا ارائه نموده است که مؤلفه های مختلف آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در لایه بالایی پشته پروتکل، برنامه های کاربردی کاربران قرار دارند که تحت یکی از پروتکل های لایه انتقال عمل می نمایند. این پشته پروتکل در لایه انتقال، بر حسب نوع داده، از سه نوع پروتکل انتقال اطلاعات TCP، UDP و CoAP استفاده می شود. در لایه IP<sub>v6</sub> سه مکانیسم اصلی هدایت بسته ها<sup>۱۶</sup>، مسیریابی بر اساس پروتکل RPL<sup>۱۷</sup> و پروتکل گزارش خطای ICMP<sub>v6</sub> تعبیه شده است.

در لایه تطبیق<sup>۱۸</sup>، اندازه سرآیند بسته های IP<sub>v6</sub> فشرده می شود تا امکان جادهی داده ها در فریم های استاندارد 802.15.4 که اندازه بیشینه آن ۱۲۷ بایت است، فراهم شود. لایه رزرواسیون شامل دو قسمت زمان بندی و کشف همسایه ها است. عملیات زمان بندی سلول و تبادل بسته های اعلان مابین گره های همسایه توسط این لایه انجام می پذیرد. در لایه رسانه دسترسی، استاندارد 802.15.4e پیاده سازی شده است که مدیریت ماتریس زمان بندی و ارسال و دریافت داده بر اساس زمان بندی تعیین شده در آن انجام می شود. پشته پروتکل OpenWSN قابلیت اجرا بر

در مورد دو حالت باقی مانده دیگر،  $E_{tx}$  مقدار انرژی مصرفی برای ارسال یک بسته از طرف ایستگاه و دریافت یک بسته Ack متناظر با آن در همان اسلات است. همچنین  $E_{rx}$  مقدار انرژی مورد نیاز برای دریافت یک بسته و ارسال Ack آن در یک اسلات است. بدین ترتیب داریم:

$$\bar{E}_{tx} = \bar{P}_{packet} * (E_{tx_{packet}} + E_{rx_{Ack}}) \quad (8)$$

برای محاسبه میزان انرژی مصرفی ارسال/دریافت یک بسته داده یا یک بسته Ack، رابطه زیر برقرار است:

$$E_{rx_{packet}} = T_{packet} * P_{rx} \quad (9)$$

که در آن زمان ارسال یک بسته از رابطه زیر به دست می آید:

$$T_{packet} = \frac{\ln(packet)}{R} \quad (10)$$

که در آن  $R$  نرخ انتقال داده و تابع  $\ln$  اندازه بسته داده را تعیین می کند. یادآوری این نکته لازم است که در صورت تخصیص سلول های اختصاصی، نرخ تصادم کاهش یافته و میزان انرژی مصرفی نیز کاهش می یابد.

برای محاسبه  $\bar{E}_{tx}$ ، از پارامتر  $E_{collidTx}$  استفاده می شود که بیانگر میزان انرژی مصرفی برای یک ارسال منجر به تصادم است.

$$\bar{E}_{rx} = \bar{P}_{packet} * (E_{rx_{packet}} + E_{tx_{Ack}}) + P_{coll(k)} * E_{coll} \quad (11)$$

$$E_{collidTx} = \bar{P}_{packet} * (E_{tx_{packet}} + E_{rx_{Ack}}) \quad (12)$$

درواقع فرستنده یک بسته را ارسال می کند اما به علت رخداد تصادم، گیرنده چیزی دریافت نمی کند و فرستنده مجبور به ارسال دوباره بسته خواهد شد. در نهایت میزان انرژی مصرفی در یک تصادم از رابطه زیر به دست می آید:

$$E_{coll} = (1 - P_{coll(k)}) * P_{coll(k)}^{g(k,n)} * E_{collidTx} \quad (13)$$

به عبارت دیگر، این مقدار بیانگر میزان انرژی مصرفی یک ارسال موفق پس از چندین ارسال مجدد است که در آن  $n$  تعداد دفعات ارسال مجدد بسته است.



