

LABER: یک پروتکل مسیریابی آگاه از انرژی مبتنی بر اتوماتاهای یادگیر برای شبکه‌های حسگر

سید محمد ابوالحسنی، محمدرضا میبدی و مهدی اثنی عشری

آزمایشگاه محاسبات نرم، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

E-mail:(sm_abolhasani, mmeybodi, esnaashari)@aut.ac.ir

چکیده - یک رویکرد برای طولانی کردن طول عمر شبکه‌های حسگر، متوازن نمودن مصرف انرژی در گره‌های شبکه می‌باشد. این کار می‌تواند با انتخاب مسیرهای مناسب برای ارسال اطلاعات حاصل شود. در این مقاله یک پروتکل آگاه از انرژی به نام LABER که از اتوماتاهای یادگیر برای یافتن مسیرهای مناسب برای ارسال بسته‌های داده با هدف متوازن کردن مصرف انرژی در بین گره‌ها استفاده می‌کند پیشنهاد می‌گردد. برای ارزیابی کارایی پروتکل پیشنهادی، این پروتکل با استفاده از نرم‌افزار NS2 شبیه‌سازی شده و سپس نتایج بدست آمده با نتایج دیگر پروتکل‌ها مقایسه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که پروتکل پیشنهادی از نظر مصرف متوازن انرژی بین گره‌ها و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه از عملکرد بهتری در مقایسه با پروتکل‌های دیگر برخوردار است.

کلید واژه- شبکه‌های حسگر، مسیریابی آگاه از انرژی، اتوماتاهای یادگیر

۱- مقدمه

بیشتر محققان به ارائه مسیریابی آگاه از انرژی به منظور طولانی کردن طول عمر شبکه است [16-8]. هر یک از این پروتکل‌ها با در نظر گرفتن معیاری سعی در ارائه پروتکلی آگاه از انرژی داشته‌اند. از جمله معیارهایی که مورد استفاده قرار گرفته‌اند می‌توان به کوتاه‌ترین فاصله و حداقل مصرف انرژی اشاره کرد.

پروتکل مسیریابی EAR^۱ [15] یکی از مهمترین پروتکل‌های مسیریابی آگاه از انرژی در شبکه‌های حسگر می‌باشد. EAR با استفاده از پیغام‌های درخواست و انتشار محلی، تمامی مسیرهای ممکن به مقصد را به دست می‌آورد و این مسیرها را در جدول مسیریابی گره‌ها قرار می‌دهد. هر گره، با توجه به انرژی مصرفی و فاصله گره بعدی (در مسیر مورد نظر)، به هریک از مسیرهای خود احتمالی را نسبت می‌دهد. در زمان ارسال داده توسط یک گره، آن گره بر اساس احتمالات منتسب شده به مسیرها یک مسیر را

شبکه‌های حسگر که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند از تعداد زیادی گره حسگر کوچک، ارزان قیمت با قابلیت و قدرت پایین تشکیل شده‌اند. این حسگرها می‌توانند اطلاعاتی را از محیط اطراف خود دریافت کرده و برای حسگرهای همسایه ارسال دارند [1,2]. شبکه‌های حسگر می‌توانند در کاربردهایی مانند نظارت هوشمند بر بزرگراه‌ها، امداد رسانی در حوادث غیرمترقبه، دیده‌بانی محیط و پیگیری هدف [3,4] بکار گرفته شوند.

ویژگی‌های خاص این شبکه‌ها استفاده از پروتکل‌های مسیریابی مرسوم در شبکه‌های مودمی و یا سلولی را در آنها دچار مشکل می‌سازد. لزوم آگاه بودن از انرژی، طول عمر زیاد، تحمل پذیر بودن در برابر خطا و مقیاس پذیری در شبکه‌های حسگر، از مهمترین عواملی است که باید در طراحی پروتکل، برای آنها مدنظر قرار گیرند [5]. تحقیقات اخیر در مورد مسیریابی شبکه‌های حسگر، نشان‌دهنده توجه

