

روشی کارا برای چندپخشی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر سیستم حدنصاب

غلامحسین اکباتانی فرد*، رضا منصفی

گروه کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، گیلان
ekbatanifard@stu-mail.um.ac.ir

گروه کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی
monsefi@um.ac.ir

چکیده

چندپخشی یکی از اساسی‌ترین نیازهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم است که در آن داده‌ها برای تمامی گره‌های شبکه ارسال می‌شوند. بسیاری از کاربردها در زمان‌هایی از کار شبکه، نیازمند ارسال چندپخشی هستند. در تعداد زیادی از کارهای انجام شده در زمینه‌ی ارسال چند پخشی، فرض شده که گره‌های شبکه همیشه بیدار هستند. در حالی که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه، گره‌ها بین حالت خواب و بیداری سوئیچ می‌نمایند و این عمل ارسال داده پخشی را دشوار می‌کند. در این مقاله، ما مساله پخشی را با در نظر گرفتن حالت خواب و بیداری گره‌ها، مبتنی بر سیستم حدنصاب، مورد بررسی قرار می‌دهیم و روش‌هایی را ارائه می‌کنیم که بتواند تعداد دفعات ارسال داده پخشی و همچنین تاخیر آن را کاهش دهد. روش‌های ارائه شده را توسط انجام شبیه‌سازی‌های متعدد بررسی کرده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که پیشنهادهای ارائه شده در این مقاله نسبت به کارهای مشابه انجام شده کارایی بهتری را فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی

شبکه حسگر بی‌سیم، چندپخشی، چرخه وظیفه، سیستم حدنصاب، تاخیر پخشی، شمار پخشی

می‌شوند و همزمان نیز به حالت خواب می‌روند. در این صورت بدیهی است که با ارسال یک بسته پخشی تمامی همسایه‌ها آن را دریافت خواهند کرد. ولی همگام‌سازی سراسری و دوره‌ای گره‌های شبکه، با توجه به تواتر پائین سرویس چندپخشی، سربار بالایی را به همراه خواهد داشت. به دلیل حیاتی بودن انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، پروتکل‌های مبتنی بر چرخه وظیفه مانند RI-MAC [۶]، PW-MAC [۷] و مبتنی بر سیستم حدنصاب [۸-۱۱] بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است.

پروتکل‌هایی که برای کنترل دسترسی به رسانه (MAC) شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر چرخه وظیفه ارائه شده‌اند اغلب بر روی تبادل داده تک‌پخشی تمرکز کرده‌اند و بر روی چگونگی ارسال داده‌های چندپخشی کار خوبی انجام نشده است. یک روش آسان برای پشتیبانی از ارسال پخشی تک‌گامه در چنین شبکه‌هایی، ارسال داده تک‌پخشی به یکایک همسایه‌ها است. این کار دارای مشکل ارسال‌های اضافی است و در صورت ارسال پخشی چندگامه به تمام شبکه، مشکل مضاعف نیز خواهد شد. یعنی در حالی که برخی از گره‌های همسایه در

۱- مقدمه

چندپخشی (به اختصار پخشی) در شبکه‌های چندگامه [۱]، مانند شبکه‌های حسگر بی‌سیم، جزء یکی از سرویس‌های مهم شبکه است و برای کاربردهایی مانند روزرسانی برنامه، پیکره‌بندی شبکه از راه دور، کشف مسیرها، و امثال آن ضروری است. مساله چند پخشی در شبکه‌هایی همچون شبکه‌های بی‌سیم موردی، که در آن گره‌ها همیشه بیدار هستند و مشکل اتصال همسایه‌ها وجود ندارد، به خوبی بررسی شده است [۲-۳]. برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر چرخه وظیفه، چند پخشی بسیار چالش برانگیز است. زیرا در این نوع شبکه‌ها، هر گره تنها در تعدادی از برهه‌های زمانی بیدار است و گره‌های همسایه معمولاً به طور همزمان برای دریافت داده بیدار نمی‌شوند.

پروتکل‌هایی مانند S-MAC [۴] و T-MAC [۵] فرض کرده‌اند که گره‌های شبکه همگام هستند و تمام آن‌ها از یک زمانبندی خواب و بیداری پیروی می‌کنند. به نحوی که همه‌ی گره‌ها همزمان روشن

برای دریافت داده پخشى بیدار بمانند. X-MAC [۱۴] به نحو خوبى کارایى B-MAC در ارسال داده تک‌پخشى را بهبود داده است، اما حمایت از داده چندپخشى در این کار به طور واضح مورد بررسی قرار نگرفته است.

