

بهینه‌سازی پروتکل مسیریابی S-MAC برای کاهش مصرف انرژی

احسان خراطی

e-kharati@iau-arak.ac.ir

علی موقر

movaghar@sharif.edu

استماع^۲ بلااستفاده را کاهش دهد. در یک شبکه Ad hoc هر گره می‌تواند با سایر گره‌ها ارتباط برقرار کند، اما الگوی ارتباطی ما، چند به یک بوده و همه گره‌های حسگر با یک یا چند سینک ارتباط دارند. محدودیت ما حفظ انرژی گره حسگر و مقیاس‌پذیری شبکه است. شبکه‌های ارتباطی قبلی برای کاهش هزینه و سبک‌تر کردن عملیات از یک پروتکل لایه‌ای استفاده می‌کردند. ما در پروتکل پیشنهادی برای کاهش مصرف انرژی از شماره لایه‌های شبکه به‌عنوان آدرس گره‌ها استفاده کرده و از خاموش کردن واحد رادیویی گره، هنگامی که هیچ رویدادی رخ ندهد یا گره مربوطه در ارسال داده برای یک گره دیگر دخالت ندارد، استفاده می‌کنیم.

۲- اصول الگوریتم S-MAC

در این پروتکل، شبکه به لایه‌های مدور به‌مرکز گره سینک تقسیم شده و گره‌ها روی آن توزیع شده‌اند. شعاع ارتباطی هر گره R و احتمال وقوع رخداد در هر نقطه از ناحیه، یکسان بوده و فقط یک گره این واقعه را کشف و گزارش می‌دهد. در شکل ۱ لایه‌ها از خارج به داخل بترتیب شماره‌گذاری شده‌اند؛ و یک گره حسگر در لایه n می‌تواند به گره‌های لایه $n+1$ و $n-1$ پیغام ارسال کند [3]. اولین تغییر برای ساده کردن مسیریابی، آن است که هر گره در لایه n فقط بتواند به لایه‌های نزدیک سینک، یعنی $n+1$ و $n+2$ و ... پیغام درخواست مسیریابی را ارسال کند. به این ترتیب هر گره فقط بسته‌هایی که شماره لایه کمتری دارند را دریافت می‌کند؛ تا سربر لازم برای کشف مسیریابی کاهش می‌یابد. در پروتکل IEEE 802/11 گره‌ها برای برقراری ارتباط از آدرس از قبل تعیین شده یکتای MAC، استفاده کرده و هنگام ارسال پیغام درخواست مسیریابی (RTR^۱)، باید همه گره‌های میانی بین منبع و مقصد از قبل مشخص باشند؛ اما در پروتکل S-MAC، گره‌ها از آدرس-های تصادفی برای ارتباط استفاده کرده و هدف از ارسال پیغام درخواست مسیریابی، جستجو یک گره میانی نزدیک به سینک است که ممکن است از قبل تعیین نشده باشد. به عبارت دیگر پیغام درخواست مسیریابی یک پیغام یک به یک بوده و هر گره که شماره لایه‌اش از شماره درونی بسته کمتر باشد، می‌تواند پیغام پاسخ (CTR^۲) را به آن ارسال کند. اگر همه گره‌ها واحدهای رادیویی خود را همیشه روشن نگه دارند، انرژی گره‌ها پایان یافته و شبکه سقوط می‌کند. پروتکل S-MAC یک پروتکل عمومی بوده و برای کشف و گزارش واقعه طراحی

چکیده: کاربرد پروتکل S-MAC در شبکه‌های بی‌سیم و کشف وقایع نادر و عکس‌العمل سریع است. این پروتکل شبکه را بصورت لایه‌های هم‌مرکز در اطراف سینک تقسیم کرده و برای گره‌ها از آدرس‌دهی تصادفی، استفاده کرده و به کمک بسته‌های کنترل MAC، گره میانی بعدی برای مسیریابی و ارسال بسته‌ها را می‌یابد. با ایجاد وضعیت‌های مختلف گره، مانند خواب یا بیدار بودن و کاهش ارسال اطلاعات و ایجاد همزمان‌سازی می‌توان مصرف انرژی ناشی از استماع بلااستفاده را کاهش داد. با مقایسه و ارزیابی و شبیه‌سازی پروتکل‌های پیشنهادی و S-MAC می‌توان کارایی و بهینه شدن مصرف انرژی را برای کشف و گزارش رویدادها، ناشی از تغییر در پروتکل S-MAC مشاهده کرد.