^۱ Energy Aware Routing

انتخاب کرده و بسته داده را از طریق آن مسیر به طرف گره مقصد هدایت می‌کند. با این کار به جای استفاده از یک مسیر خاص برای ارسال بسته‌های داده، از چندین مسیر برای ارسال استفاده می‌شود و از این طریق طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. پروتکل PGR^2 [16] پروتکلی است که با استفاده از اطلاعات موقعیتی و انرژی گره‌ها، مسیری مناسب به سمت مقصد ایجاد می‌کند. در PGR فرض می‌شود هر گره، موقعیت مقصد را می‌شناسد. در ابتدا گره‌های همسایه، اطلاعات خود را با یکدیگر ردوبدل می‌کنند که از این طریق هر گره لیستی از همسایگان، موقعیت آنها و نیز قدرت ارتباطی با آنها را بدست می‌آورد. برای ارسال اطلاعات به مقصد، گره مبدأ لیست همسایگانی را که در زاویه θ نسبت به خود و مقصد قرار می‌گیرند تعیین می‌کند. پس از مشخص شدن این همسایگان بر اساس میزان انرژی و قابلیت گره‌ها، به هر یک از گره‌ها احتمالی نسبت داده می‌شود. سپس گره مبدأ بر اساس احتمالات منتسب شده، یک گره را برای ارسال بسته داده انتخاب می‌کند. گره انتخاب شده نیز بر همین اساس، همسایه بعدی را برمی‌گزیند، این فرایند تا زمانی که بسته به مقصد نهائی خود برسد ادامه پیدا می‌کند.

اخیراً تعدادی پروتکل مبتنی بر اتوماتاهای یادگیر برای شبکه‌های حسگر پیشنهاد گردیده است. در [17] با استفاده از اتوماتاهای یادگیر مکانیزمی برای بیدار و خواب کردن گره‌ها به منظور حفظ کیفیت سرویس ارایه گردیده است. در [18] پروتکل $LACA^3$ برای خوشه‌بندی گره‌ها و در [19] پروتکلی برای چندپخشی متحرک در شبکه‌های حسگر ارائه شده است.

یکی از رویکردها برای طولانی کردن طول عمر شبکه‌های حسگر متوازن نمودن مصرف انرژی در گره‌های شبکه می‌باشد. این کار می‌تواند با انتخاب مسیرهای مناسب برای ارسال اطلاعات حاصل شود. انتخاب مسیری با انرژی پایین برای ارسال اطلاعات ممکن است باعث شود که انرژی گره‌های آن مسیر تخلیه شده و گره‌ها در طول آن مسیر بمیرند که نتیجه آن پایان یافتن عمر شبکه خواهد بود. تعاریف مختلفی برای طول عمر یک شبکه حسگر وجود دارد که برخی از مهم‌ترین آنها عبارتند از: بازه‌ی زمانی از

ابتدای شروع فعالیت شبکه تا زمانی که (۱) شبکه بدلیل اتمام انرژی یک یا چند گره به شبکه‌ای غیر متصل تبدیل شود، (۲) انرژی درصد مشخصی از گره‌ها به اتمام رسد، (۳) انرژی اولین گره در شبکه به اتمام رسد. در این مقاله از تعریف سوم استفاده شده است.

در این مقاله یک پروتکل آگاه از انرژی به نام $LABER^4$ که از اتوماتاهای یادگیر برای یافتن مسیرهای مناسب برای ارسال بسته‌های داده به منظور متوازن کردن مصرف انرژی در بین گره‌ها و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه استفاده می‌کند پیشنهاد می‌گردد. در این پروتکل، گره‌ها با استفاده از انتشار کلی که توسط گره مقصد انجام می‌شود، اقدام به ایجاد جداول مسیریابی خود می‌کنند. هرگاه گره‌ای بسته‌ای برای فرستادن داشته باشد با استفاده از اتوماتای یادگیر خود مسیری را از بین مسیرهای ممکن انتخاب کرده و بسته را در طول این مسیر به مقصد ارسال می‌کند. در صورتی که مسیر انتخاب شده با توجه به معیارهای مورد نظر مسیر مناسبی باشد، عمل انتخاب شده توسط اتوماتای یادگیر پاداش داده می‌شود و در نتیجه احتمال انتخاب این مسیر برای مراحل بعدی افزایش می‌یابد. در غیر این صورت عمل انتخاب شده توسط اتوماتای یادگیر جریمه و در نتیجه احتمال انتخاب این مسیر کاهش می‌یابد.

برای ارزیابی کارایی پروتکل پیشنهادی، این پروتکل با استفاده از نرم‌افزار $NS2$ [7] شبیه‌سازی شده و سپس نتایج بدست آمده با نتایج دیگر پروتکل‌ها مقایسه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که پروتکل پیشنهادی با مصرف متوازن انرژی بین گره‌ها طول عمر بالاتری را در مقایسه با پروتکل‌های دیگر برای شبکه فراهم می‌نماید.