در X-MAC-UPMA [۱۵] فرستنده باید به صورت تکرارى داده پخشى را در سرتاسر چرخه وظیفه خود ارسال دارد حتى اگر تمامی همسایه‌ها آن را دریافت کرده باشند. این ارسال تکرارى باعث مصرف انرژی بیهوده در فرستنده شده همچنین هدایت داده پخشى توسط همسایه‌ها را به تاخیر می‌اندازد. بعلاوه، همسایه‌ها پس از دریافت داده پخشى باز بیدار می‌مانند که این مساله باعث مصرف بیشتر انرژی می‌شود. یک راهکار برای این مشکل به خواب رفتن یک همسایه پس از دریافت داده پخشى است. اما این کار نیاز به ملاحظاتی دارد چرا که باید بررسی شود که دوباره چه هنگام گره همسایه برای هدایت داده پخشى بیدار گردد. همچنین اگر دو فرستنده‌ای که از دید یکدیگر پنهان هستند همزمان ارسال را انجام دهند آنگاه باعث بروز تصادم‌های پیاپی در گیرنده‌ها برای مدتی طولانى خواهند شد. در پیاده‌سازی X-MAC-UPMA اگر گره‌ای پس از ۱۰۰ میلی ثانیه (پیش‌فرض) نتواند بسته معتبرى را دریافت دارد به حالت خواب می‌رود لذا هیچ وقت نخواهد توانست داده پخشى را دریافت کند.

ADB [۱] مشکلات X-MAC و B-MAC را مرتفع ساخته است. یک گره در ADB در صورت عدم نیاز دسترسی به همسایه، بلافاصله می‌تواند به خواب برود. ADB طراحی شده تا در پروتکل MAC که تک‌پخشى را پشتیبانى نموده و رسانه را برای مدت طولانى اشغال نمی‌کند استفاده شود، تا بتواند تاخیر ارسال داده پخشى را حداقل کند. ADB به جای اینکه برپایه انتظار بیدار شدن گره‌های همسایه در طول چرخه وظیفه باشد، مبتنى بر کیفیت اتصال است. به‌طور کلی، ADB برای استفاده در یک پروتکل MAC، نیازمند تغییرات اساسی در آن است.

Hybrid-cast [۱۲] برای شبکه‌های چندگانه‌ای طراحی شده است که در آن هر گره در شروع برهه زمانى بیدارى یک پیام علامت ارسال می‌کند. Hybrid-cast پس از دریافت اولین پیام علامت، با به تعویق انداختن ارسال داده پخشى، سعی دارد شانس دریافت داده پخشى توسط گره‌های همسایه را افزایش دهد (در حالى که این امر تضمین شده نیست). اگر چه در Hybrid-cast روشى مکاشفه‌ای برای انتخاب گره‌های هدایت‌کننده به صورت برخط ارائه شده است تا بتوان توسط آن تعداد ارسال‌ها اضافی را کاهش داد. اما در مورد چگونگی پیاده‌سازی آن توضیحی ارائه نشده است.

۳- مدل‌ها و مقدمات اولیه

۳-۱- مدل شبکه و مفروضات

شبکه حسگر را با یک گراف جهت‌دار $G(V, E)$ مدل می‌کنیم، به طوری که V مجموعه‌ی گره‌های شبکه است و E مجموعه لبه‌ها است.

حال ارسال داده‌ای پخشى هستند، هنوز گره فرستنده اصلی نیز در حال ارسال همان داده به برخی دیگر از همسایه‌های خود است. این مساله باعث افزایش تصادم و همچنین اتلاف انرژی می‌شود.

کارهایی در زمینه حمایت از ارسال داده‌های پخشى چندگانه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنى بر چرخه وظیفه انجام شده است. پروتکل ADB [۱۱] از تک پخشى برای ارسال چندپخشى بهره می‌برد و به دنبال کاهش تاخیر ارسال در کل شبکه است. اما این پروتکل ممکن است در شبکه‌هایی با مقیاس بالا سودمند نباشد و همچنین برای تحویل حجم بالایی از داده به تمام گره‌های شبکه مناسب نیست. زیرا به خاطر ارسال‌های زیاد پیام‌ها، هزینه‌ی ارسال پیام و مصرف انرژی بالا خواهد بود. در Hybrid-cast [۱۲] یک گره هنگامی داده پخشى را ارسال می‌کند که پیام beaconی را از همسایه خود دریافت کرده باشد. اما ارسال را با اندکی تاخیر انجام می‌دهد به این امید که گره‌های همسایه‌ی دیگری هم بیدار شده و بسته را دریافت کنند و در کل میانگین تاخیر کاهش یابد. همچنین در این پروتکل گره‌هایی انتخاب می‌شوند تا فقط آن‌ها بسته پخشى را هدایت کنند و با این کار سعی شده است تا از تعداد بسته‌های ارسالى اضافی کاسته شود اما چگونگی انتخاب این گره‌های هدایت‌کننده به روشنى توضیح داده نشده است. در این مقاله، سعی شده است که تعداد ارسال(های) داده پخشى در شبکه کاهش داده شود و به همین سبب مصرف انرژی کاهش یابد. همچنین به دنبال آن هستیم که تاخیر ارسال داده پخشى را نیز حداقل نمائیم. روش ارائه شده در این مقاله برای شبکه‌هایی است که مبتنى بر چرخه وظیفه هستند و برای سازماندهی چرخه وظیفه خود از سیستم(های) حدنصاب استفاده می‌کنند.