کلمات کلیدی: آدرس‌دهی MAC، وضعیت حفظ انرژی، کشف وقایع نادر، کاهش تاخیر و شبکه‌های حسگر بی‌سیم.

۱- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زمینه تکنولوژی ارتباطات بی‌سیم سعی در کوچک‌سازی وسایل حسگر و الکترونیکی داشته بطوری‌که یک شبکه حسگر بی‌سیم از تعداد زیادی وسایل حسگر تشکیل شده که همگی برای یک هدف خاص با هم کار می‌کنند. گره‌های حسگر در یک کانال بی‌سیم با یکدیگر و یک یا چند گره سینک^۱ در ارتباط هستند. کاربرد شبکه‌های بی‌سیم گردآوری داده‌هایی با حساسیت زمانی و مکانی در محیط‌های مختلف است [1]. هر شبکه بی‌سیم، برای یک کاربرد خاص طراحی شده که براساس انتقال داده‌ها و خصوصیات ترافیکی به ۵ دسته تقسیم می‌شوند [2]: کشف و گزارش واقعه، کنترل و گزارش متناوب، گزارش اولیه سینک، کشف شی و ردیابی آن و ترکیب هر یک از این موارد. در این مقاله، ما انرژی را در کاربرد اول، کاهش می‌دهیم. این کاربردها نظیر کشف آتش‌سوزی و خطرات محیطی بوده و با کشف یک واقعه، به سرعت گزارشی به سینک ابلاغ می‌شود. این گزارش شامل مقداری اطلاعات محلی درباره محل و کیفیت رخداد است.

الگوریتم پیشنهادی ما براساس پروتکل S-MAC [3] بوده که مکانیزم مسیریابی آن بهبود یافته است؛ بطوری‌که می‌تواند وقایع را در شبکه‌های بی‌سیم، کشف و گزارش کند. این پروتکل شبکه را بصورت لایه‌هایی بدور سینک تقسیم کرده و بسته‌ها را بسوی لایه‌های نزدیک به سینک ارسال می‌کند و برای حفظ انرژی، واحدهای رادیویی گره‌ها را بصورت متناوب و مجزا از یکدیگر، خاموش کرده تا انرژی را حفظ و

^۲ فعالیت رادیویی یک گره برای دریافت گزارش

^۱ Request To Replay

^۲ Clear To Relay

^۱ گره‌ای که مخصوص جمع‌آوری اطلاعات و گزارش وقایع از گره‌های حسگر بوده و رابط شبکه‌های بی‌سیم با دنیای بیرون بوده و همواره بیدار است.

(\bar{OPI}) است. اندازه بسته RSD چند بیت بوده و نسبت به آدرس‌های ثابت MAC، بازای هر گره، بسیار کمتر است. هرچند حالت‌های پروتکل پیشنهادی مشابه حالت‌های پروتکل IEEE 802/11 است، اما تفاوت آنها در تصادفی بودن آدرس گره‌های میانی است و برای هر پیغام درخواست و پاسخ، آدرس جدیدی ساخته می‌شود در نتیجه مسئولیت گره‌های مجاور برای آدرس‌های یکسان کاهش می‌یابد.

۵- حالت حفظ انرژی

در یک شبکه بی‌سیم که از پروتکل MAC برای دسترسی تصادفی استفاده می‌کند، استماع بلااستفاده و استماع ناخواسته، دو عامل اصلی مصرف انرژی هستند. اگر گره میانی نیاز به انتقال نداشته باشد و واحد رادیویی گره نیز روشن باشد، اصطلاحاً آن گره در حالت بلااستفاده است و اگر طی ارسال داده بین دو گره دیگر واحد رادیویی گره روشن باشد، اصطلاحاً آن گره در حالت استماع ناخواسته است. مقاله‌های قبلی از یک حالت حفظ انرژی استفاده می‌کردند.