تغییر وضعیت در نظر گرفته می‌شود. کلیه این مقادیر وابسته به مدل تراشه است. در این مقاله از تراشه رادیویی CC2420 [۱۹] با مشخصات ذکر شده در جدول ۳ استفاده می‌کنیم.

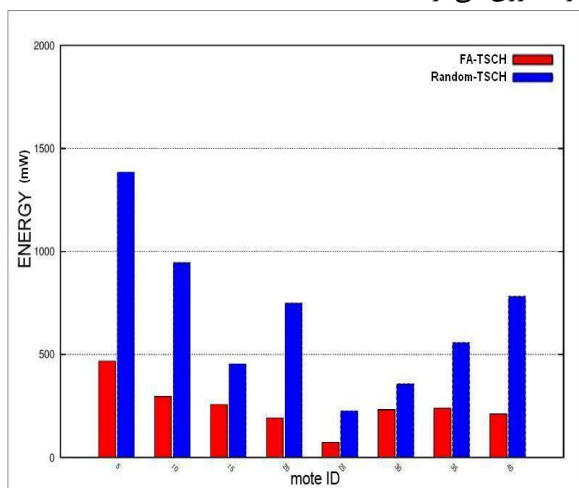
جدول ۳: میزان جریان مصرفی تراشه رادیویی CC2420

States	Current
Power Down mode (RF Sleep)	۲۰ μA
Idle mode (RF Sleep)	۴۲۶ μA
Receive mode	۱۹/۷ mA
Transmit mode	۱۷/۴ mA

Low supply voltage (2.1 – 3.6 V) with integrated voltage regulator

برای ارزیابی نتایج، پارامترهای انرژی، تأخیر و میزان گم‌شدگی بسته‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین در ابتدا نتایج یکی از سناریوها با ۴۰ گره آورده شده است. به علت وجود تراکم گره‌ها در نمودارها، میانگین هر پنج گره متوالی محاسبه شده است.

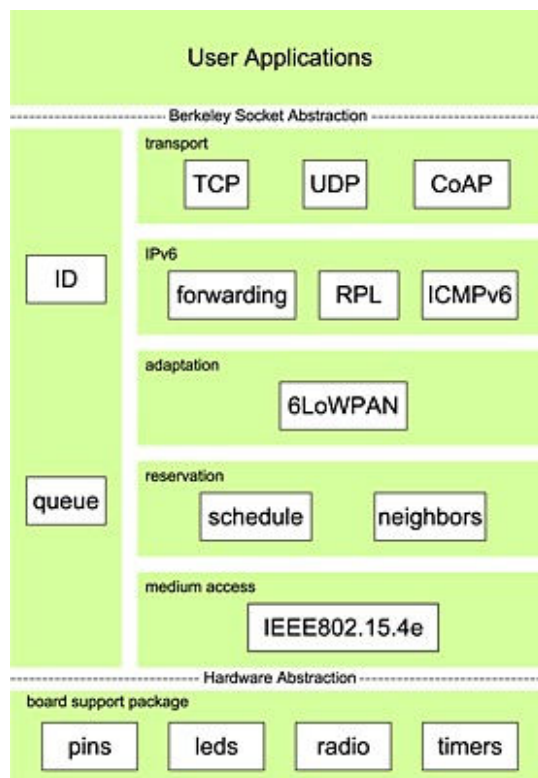
شکل ۱۱ میزان انرژی مصرفی برخی گره‌ها را نشان می‌دهد. روش پیشنهادی با کاهش امکان تصادم، تعداد ارسال‌های تکراری را کاهش داده است و این امر به نوبه خود باعث می‌شود که انرژی مصرفی هر گره کاهش یابد. همچنین با توجه به وجود زمان‌بندی، گره‌ها فقط در مواقع مورد نیاز بیدار شده و به تبادل داده می‌پردازند. بنابراین در اغلب اوقات در وضعیت خواب به سر می‌برند که این نیز به نوبه خود باعث کاهش مصرف انرژی می‌گردد.