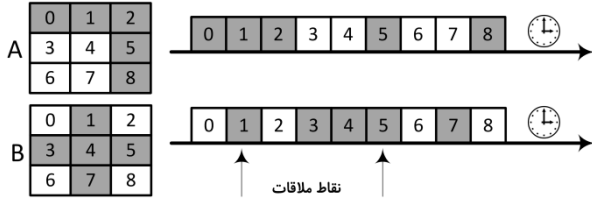
مابقی مقاله به این‌گونه سازماندهی شده است: در بخش ۲ کارهای مرتبط بررسی شده، در بخش ۳ مدل‌ها و مقدمات اولیه ارائه شده است. روش پیشنهادی در بخش ۴ مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در بخش ۵ شبیه‌سازی و ارزیابى روش پیشنهادی آورده شده است. نهایتاً نتیجه‌گیری نیز در بخش ۶ آمده است.

۲- کارهای مرتبط

اکثر کارهای انجام شده در لایه دسترسی به رسانه‌ی شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنى بر چرخه وظیفه، روی مساله ارسال تک پخشى تمرکز کرده‌اند و تعداد کمی از این پروتکل‌ها به طور صریح روش‌هایی را برای ارسال داده چندپخشى تک‌گانه حتى تعریف کرده‌اند و یا کارایی آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. در ارسال پخشى تک‌گانه، گره‌ای داده پخشى را به همسایه‌های مستقیم خود (آن‌هایی که با یک پرش از او قابل دسترس هستند) تحویل می‌دهد. از پخشى تک‌گانه اغلب به عنوان سنگ بنای پخشى چندگانه استفاده می‌شود.

B-MAC [۱۳] چندپخشى تک‌گانه را همانند ارسال تک‌پخشى انجام می‌دهد به نحوی که ارسال داده‌ی آغازین را برای یک بازه خواب کامل ادامه می‌دهد تا تمامی همسایه‌ها داده آغازین را دریافت کرده و

از چنین حدنصاب‌هایی استفاده کنند، آنگاه در هر چرخه n یکدیگر را حداقل در دو برهه زمانی ملاقات خواهند کرد. دو حدنصاب مشبک Q_1 و Q_2 ، حتی در صورت بروز جابجایی ساعت^۴ دارای اشتراک غیر تهی بایکدیگر هستند [۱۷]، لذا می‌توانند برای زمانبندی بیداری ناهمگن در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مورد استفاده قرار گیرند.



شکل (۱): دو گره A و B که هر کدام یک سطر و یک ستون تصادفی را از ماتریسی 3×3 انتخاب کرده‌اند در دو برهه زمانی ۱ و ۵ یکدیگر را ملاقات می‌کنند.

۳-۳- بیان مساله

فرض کنید (v_i, t_i) بیانگر i مین ارسال یک داده پخش توسط گره v_i در زمان t_i باشد. آنگاه اگر گره v_0 بخواهد داده‌ای را در زمان t_0 به صورت پخش به تمام شبکه ارسال کند، می‌خواهیم زمانبندی K_i برای هدایت این داده بیابیم:

$$S = \{(v_1, t_1), (v_2, t_2), \dots, (v_m, t_m)\} \quad (t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_m) \quad (3)$$

که $f(S, t_m - t_0)$ حداقل شود، f تابعی از هزینه ارسال $|S|$ یا «شمار پخش»^۵ است و $(t_m - t_0)$ «تاخیر پخش»^۶ است. شمار پخش یعنی تعداد پیام‌های ارسال شده توسط گره‌های شبکه تا دریافت آن‌ها توسط همه‌ی گره‌ها. تاخیر پخش نیز یعنی زمان بین آغاز ارسال داده پخش تا دریافت آن توسط همه‌ی گره‌های شبکه. در واقع هدف این مقاله طراحی زمانبندی برای داده‌های پخش است که نه تنها تاخیر پخش ارسال داده به سراسر شبکه، بلکه شمار پخش را نیز کاهش دهد. در این راستا قیود زیر برای زمانبندی مذکور برقرار است:

$$W_{v_i}(t_i) = 1, R_0 = \{v_0\}, R_i = \{j \mid j \in N(i), W_j(t_j) = 1\} \quad \bullet$$