در پروتکل پیشنهادی برای حفظ انرژی از یک الگوریتم چرخشی تصادفی حالت خواب و بیدار، استفاده می‌کنیم؛ بطوری‌که گره‌ها به مدت t_s واحد رادیویی خود را قطع کرده و اصطلاحاً می‌خوابند. این مدت بصورت تصادفی و مطابق با یک توزیع‌نمایی است. اگر یک گره حسگر در حالت خواب، رخدادی را کشف کند، به‌سرعت بیدار شده و بحالت شنونده می‌رود؛ در غیراینصورت پس از پایان زمان خواب بیدار شده و بمدت t_{on} بیدار می‌ماند؛ تا بتواند برای سایر گره‌هایی که می‌خواهند داده خود را به گره سینک انتقال دهند، به‌عنوان گره میانی در دسترس باشد. پس زمان بیداری باید آنقدر بزرگ باشد تا بتوان حداقل

به یک درخواست سایر گره‌ها پاسخ داد؛ یعنی: $t_{on} > t_g + T_L$

پارامتر α ، مقیاس پهنای هر لایه بوده و تاثیر آن بر تعداد گره میانی و متوسط مصرف انرژی است. فرض کنید در شکل ۱ گره‌ای که با ضربدر مشخص شده، می‌خواهد داده‌ای را به سینک ارسال کند؛ براساس الگوریتم مسیریابی پروتکل پیشنهادی، فقط گره‌هایی می‌توانند داده را از این گره انتقال دهند که در ناحیه هاشور خورده باشند. این ناحیه، اشتراک دو حلقه با مرکز گره فرستنده با شعاع دامنه ارتباطی R و دایره‌ای به مرکز سینک با شماره لایه $n-1$ و شعاع $\alpha(n-1)R$ است. پس α باید کمتر از یک باشد تا هر گره در لایه n بتواند با لایه $n-1$ ام ارتباط برقرار کند. و نیز فقط یک گره از این ناحیه، باید داده را از گره فرستنده انتقال دهد. مساحت ناحیه هاشور خورده برابر است با:

$$\vartheta(\alpha) = R^2 (A + (n_0 - 1)^2 \alpha^2 B - n_0 \alpha \sin A) \quad (1)$$

پس تعداد متوسط گره‌های احتمالی موجود برای انتقال داده از هر گره، حداقل $\lambda \vartheta(\alpha)$ است. که λ تراکم گره‌ها در هر متر مربع بوده که بطور تصادفی و یکنواخت در سرتاسر شبکه، توزیع شده‌اند. پس فرض می‌کنیم مقدار λ به اندازه کافی بزرگ بوده تا صرفنظر از مقدار α ، اتصال

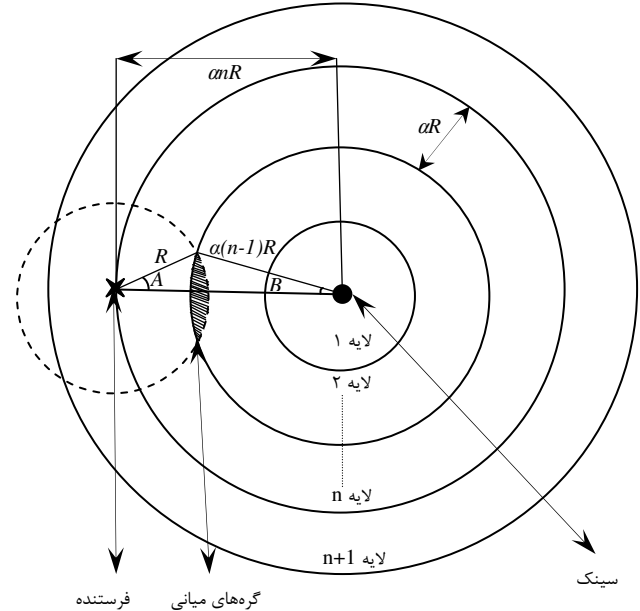
نشده است و براحتی نمی‌توان گره‌ها را خاموش و روشن کرد [3]؛ اما خواب و بیدار کردن گره‌ها، براساس یک الگوی نامنظم و مستقل و بدون هیچ گونه مبادله اطلاعاتی، می‌توان مصرف انرژی را کاهش داد.