شکل ۱۱: انرژی مصرفی گره‌های حسگر

پارامتر دیگر مورد بررسی، تأخیر انتها به انتها است که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. این پارامتر بیانگر میزان تأخیر از لحظه تولید بسته در گره فرستنده تا لحظه دریافت آن در گره چاهک است. به دلیل استفاده از سلول‌های اختصاصی در گره‌های پرتراffic، بسته سریع‌تر ارسال شده و با تأخیر کم‌تری به گره‌های بعدی و در نهایت به چاهک می‌رسد. در واقع گره‌ها در حین رقابت کم‌تر دچار شکست شده و با تأخیر کم‌تری موفق به ارسال بسته می‌شود.

روی سخت‌افزارهای متنوع را داراست. بخشی از اطلاعات مورد نیاز تمامی لایه‌ها، در بخش میان‌لایه‌ای این پشته پروتکل آمده است.



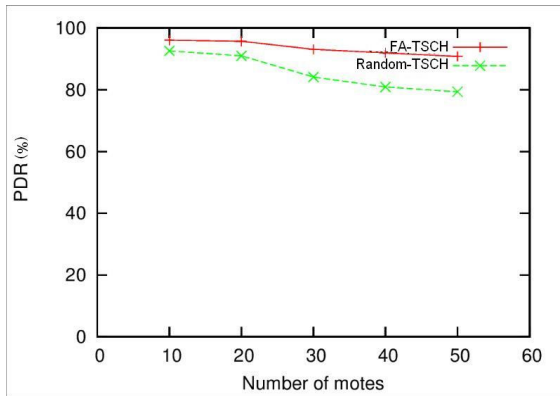
شکل ۱۰: پشته پروتکل OpenWSN [۱۷]

جدول ۲: پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
شبیه‌ساز	OpenWSN
تعداد گره‌ها	۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ گره
مدل رادیو	CC2420
هم‌بندی	DoDAG
الگوی ترافیک	همگرا به سمت چاهک
مدت شبیه‌سازی	۳ ساعت
پروتکل مسیریابی	RPL
نوع ترافیک	VBR و CBR
نرخ ارسال هر گره	یک بسته در هر نیم ثانیه
اندازه بسته	۱۰۰ بایت

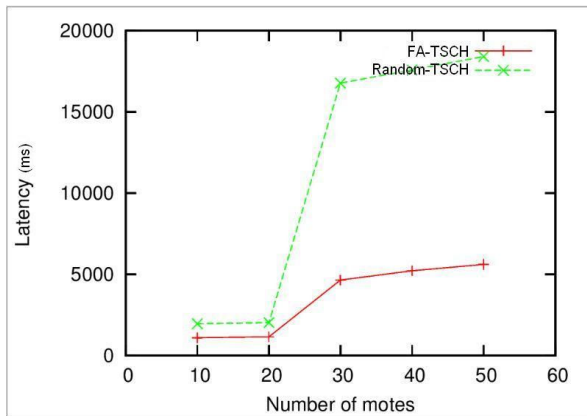
اخیراً پروتکل مسیریابی RPL به عنوان استاندارد رایج در شبکه‌های مستعد خطا نظیر شبکه‌های حسگر بی‌سیم پذیرفته شده است. در این پروتکل، گره‌های شبکه یک گراف جهت‌دار غیر حلقوی تشکیل می‌دهند که جهت یال‌ها به سمت چاهک است. بر همین اساس هم‌بندی شبکه حاصل از نوع DoDAG<sup>۱۹</sup> است که ترافیک ارسالی از همه گره‌ها را به سمت چاهک هدایت می‌نماید.

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، مهم‌ترین منبع مصرف انرژی تراشه رادیویی است [۱۸]. توان مصرفی توسط رادیو برای هر وضعیت (ارسال، دریافت، خواب و بیکاری) مشخص است. یک زمان مشخص نیز برای



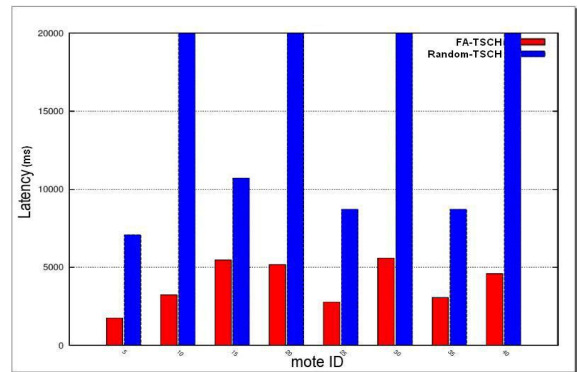
شکل ۱۴: نرخ متوسط تحویل بسته در توپولوژی های مختلف

در کنار عملکرد بهتر در PDR، شکل ۱۵ نیز میانگین تأخیر انتها به انتها را نشان می دهد.