یعنی، گره v_i در صورتی می‌تواند داده پخش را به همسایه j خود در زمان t_j تحویل دهد که هر دو بیدار باشند.

$$\exists j, t_j < t_i, v_i \in R_j, i = 1, 2, \dots, m \quad \bullet$$

یعنی، ارسال داده به صورت گام به گام است و گره‌ای می‌تواند داده را ارسال کند که قبلاً آن را دریافت کرده است.

$$\bigcup_{i=0}^{i=m} R_i = Y \quad \bullet$$

یعنی، داده پخش بایستی به تمامی گره‌های شبکه (Y) برسد.

۴- روش پیشنهادی

۴-۱- تعویض زمانبندی بیداری

اگر چرخه‌ی وظیفه گره‌های شبکه متغیر باشد، آنگاه برای این‌که گره‌ای پیام علامت را به تمامی گره‌های همسایه ارسال کند نیازمند

اگر گره v_i در حوزه رادیویی گره v_j باشد آنگاه لبه (v_i, v_j) متعلق به E خواهد بود. فرض کرده‌ایم که لینک‌ها دو طرفه باشند. گره‌هایی که با یک گام از گره‌ی v_i قابل دسترس هستند را با $N(i)$ نشان می‌دهیم.

فرض کرده‌ایم که محور زمان به برهه‌های زمانی هم‌اندازه تقسیم شده است. طول هر برهه زمانی T_s است. گره‌ها از نظر زمانی همگام هستند. هر گره v_i دارای یک الگوی زمانبندی است که به ازای هر n_i برهه زمانی به صورت دوره‌ای تکرار می‌شود. n_i طول چرخه‌ی گره v_i نامیده می‌شود. زمانبندی خواب و بیداری گره‌ها مبتنی بر سیستم حدنصاب مشبک^۱ است. $W_i(t) \in \{0, 1\}$ بیانگر زمان خواب/بیداری گره i در زمان t است. به نحوی که $W_i(t) = 0$ اگر گره خواب باشد و $W_i(t) = 1$ اگر گره بیدار باشد. R_i شامل مجموعه گره‌هایی است که در ارسال نام، داده پخش را دریافت می‌کنند. مانند [۷] فرض می‌کنیم که در ابتدای برهه‌ی بیداری پیام علامت^۲ بتواند ارسال شود.

۳-۲- زمانبندی بیداری ناهمگن

زمانبندی بیداری ناهمگن یعنی این‌که گره‌های شبکه زمانبندی‌های خواب و بیداری مختلفی را به طور مستقل برگزیده باشند. زمانبندی بیداری مبتنی بر سیستم حدنصاب [۸-۱۱] از نوع زمانبندی ناهمگن است. در این نوع زمانبندی، یک سیستم حدنصاب مانند سیستم مشبک یا تورس [۱۶] و امثال آن، برای معین کردن زمان‌های خواب و بیداری هر گره استفاده می‌شود. در زمانبندی مبتنی بر حدنصاب هر دو گره همسایه یکدیگر را حداقل یک بار طی یک بازه زمانی محدود ملاقات می‌کنند و دلیل آن نیز وجود اشتراک غیر تهی بین حدنصاب‌ها است. در این مقاله، سیستم حدنصاب مشبک به دلیل ساختار ساده‌ی آن انتخاب شده است. اما روش پیشنهادی ارائه شده در این مقاله برای سیستم‌های حدنصاب دیگر نیز قابل اعمال خواهد بود. در ادامه به طور مختصر سیستم حدنصابی را که برای زمانبندی بیداری گره‌ها در شبکه استفاده می‌شود ارائه می‌کنیم. فرض کنید n بیانگر طول چرخه و $U = \{0, \dots, n-1\}$ باشد.

تعریف ۱. سیستم حدنصاب Q تحت U ، مجموعه‌ای از زیرمجموعه‌های غیر تهی از U است که هر یک از این زیرمجموعه‌ها حدنصاب^۳ نامیده می‌شوند و خاصیت اشتراکی زیر بین آن‌ها برقرار است:

$$\forall G, H \in Q : G \cap H \neq \emptyset.$$

همچنین اگر

$$\forall G, H \in Q, i \in \{0, \dots, n-1\} : G \cap (H + i) \neq \emptyset \quad (1)$$

به نحوی که

$$H + i = \{(x + i) \bmod n : x \in H\}. \quad (2)$$

آنگاه گفته می‌شود که Q دارای خاصیت بسته بودن نسبت به چرخش است.