۴- الگوریتم پیشنهادی

دو فاز پیکربندی و فعالیت را به پروتکل S-MAC، می‌افزاییم.

۴-۱- فاز پیکربندی و کشف مسیر

این فاز، شبکه را بصورت لایه‌ای سازماندهی می‌کند، بطوری‌که ابتدا سینک یک پیغام را همراه با سطح انرژی و دامنه ارتباطی αR ارسال می‌کند. سپس همه گره‌هایی که این پیغام را دریافت کردند، خود را عضو لایه اول می‌کنند. سینک بطور متناوب پیغام‌هایی با شعاع‌های ارتباطی مختلف ارسال کرده تا گره‌ها در لایه‌های شبکه توزیع شوند؛ تا لایه‌های حلقوی با ضخامت αR و به‌مرکز سینک ایجاد شود.



شکل ۱: ساختار لایه‌ای در شبکه برای مسیریابی

۴-۲- فاز فعالیت

این فاز شامل عملیات مسیریابی و دسترسی لایه‌ای است. اگر یک گره در حال انتقال نباشد همیشه در حال گوش دادن به کانال رادیویی بوده که اصطلاحاً به آن، حالت شنونده گویند و تا زمان کشف یک واقعه یا انتقال اطلاعات برای یک گره دیگر، در همین حالت باقی می‌ماند. هر گره قبل از انتقال هر پیغام، یک زمان حفاظت (t_g) برای آزاد شدن کانال و یک زمان استماع تصادفی (t_l) برای جلوگیری از برخورد و انتقال همزمان گره‌ها منتظر می‌ماند. سپس گره حسگر یک پیغام درخواست (RTR) برای انتقال ارسال می‌کند؛ که شامل هویت منبع تصادفی (RSD) و آدرس لایه منبع (\bar{STD}) که همان شماره لایه است و یک NAV که اندازه بسته را نمایش می‌دهد، و مقداری اطلاعات اختیاری

³Optional Packet Information

¹Random Source Identifier

²Source Tier Identifier

می‌کنیم. حتی تحت این شرایط مطلوب برای S-MAC، پروتکل پیشنهادی عملکرد بهتری برای کشف و گزارش واقعه، دارد.

پروتکل پیشنهادی برای کشف و گزارش وقایع و خوابیدن و بیدار شدن گره‌ها انرژی مصرف می‌کند. اگر فرکانس رخداد وقایع $1/T$ باشد و P_{on} مصرف انرژی در زمان روشن بودن واحد رادیویی و E_{up} و E_{dw} و E_{report} به ترتیب انرژی لازم برای هر گزارش و خوابیدن و بیدار شدن گره‌ها باشد، متوسط مصرف انرژی برای گزارش برابر است با: E_{report}/T و چون مدت خوابیدن و بیدار شدن گره‌ها با $1/\sigma$ بطور نمایی توزیع شده پس کل انرژی لازم برای خوابیدن و بیدار شدن گره‌ها برابر است با: $N(E_{up} + E_{dw} + P_{on}t_{on})\sigma$ که N کل گره‌های موجود در منطقه‌ای به شعاع L بوده و برابر است با: $N = \pi L^2 \lambda$ ، پس مصرف انرژی در بدترین حالت برابر است با:

$$P_{avg} = N(E_{up} + E_{dw} + P_{on}t_{on})\sigma + \frac{E_{report}}{T} \quad (7)$$

و متوسط انرژی مصرفی برای هر گزارش برابر است با:

$$E_{report} = E_{hop} H_{avg}^A \quad (8)$$

که E_{hop} انرژی مصرفی در هر گره میانی و H_{avg}^A متوسط تعداد گره میانی بوده که باید، گزارش واقعه را ارسال کنند، پس انرژی مصرفی در هر گره میانی برابر است با:

$$E_{hop} = t_p P_{tr} + \left(t_r + t_g + \frac{T_l}{2} + \frac{T_b}{2} + t_p + \frac{1}{\sigma A} \right) P_{on} + \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{\sigma A t_w} \right) t_{RTR} P_{tr} + \left(t_p + \frac{T_b}{2} \right) P_{on}$$