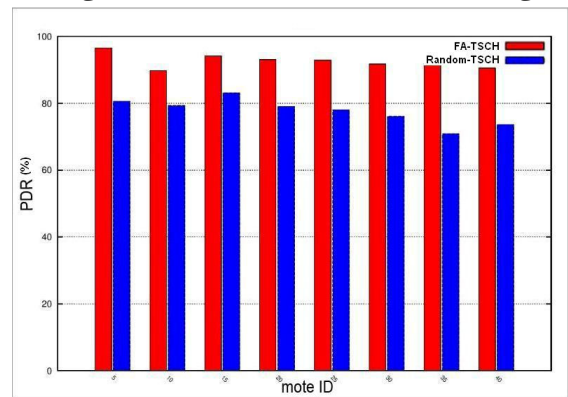
شکل ۱۵: متوسط تأخیر انتها به انتها برای توپولوژی های مختلف

در شکل ۱۵ مشاهده می شود که در هر دو روش زمان بندی، با افزایش تعداد گره ها، میزان تأخیر نیز افزایش می یابد. علت این امر افزایش تعداد گام های میانی برای رسیدن بسته به مقصد، افزایش تعداد تصادم های احتمالی و افزایش میزان تأخیر به ویژه تأخیر صف است. یادآوری می شود که با افزایش گره ها و افزایش حجم ترافیک ارسالی به ویژه از شبکه ای با تعداد ۲۰ گره به شبکه با ۳۰ گره، افزایش عمده ای در میزان تأخیر دیده می شود. دلیل این امر این است که هر چند تعداد گره ها افزایش یافته لیکن اندازه ماتریس زمان بندی ثابت مانده است و این بدان معنی است که بسته های داده بیش تری از گره های بیش تر در همان تعداد سلول زمان بندی می شوند. بنابراین نرخ تصادم افزایش می یابد و بسته های داده متحمل ارسال های مجدد می شوند که این به نوبه خود باعث افزایش تأخیر می گردد. البته همان گونه که مشاهده می شود شیب این تغییر در روش پیشنهادی به مراتب کم تر است. در شکل ۱۶، متوسط انرژی مصرفی هر دو روش زمان بندی نیز با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل عملکرد خوب زمان بند پیشنهادی نسبت به روش دیگر قابل توجه (حدوداً سه برابر) است که دلیل اصلی آن کاهش تعداد متوسط ارسال ها به دلیل استفاده از سلول های اختصاصی است.



شکل ۱۲: تأخیر انتها به انتهای متوسط برای هر گره حسگر

یکی از نقاط قوت استاندارد 802.15.4e-TSCH میزان اطمینان بالای در انتقال بسته ها است که در شکل ۱۳ با پارامتر نسبت تحویل بسته ها یا PDR<sup>۲۰</sup> مشخص می شود. در این شکل مقدار PDR برای برخی گره های موجود در شبکه آورده شده است. mote ID نشانگر شناسه گره انتخابی است. دلیل عملکرد بهتر روش پیشنهادی این است که استفاده از سلول های اختصاصی باعث کاهش نرخ تصادم و گم شدگی بسته یا به عبارت دیگر افزایش قابلیت اطمینان می گردد.