سیستم حدنصاب مشبک نسبت به چرخش بسته است [۱۷]. در این حدنصاب (مانند شکل ۱) یک سطر و یک ستون به صورت تصادفی از ماتریسی مربعی به ابعاد $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$ انتخاب می‌شود، اگر دو سیستم

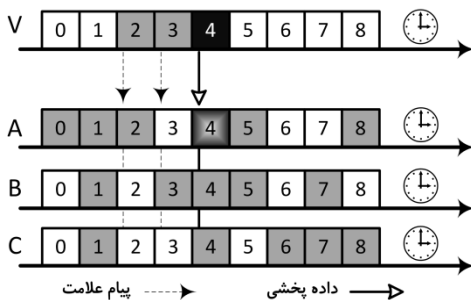
تکرار کند، مانند شکل ۲ و نهایتاً داده پختی در برهه بیداری ۷ ارسال شود.

0	1	2
3	4	5
6	7	8

شکل (۲): برهه‌های بیداری لازم برای ارسال اعلان پختی و داده پختی، در صورتی که طول چرخه وظیفه برابر ۹ است.

از آنجائی که گره فرستنده پس از $\sqrt{n_m}$ برهه‌زمانی با تمامی همسایه‌های خود ملاقات کرده است و در زمان تعیین شده (در این جا برهه‌زمانی شماره ۷) بسته‌های پختی را ارسال نموده، پس همه همسایه‌های تک‌گامه پیام پختی را دریافت خواهند کرد و بدین صورت تاخیر ارسال بسته پختی به همسایه‌های تک‌گامه برابر خواهد بود با $(\sqrt{n_m}-1) \times T_s$. و همچنین تعداد دفعات لازم برای ارسال داده پختی به تمامی همسایه‌های تک‌گامه برابر با یک خواهد بود.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است گره فرستنده V پس از دو بار ارسال اعلان پختی، داده پختی را ارسال می‌کند. گره A اعلان پختی را در برهه‌زمانی ۲ دریافت نموده و متوجه می‌شود که در برهه زمانی ۴ (علیرغم زمانبندی بیداری خود) باید برای دریافت داده پختی بیدار شود. گره B اگر چه در برهه‌زمانی ۳ اعلان پرش را دریافت می‌کند اما طبق زمانبندی خود در برهه ۴ نیز برای دریافت داده پختی بیدار است. نهایتاً همسایه C هیچ اعلان پختی را دریافت نمی‌کند اما طبق زمانبندی خود در برهه ۴ بیدار می‌شود و داده پختی را دریافت می‌نماید. پس این امکان وجود دارد که گره‌ای اعلان پختی را دریافت نکرده باشد اما داده پختی را دریافت کند.



شکل (۳): ارسال داده پختی توسط گره V به دو گره A و B و C

در ادامه، اگر گره‌های همسایه که داده پختی را دریافت نموده‌اند، بخواهند همزمان شروع به ارسال بسته علامت جهت اعلان پختی کنند، امکان دارد در صورت مساوی بودن طول چرخه‌شان، تصادم بروز نماید. لذا برای کاهش احتمال بروز تصادم، گره‌هایی که داده پختی را دریافت کرده‌اند به اندازه‌ی عدد تصادفی α ، $1 \leq \alpha \leq n_m - \sqrt{n_m}$ ، منتظر مانده و سپس شروع به ارسال پیام علامت کنند. در این میان، گره‌هایی که داده پختی را قبلاً دریافت کرده‌اند، با توجه به وجود شماره ترتیب در پیام علامت، داده پختی تکراری را تشخیص خواهند

است که زمانبندی بیداری خود را به نحوی تنظیم نماید تا به اندازه کافی بیدار باشد و بتواند پیام علامت را به همه همسایه‌های تک‌گامه خود ارسال کند. در واقع، در سیستم چرخه وظیفه وقتی مبتنی بر حدنصاب مشبک، گره v_i می‌بایستی طول چرخه خود (n_i) را با توجه به بزرگترین طول چرخه همسایه خود (n_m) برگزیند، به نحوی که:

$$n_m = \max_{j \in N(i)} \{n_j\}$$

با توجه به خاصیت اشتراک غیرتهی بین حدنصاب‌ها $[1, 18]$ ، v_i با انتخاب طول چرخه n_m هنوز خواهد توانست با تمامی همسایه‌های خود ملاقات کند اگرچه در تمامی برهه‌های زمانی چرخه خود بیدار نخواهد بود (اثبات در قضیه ۱).