P_{tr} انرژی لازم برای انتقال پیغام‌های ردوبدل شده بوده و عبارت دوم و چهارم، انرژی مصرفی ناشی از روشن بودن رادیو در گره فرستنده و گیرنده است. عبارت سوم، انرژی لازم برای ارسال پی‌درپی پیغام‌های درخواست بوده تا یک گره میانی از حالت خواب بیدار شود؛ اما چون زمان انتظار بیدار شدن یک گره یعنی $1/\sigma^A$ ، از سایر زمان‌ها بیشتر است، پس با استفاده از تقریب (۶) داریم:

$$E_{hop} = \frac{P_{on}}{\sigma A} = \frac{P_{on}}{\sigma \lambda \vartheta(\alpha)} \approx \frac{P_{on} \tau}{H^A} \quad (10)$$

اکنون با جایگزینی N ، (۸)، (۹) و (۱۰) در (۷) خواهیم داشت:

$$P_{ave} = \frac{\pi L^2 (E_{up} + E_{dw} + P_{on} t_{on}) H^A}{\tau \vartheta(\alpha)} + \frac{P_{on} \tau H_{avg}^A}{T H^A} \quad (11)$$

پس متوسط مصرف انرژی، مستقل از چگالی گره‌ها در شبکه است. در پروتکل پیشنهادی اگر رویدادی در لایه m آغاز شود، قبل از رسیدن به سینک، از گره‌های میانی $n - n_0 + 1$ عبور می‌کند. مساحت لایه m برابر $\pi(2n-1)(\alpha R)^2$ از اینرو احتمال وقوع یک واقعه در این لایه برابر است با: $(2n-1)(\alpha R/L)^2$ پس متوسط تعداد گره میانی برابر است با:

مناسبتی فراهم شود. پارامتر σ ، دوره خواب گره‌ها را مشخص کرده تا یک گزارش واقعه بصورت پیوسته و کامل ارسال شود. این محدودیت در بدترین حالت تقریباً برابر است با:

$$P\left(\sum_{k=1}^H \tau_k \leq \tau\right) \geq 1 - \Phi \quad (2)$$

که τ تاخیر گزارش رویداد، τ_k تاخیر در گره میانی k ، H حداکثر گره میانی و Φ خطای احتمالی تاخیر می‌باشند.

تاخیر برای گزارش یک رویداد در گره میانی k شامل انتظار گره فرستنده قبل از ارسال به مدت $t_r + t_l + t_g$ و انتظار پیغام‌های درخواست، پاسخ، تایید و داده است. اما اگر گره تازه از حالت خواب بیدار شده باشد، یک زمان t_{sleep} داشته و قبل از ارسال پیغام درخواست نیز باید به مدت t_b نیز منتظر بماند؛ پس داریم:

$$\tau_k = t_r + t_g + t_l + t_b + t_p + t_{sleep} \quad (3)$$

که $t_p = t_{RTR} + t_{CTR} + t_{ACK} + t_{DATA}$ اما چون t_{sleep} از همه این زمان‌ها بزرگ‌تر است، بنابراین در معادله (۲) داریم:

$$P\left(\sum_{k=1}^H t_{sleep}^{(k)} \leq \tau\right) \geq 1 - \Phi \quad (4)$$

که H^A حداکثر تعداد گره میانی تحت شرایط پروتکل پیشنهادی است و از روی شکل شبکه تعیین شده و برابر $n_0 + 1 - \lceil L/\alpha R \rceil$ است. می‌دانیم حداقل تعداد گره موجود، جهت انتقال داده، $\lambda \vartheta(\alpha)$ است اما چون گره‌ها بطور متناوب و مستقل بخواب می‌روند، در بدترین حالت همه گره‌های میانی خواب بوده و گره مبدا باید منتظر اولین گره بیدار باشد. چون زمان خواب همه گره‌ها بطور نمایی و با پارامتر σ توزیع شده است پس فرستنده باید یک زمان تصادفی t_{sleep} منتظر بماند؛ که مجموع تاخیر همه گره‌های میانی برابر است با:

$$\tau_{sleep} = \sum_{k=1}^H t_{sleep}^{(k)} \quad (5)$$

اکنون با افزایش گره‌های میانی و تقریب τ_{sleep} و بوسیله یک متغیر تصادفی گاوس، میانه و انحراف معیار برابر است با: $m = H^A / \sigma^A = o(H^A)$ و $S = (H^A)^{1/2} / \sigma^A = o(H^A)$ و افزایش می‌دهد، پس t_{sleep} باید کوچکتر یا مساوی تاخیر τ باشد؛ بنابراین حتی اگر تعداد گره‌های میانی تقریباً ۱۰ عدد باشند، می‌توان گزارش واقعه را با موفقیت و پیوسته ارسال کرد. پس یک تقریب مهندسی قابل قبول برای مقادیر σ برابر است با:

$$\sigma \leq \frac{H^A}{\lambda \tau \vartheta(\alpha)} \quad (6)$$

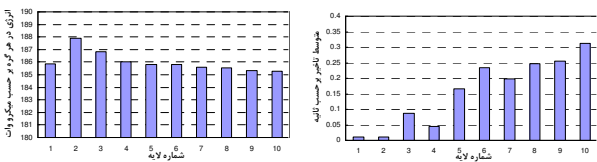
۶- ارزیابی کارایی پروتکل پیشنهادی

برای ارزیابی عملکرد پروتکل پیشنهادی، همراه پروتکل S-MAC، از یک پروتکل مسیریابی بهینه که هیچ نوع سرباری ندارد و بسته‌ها را با استفاده از کمترین گره میانی، بسوی سینک ارسال می‌کند، استفاده

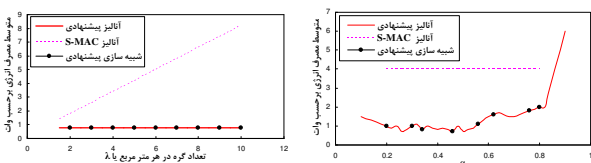
نمودارهای ۳ و ۴ و ۵ و ۶ به ترتیب تاثیر پارامترهای α و λ و T و τ را بر متوسط مصرف انرژی، در پروتکل‌های پیشنهادی و S-MAC نشان می‌دهند. نقاطی که با * نشان داده شده است بیانگر میانگین حداکثر و حداقل ده هزار بار اجرای شبیه‌سازی است.

۷- نتیجه گیری :

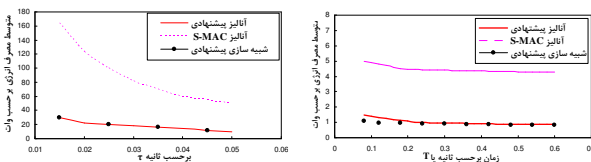
در این مقاله ما از یک پروتکل پیشنهادی مسیریابی برای کشف رخداد و گزارش آن در شبکه حسگر بی‌سیم استفاده کردیم. آدرس‌دهی گره‌ها بصورت تصادفی بوده و با ایجاد یک حالت حفظ انرژی، انرژی مصرفی ناشی از استماع بلا استفاده را برای گزارش واقعه، کاهش دادیم. عملکرد این پروتکل نسبت به پروتکل S-MAC در جنبه کشف و کاهش تاخیر در گزارش رویداد و مصرف انرژی کمتر، بهتر بوده زیرا S-MAC یک پروتکل کلی است و برای این دسته کاربردها بهینه‌سازی نشده است. کار در آینده این مقاله می‌تواند شامل موارد زیر شود: بیش از یک گره، یک واقعه را کشف کند؛ ایجاد قانونی برای کنترل ترافیک در پروتکل و وضعیتی که کانال مشغول باشد.