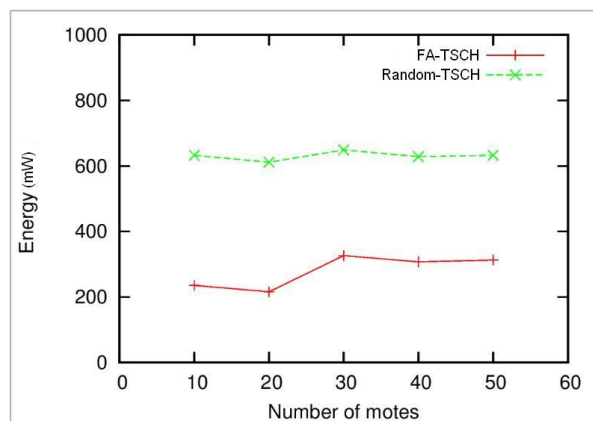


شکل ۱۳: نسبت تحویل بسته ها

در ادامه این بخش، نتایج ارزیابی برای توپولوژی های مختلف با تعداد گره های متفاوت ارائه می شود. در نمودارهای مربوطه، هر نقطه، میانگین ۱۰ بار اجرا بر روی شبکه مورد نظر است. متوسط نسبت تحویل بسته ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است که عملکرد قابل قبولی را نمایش می دهد. در این شکل با افزایش تعداد گره ها و به تبع آن افزایش ترافیک در شبکه، هر دو روش FA-TSCH و Rand-TSCH کاهش در PDR را تجربه می کنند که میزان کاهش در Rand-TSCH بیش تر است. با افزایش تعداد گره ها، احتمال رخداد تصادم و شکست در تحویل بسته ها افزایش می یابد. در جریان شبیه سازی مشاهده نمودیم که با افزایش تعداد گره ها به خصوص از ۲۰ به ۳۰، تعداد لینک های بیش تری از ماتریس زمان بندی مورد استفاده قرار می گیرد که با توجه به اشتراکی بودن تعدادی از سلول ها، نرخ تصادم افزایش می یابد. شایان ذکر است که در شبیه سازی های انجام شده، اندازه اسلات فریم با افزودن گره های شبکه تغییری نمی کند. به عبارت دیگر تعداد سلول های ماتریس زمان بندی ثابت است.

[۶] شهرام جمالی و توفان سماپور، «کنترل ازدحام مبتنی بر تخمین در شبکه‌های موردی بی‌سیم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۳، شماره ۱، صفحه ۱۴-۱، ۱۳۹۲.

- [7] X. Liu, C. Leckie and S. K. Saleem, "Performance evaluation of a converge-cast protocol for IEEE 802.15.4 tree-based networks," In *Sixth IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, pp. 73-78, 2010.
- [8] M.R. Palattella, N. Accettura, M. Dohler, L.A. Grieco, and G. Boggia, "Traffic aware scheduling algorithm for reliable low-power multi-hop IEEE 802.15.4e networks," In *23rd IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 327-332, 2012.
- [9] N. Accettura, M. R. Palattella, G. Boggia, L.A. Grieco, and M. Dohler, "DeTAS: a decentralized traffic aware scheduling technique enabling IoT-compliant multi-hop low-power and lossy networks," In *Second IEEE WoWMoM Workshop on IoT-SoS*, pp. 1-6, 2013.
- [10] R. Soua, P. Minet, and E. Livolant, "MODESA: An optimized multichannel slot assignment for raw data convergecast in wireless sensor networks," In *IEEE 31st International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*, pp. 91-100, 2012.
- [11] R. Soua, E. Livolant and P. Minet, "An adaptive strategy for an optimized collision-free slot assignment in multichannel wireless sensor networks," *Journal of sensor and actuator networks*, vol. 2, no. 3, p. 449-485, 2013.
- [12] M. Heusse, F. Rousseau, R. Guillier and A. Duda, "Idle sense: an optimal access method for high throughput and fairness in rate diverse wireless LANs," In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 35, pp. 121-132, 2005.
- [13] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE journal on Selected Areas in communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, 2000.
- [14] N. Abdeddaim, F. Theoleyre, M. Heusse and A. Duda, "Adaptive IEEE 802.15.4 mac for throughput and energy optimization," In *IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pp. 223-230, 2013.
- [15] A. Koubaa, M. Alves and E. Tovar. "A comprehensive simulation study of slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," In *5th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, pp. 183-192, 2006.
- [16] A. Karahan, I. Erturk, S. Atmaca and S. Cakici. "Effects of transmit-based and receive-based slot allocation strategies on energy efficiency in WSN MACs," *Ad Hoc Networks*, vol 13, pp. 404-413, 2014.
- [17] T. Watteyne, X. Vilajosana, B. Kerkez, F. Chraim, K. Weekly, Q. Wang, S. Glaser and K. Pister, "OpenWSN: a standards-based low-power wireless development environment," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 23, no. 5, pp. 480-493, 2012.
- [18] L.M. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 3, pp. 1548-1555, 2001.
- [19] A. S. Chipcon, "CC2420 datasheet-2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-Ready RF transceiver (Rev. B)," 2007.