۴-۲- زمانبندی پیشنهادی ارسال داده پختی

گره ای که می‌خواهد داده‌ی پختی ارسال نماید، در هر برهه‌ی زمانی که بیدار می‌شود اطلاعات: ۱- شماره ترتیب بسته پختی و ۲- تعداد برهه‌های زمانی مانده تا ارسال بسته پختی، را به عنوان اعلان پختی در قالب پیام علامت ارسال می‌کند. تا در زمان معین گره‌های همسایه همزمان بیدار شده و با یکبار ارسال داده پختی، آن را دریافت کنند. در واقع گره‌ی منبع داده پختی، زمان تعیین شده برای ارسال داده پختی را به همسایه‌های خود اطلاع می‌دهد تا آنها در زمان مقرر بیدار شده و داده را دریافت کنند.

قضیه ۱: اگر از سیستم حدنصاب مشبک استفاده شود و n_m بزرگترین طول چرخه بین همسایه‌ها باشد، آنگاه گره v که به اندازه $\sqrt{n_m}$ برهه زمانی متوالی بیدار است با هر یک از همسایه‌های خود حداقل یک ملاقات خواهد داشت.

اثبات. فرض کنید که گره همسایه A حدنصاب مشبکی به ابعاد $\sqrt{x} \times \sqrt{x}$ را انتخاب کرده باشد که خواهیم داشت $x \leq n_m$. همچنین فرض نمائید که گره A سطر L_a و ستون C_a را از این مشبک انتخاب کرده باشد. آنگاه C_a شامل \sqrt{x} برهه‌ی زمانی متوالی با فاصله‌ی برابر \sqrt{x} است که حتماً با $\sqrt{n_m}$ برهه زمانی متوالی انتخاب شده توسط v دارای اشتراک خواهد بود زیرا $\sqrt{x} \leq \sqrt{n_m}$.

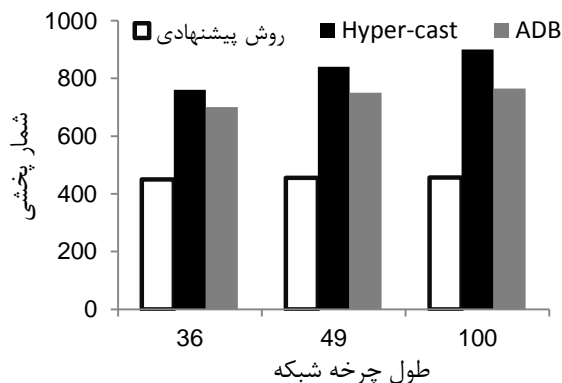
از قضیه ۱ برمی‌آید که اگر n_m بزرگترین طول چرخه بین همسایه‌ها باشد، آنگاه تعداد دفعات لازم برای ارسال پیام علامت به همسایه‌ها برابر است با $\sqrt{n_m}-1$. یعنی گره‌ای که داده‌ای پختی برای ارسال دارد کفایت از یک برهه زمانی معین شروع به بیدار شدن نموده و اعلان پختی را در قالب پیام علامت در شروع هر یک از $\sqrt{n_m}-1$ برهه‌زمانی بیداری متوالی ارسال دارد. نهایتاً داده پختی را در برهه‌زمانی بیداری $\sqrt{n_m}$ ام ارسال کند. طبق قضیه فوق تمامی گره‌های همسایه تک‌گامه داده پختی را دریافت خواهند کرد. به عنوان مثال، اگر $n_m=9$ باشد و در برهه‌زمانی ۵ اولین پیام علامت حاوی اعلان پختی ارسال شود آنگاه کفایت تا در برهه زمانی ۶ هم آن را