نمودار ۱: متوسط تاخیر گزارش رویداد و انرژی برای هر لایه



نمودار ۳ و ۴: تاثیر پارامتر α و λ بر متوسط مصرف انرژی



نمودار ۵ و ۶: تاثیر پارامتر T و τ بر متوسط مصرف انرژی

مراجعه

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *Comput. Netw.*, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, "A taxonomy of wireless microsensor network models," *ACM Mobile Comput. Commun. Rev.*, vol. 6, no. 2, Apr. 2002.
- [3] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2002, pp. 1567-1576.
- [4] E. Shih, S.-H. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, and A. Chandrakasan, "Physical layer driven algorithm and protocol design for energy-efficient wireless sensor networks," in *Proc. MOBICOM*, Rome, Italy, 2001, pp. 272-287.

$$H_{avg}^A = \frac{[L/\alpha R]^{-1} - 1}{\sum_{n=n_0}^{\infty} (n-n_0+1)(2n-1)} \left(\frac{\alpha R}{L}\right)^2 + \quad (12)$$

$$H^A \left(1 - \left[\frac{L}{\alpha R}\right]^{-1}\right)^2 \left(\frac{\alpha R}{L}\right)^2$$

با جایگذاری H^A و H_{avg}^A در (۱۱) می‌توان متوسط مصرف انرژی را در پروتکل پیشنهادی محاسبه کرد.

در پروتکل S-MAC گره‌هایی که بطور همزمان و مستقل خوابیده و بیدار می‌شوند، دسته‌های مجازی تشکیل داده، که اگر مدت زمان خواب و بیدار آنها t_{sw} باشد و تعداد پیغام‌های ردوبدل شده در پروتکل مسیریابی، حداقل باشد و حداکثر تاخیر فرمول (۲) را داشته باشیم، بعلاوه تاخیر متناوب طولانی τ ، مهمترین تأخیر، سیکل‌های خواب و بیدار گره‌های میانی بوده که معادله آن مشابه معادله (۴) است:

$$P\left(\sum_{k=1}^H t_{sleep}^{S-MAC} \leq \tau\right) \geq 1 - \Phi \quad (13)$$

که t_{sleep}^{S-MAC} تاخیر ایجاد شده توسط سیکل‌های خواب و بیدار گره-های میانی بوده و این تأخیر بطور یکنواخت بین صفر و T_{sw} توزیع شده است [3] که تقریباً برابر است با:

$$T_{sw} \geq \frac{2\tau}{HS} \quad (14)$$

که H^S حداکثر گره میانی لازم در الگوریتم مسیریابی و S-MAC بوده و حداقل است و برابر است با همه گره‌های میانی بجز سینک که همواره بیدار است؛ یعنی: $H^S = \left[\frac{L}{R}\right] - 1$ بنابراین متوسط مصرف انرژی در هر گره میانی برابر است با:

$$E_{hop}^S = t_p P_{tr} + \left(\frac{T_{sw}}{2} + t_p\right) P_{on} + t_p P_{on} \quad (15)$$

در [4] مقادیر زمان انتظار و پارامترهای گره‌های حسگر پروتکل MAC موجود بوده که براساس خصوصیات فیزیکی گره‌های حسگر میکرو امپیر بوده که برای انتقال یک مگا بیت داده در هر ثانیه طراحی شده‌اند.

در شبیه‌سازی فرض می‌کنیم همه انتقال‌ها بدون برخورد و خطا بوده و احتمال وقوع رخداد در همه جای ناحیه یکسان بوده و از یک توزیع نمایی پیروی می‌کند. هر جا لازم باشد α را ۰/۵ گرفته و مقدار σ را می‌توان از فرمول تقریبی (۶) یا استفاده از کمترین ناحیه اشتراک $\mathcal{A}(\alpha)$ و یا از تعداد گره‌های میانی H^A محاسبه کرد.

نمودار ۱، متوسط تاخیر گزارش رویداد را در هر لایه نشان می‌دهد؛ این تاخیر در پروتکل پیشنهادی همواره کمتر از ۰/۶ ثانیه است.

نمودار ۲ مصرف متوسط انرژی گره‌ها را در هر لایه نشان می‌دهد که این مقدار از شماره لایه‌ها مستقل است زیرا تعداد تکرار خواب و بیدار شدن، برای همه لایه‌ها یکسان بوده و انرژی لازم برای روشن و خاموش کردن رادیو و روشن نگه داشتن آن در طی زمان t_{on} خیلی کمتر از انرژی لازم برای انتقال و دریافت پیغام، است.