شکل ۱۶: میزان انرژی مصرف شده برای توپولوژی‌های مختلف

#### ۷- نتیجه‌گیری و کارهای آتی

در این مقاله، یک مکانیسم زمان‌بندی کارآمد در بستر شبکه‌های حسگر بی‌سیم و بر اساس استاندارد IEEE802.15.4e-TSCH برای رفع مشکل پدیده کیفی ارائه شد که دارای عملکرد مؤثری در شبکه‌های چندگانه با الگوی ترافیک همگرا است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، علاوه بر کاهش انرژی مصرفی، عملکرد شبکه را از نقطه‌نظر متریک‌های ارزیابی دیگر نظیر نرخ تحویل بسته و تأخیر انتها به انتها به‌طور محسوسی ارتقاء می‌دهد. این برتری به‌ویژه در شبکه‌های شلوغ با تعداد گره‌های زیاد، بیش‌تر به چشم می‌خورد.

در ادامه قصد داریم مکانیسم زمان‌بندی پیشنهادی را به نحوی توسعه دهیم که موقعیت گره در شبکه و تعداد گام‌های باقی‌مانده تا گره چاهک را در ترتیب زمان‌بندی سلول‌ها مدنظر قرار دهد. علاوه‌براین استقرار یک بستر آزمایشی مبتنی بر پشته پروتکل OpenWSN و ارزیابی روش پیشنهادی بر روی آن در دستور کار قرار دارد.

#### مراجع

- [1] IEEE 802 Working Group, "Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," *ANSI/IEEE 802.15.4*, 2003.
- [2] G. S. Ahn, S. G. Hong, E. Miluzzo, A. T. Campbell and F. Cuomo, "Funneling-MAC: a localized, sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks," *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 293-306, 2006.
- [3] IEEE 802 Working Group, "802.15.4e-2012 - IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (LR-WPAN) amendment 1: Mac sublayer," 2012.
- [4] K. Pister and L. Doherty, "TSMP: Time synchronized mesh protocol," in *Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS)*, pp. 391-398, 2008.

[۵] سیدهادی اقدسی و مقصود عباس‌پور، «الگوریتم توزیع‌شده جهت فراهم‌آوردن پوشش چندجانبه از هدف در شبکه‌های حسگر بصری»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۲، شماره ۲، صفحه ۶۳-۵۳، ۱۳۹۱.

- 
- <sup>۱</sup> Coordinator
  - <sup>۲</sup> Time Synchronized Channel Hopping (TSCH)
  - <sup>۳</sup> Funneling effect
  - <sup>۴</sup> Duty cycle
  - <sup>۵</sup> Sporadic traffic
  - <sup>۶</sup> Pressured node
  - <sup>۷</sup> Micro scheduling
  - <sup>۸</sup> Macro scheduling
  - <sup>۹</sup> Bundle
  - <sup>۱۰</sup> Schedule request
  - <sup>۱۱</sup> Schedule response
  - <sup>۱۲</sup> Funneling-aware TSCH (FA-TSCH)
  - <sup>۱۳</sup> Traffic intensity
  - <sup>۱۴</sup> Idle listening
  - <sup>۱۵</sup> Emulator
  - <sup>۱۶</sup> Forwarding
  - <sup>۱۷</sup> Routing protocol for low power and lossy networks(RPL)
  - <sup>۱۸</sup> Adaptation layer
  - <sup>۱۹</sup> Destination-oriented Directed Acyclic Graph (DoDAG)
  - <sup>۲۰</sup> Packet Delivery Ratio (PDR)