۵- نتایج شبیه‌سازی

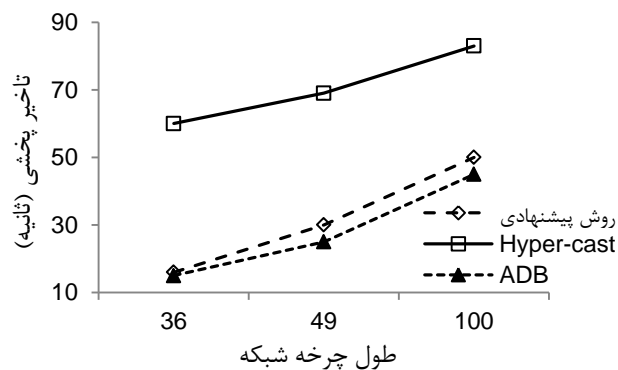
روش پیشنهادی را با استفاده از OPNET [۱۹] شبیه‌سازی کردیم. و آن را با روش‌های ADB [۱] و Hyper-cast [۱۲] مورد مقایسه قرار داده‌ایم. شمار پخشی و تاخیر پخشی به عنوان معیارهایی برای ارزیابی استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، ناحیه‌ای به اندازه ۲۰۰ متر در ۲۰۰ متر برای قرار دادن ۳۰۰ گرهی حسگر در نظر گرفته شده است. طول هر برهه‌ی زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه، و برد رادیویی هر گره برابر با ۱۰ متر تنظیم شد. همچنین اندازه یک بسته پخشی ۵۱۲ بایت در نظر گرفته شد. هر نقطه در شکل‌های این بخش برابر میانگین ده بار اجرای شبیه‌سازی است.

۵-۱- شمار پخشی

برای مقایسه شمار پخشی بین پروتکل‌ها، سیستم‌های حدنصابی با طول چرخه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. و به ازای هر اندازه طول چرخه، میانگین شمار پخشی محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، روش پیشنهادی توانسته است شمار پخشی بهتری را نسبت به دو روش موجود دیگر ارائه دهد.



شکل (۴): مقایسه روش‌های مختلف از نظر شمار پخشی



شکل (۵): مقایسه روش‌های مختلف از نظر تاخیر پخشی

۵-۲- تاخیر پخشی

شکل ۵ مقایسه‌ای از نظر تاخیر پخشی بین روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود روش ADB تاخیر پخشی

داد و برای صرفه‌جویی در انرژی در برهه زمانی تعیین شده برای ارسال داده پخشی، به حالت خواب می‌روند.

قضیه ۲. فرض کنید عمق شبکه (یعنی، بیشترین لایه‌های شبکه توسط جستجوی اول پهنا) برابر d اندازه بزرگترین حدنصابی که در شبکه استفاده شده برابر با q_{max} و طول یک برهه زمانی برابر با T_s باشد. آنگاه حد بالا برای تاخیر پخشی برابر خواهد بود با $(\sqrt{q_{max}} + (d-1)q_{max} - 1)T_s$.

اثبات. اگر در یک همسایگی از گره‌ها، اندازه بزرگترین حدنصاب برابر n_m باشد تاخیر ارسال پخشی تک‌گامه برای لایه اول برابر است با $(\sqrt{n_m} - 1) \times T_s$. پس از آن برای ارسال‌های بعدی با توجه به انتظاری که گره‌ها به اندازه عدد تصادفی α متحمل می‌شوند، حداکثر تاخیر تک‌گامه برابر خواهد بود با $q_{max} \times T_s$ که طی آن تمامی گره‌های همسایه در لایه دوم داده پخشی را دریافت خواهند کرد. بنابراین با توجه به اینکه $n_m \leq q_{max}$ ، پس تاخیر پخشی حداکثر به اندازه $(\sqrt{q_{max}} + (d-1)q_{max} - 1)T_s$ تمامی گره‌های شبکه داده پخشی را دریافت خواهند کرد. ■

۴-۳- بهبود در روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی در بخش قبل، هر گره‌ای که داده پخشی را دریافت می‌کند بدون توجه به این که آیا نیازی به ارسال آن به همسایه‌ها هست یا خیر، داده پخشی را ارسال می‌کند. این باعث خواهد شد که تعداد ارسال‌های بی‌مورد زیاد شده و موجب افزایش مصرف انرژی گره‌ها می‌شود.

به عنوان بهبودی در روش قبل پیشنهاد می‌شود هر گره‌ای که پیام علامت دریافت می‌کند، اگر پیام پخشی را قبلاً دریافت نکرده است، یک پیام کوتاه PreACK ارسال کند. این پیام کوتاه به ازای هر پیام پخشی (با توجه به شماره ترتیب) فقط یک‌بار ارسال خواهد شد. اگر گره فرستنده پس از $\sqrt{n_m}$ برهه زمانی بیداری، پیام PreACKی دریافت نکند، یعنی هیچ همسایه‌ای نیاز به دریافت داده پخشی ندارد بلکه قبلاً آن را دریافت کرده‌اند. لذا فرستنده برای صرفه‌جویی در انرژی به حالت خواب می‌رود.

در صورتی فرستنده داده پخشی را ارسال می‌کند که در طول $\sqrt{n_m}$ برهه زمانی حداقل یک بار بسته PreACK را دریافت کرده باشد. پس از اولین بار دریافت بسته PreACK، فرستنده می‌تواند فیلدی را در پیام علامت مقداره‌ی کند بیانگر این که دیگر نیازی به ارسال PreACK از جانب همسایه‌ها نیست. این کار باعث صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی همسایه‌ها خواهد شد. در واقع با این کار در هر بار ارسال داده پخشی به همسایه‌های تک‌گامه، فقط یک‌بار بسته PreACK ارسال می‌گردد. همچنین اگر این پیام قبل از برهه زمانی بیداری $\sqrt{n_m} - 1$ ام دریافت شود داده پخشی می‌تواند در برهه زمانی $\sqrt{n_m}$ ام ارسال شود.

- [۸] S. H. Wu, et al., "Collaborative wakeup in clustered ad hoc networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. ۲۹, pp. 1585-1594, 2011.
- [۹] Z. T. Chou, et al., "Optimal asymmetric and maximized adaptive power management protocols for clustered ad hoc wireless networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 22, pp. 1961-1968, 2011.
- [۱۰] S. Lai, et al., "Heterogenous quorum-based wake-up scheduling in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 59, pp. 1562-1575, 2010.
- [۱۱] C. M. Chao and Y. W. Lee, "A quorum-based energy-saving MAC protocol design for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, pp. 813-822, 2010.
- [۱۲] S. Lai and B. Ravindran, "On multihop broadcast over adaptively duty-cycled wireless sensor networks," in *6th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCOSS 2010, Santa Barbara, CA, 2010*, pp. 158-171.
- [۱۳] J. Polastre, et al., "Versatile low power media access for wireless sensor networks," presented at the Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, Baltimore, MD, USA, 2004.
- [۱۴] M. Buettner, et al., "X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," presented at the Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, Boulder, Colorado, USA, 2006.
- [۱۵] K. Klues, et al., "A component-based architecture for power-efficient media access control in wireless sensor networks," presented at the Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems, Sydney, Australia, 2007.
- [۱۶] S.-D. Lang and L.-J. Mao, "A torus quorum protocol for distributed mutual exclusion," in *Proceedings - 10th International Conferences of Parallel and Distributed Computing System*, 1998, pp. 635-638.
- [۱۷] C. M. Chao, et al., "An adaptive quorum-based energy conserving protocol for IEEE 802.11 ad hoc networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, pp. 560-570, 2006.
- [۱۸] G. EkbataniFard and R. Monsefi, "MAMAC: A Multi-channel Asynchronous MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 91-98.
- [۱۹] OPNET Modeler. Available: http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler.html

آخرنویس

کمتری را نسبت به دو روش دیگر ارائه می‌دهد. اما باید توجه داشت که این روش از نظر شمار پخشی (شکل ۴) دارای وضعیت خوبی نبود. روش پیشنهادی تاخیر پخشی نسبتاً خوبی را ارائه می‌دهد و باید توجه داشت که از نظر تاخیر پخشی نیز نسبت به دو روش دیگر در وضعیت بسیار بهتری بود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله راهکارهایی برای بهبود تاخیر پخشی و شمار پخشی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر سیستم حدنصاب ارائه گردیده و جزئیات آن مورد بحث و بررسی قرار گرفت. با تحلیل ریاضی، کران بالای تاخیر پخشی در روش پیشنهادی محاسبه شد. روش پیشنهادی با دو روش جدید ارائه شده برای مساله چند پخشی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مورد مقایسه قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های انجام شده در محیط OPNET نشان داد که روش پیشنهادی نسبت به دو روش دیگر در مجموع کارایی بهتری داشته است.

مراجع

- [۱] Y. Sun, et al., "ADB: an efficient multihop broadcast protocol based on asynchronous duty-cycling in wireless sensor networks," presented at the Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Berkeley, California, 2009.
- [۲] S.-Y. Ni, et al., "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," presented at the Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, Seattle, Washington, United States, 1999.
- [۳] B. Williams and T. Camp, "Comparison of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks," presented at the Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [۴] Y. Wei, et al., "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, 2002*, pp. 1567-1576 vol.3.
- [۵] T. v. Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," presented at the Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, Los Angeles, California, USA, 2003.
- [۶] Y. Sun, et al., "RI-MAC: a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks," presented at the Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems, Raleigh, NC, USA, 2008.
- [۷] T. Lei, et al., "PW-MAC: An energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks," in *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE, Shanghai, China, 2011*, pp. 1305-1313.

¹ Grid

² Beacon

³ Quorum

⁴ Clock drift

⁵ Broadcast count

⁶ Broadcast latency