ادامه این مقاله بدین صورت سازماندهی شده است. در بخش ۲ اتوماتاهای یادگیر به اختصار شرح داده شده است. بخش ۳ پروتکل $TinyLAP$ که اساس پروتکل پیشنهادی می‌باشد توضیح داده می‌شود. در بخش ۴ پروتکل پیشنهادی ارایه می‌گردد. بخش ۵ به ارائه نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه پروتکل پیشنهادی با دیگر پروتکل‌ها اختصاص دارد. بخش ۶ نتیجه‌گیری می‌باشد.

² Probabilistic Geographic Routing

³ Learning Automata-based Clustering Algorithm

⁴ Learning Automata-Based Energy-aware Routing

۲- اتوماتاهای یادگیر

خروجی بعدی می‌نگارد.

اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر را می‌توان توسط چهارتایی $\{\alpha, \beta, p, T\}$ نشان داد که $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$ مجموعه عمل‌ها، $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_m\}$ مجموعه ورودی‌ها، $p = \{p_1, \dots, p_r\}$ بردار احتمال انتخاب هریک از عمل‌ها و $p(n+1) = T[\alpha(n), \beta(n), p(n)]$ الگوریتم یادگیری اتوماتا می‌باشد. الگوریتم زیر یک نمونه از الگوریتم‌های یادگیری خطی است. فرض کنید عمل α_i در مرحله n ام انتخاب شود.

پاسخ مطلوب

$$\begin{aligned} p_i(n+1) &= p_i(n) + a[1 - p_i(n)] \\ p_j(n+1) &= (1-a)p_j(n) \quad \forall j \neq i \end{aligned} \quad (1)$$

پاسخ نامطلوب

$$\begin{aligned} p_i(n+1) &= (1-b)p_i(n) \\ p_j(n+1) &= (b/r-1) + (1-b)p_j(n) \quad \forall j \neq i \end{aligned} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، a پارامتر پاداش و b پارامتر جریمه می‌باشد. با توجه به مقادیر a و b سه حالت زیر را می‌توان در نظر گرفت. زمانی که a و b با هم برابر باشند، الگوریتم را L_{RP} می‌نامند، زمانی که b از a خیلی کوچکتر باشد، الگوریتم را L_{REP} می‌نامند و زمانی که b مساوی صفر باشد الگوریتم را L_{RI} می‌نامند [22].

۳- پروتکل TinyLAP

در این بخش پروتکل TinyLAP [6] که اساس پروتکل پیشنهادی می‌باشد به اختصار شرح داده می‌شود. در پروتکل TinyLAP به هر گره در شبکه یک اتوماتای یادگیر تخصیص داده شده است که از آن برای انتخاب مسیری متناسب با شرایط شبکه برای ارسال اطلاعات استفاده می‌شود. پروتکل TinyLAP شامل دو مرحله انتشار و مسیریابی است. مرحله انتشار را گره‌ای که داده‌ای برای ارسال دارد آغاز می‌کند. گره مورد نظر یک بسته به نام FLOOD را ایجاد کرده و آن را به همسایه‌هایش ارسال می‌کند. همسایه‌ها نیز با دریافت این بسته آن را به همسایه‌هایشان ارسال می‌کنند. گره مقصد هرگاه بسته FLOOD را دریافت کرد، بسته‌ای به نام FEEDBACK را ایجاد کرده و در شبکه منتشر می‌کند. گره‌های دیگر در قبال دریافت بسته FEEDBACK و اطلاعات همراه آن، مسیر ایجاد شده را به جدول مسیریابی خود اضافه کرده و

یک اتوماتای یادگیر [20,21]، ماشینی است که می‌تواند تعدادی متنای عمل را انجام دهد. هر عمل انتخاب شده توسط یک محیط احتمالی ارزیابی می‌شود و نتیجه ارزیابی در قالب سیگنالی مثبت یا منفی به اتوماتا داده می‌شود و اتوماتا از این پاسخ در انتخاب عمل بعدی تاثیر می‌گیرد. هدف نهایی این است که اتوماتا یاد بگیرد تا از بین اعمال خود بهترین عمل را انتخاب کند. بهترین عمل، عملی است که احتمال دریافت پاداش از محیط را به حداکثر برساند. کارکرد اتوماتای یادگیر در تعامل با محیط، در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱: ارتباط بین اتوماتای یادگیر و محیط

محیط را می‌توان توسط سه تایی $E \equiv \{\alpha, \beta, c\}$ نشان داد که در آن $\alpha \equiv \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r\}$ مجموعه ورودی‌ها، $\beta \equiv \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$ مجموعه خروجی‌ها و $c \equiv \{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ مجموعه احتمال‌های جریمه می‌باشد. هرگاه β مجموعه دو عضوی باشد، محیط از نوع P می‌باشد. در چنین محیطی $\beta_1 = 1$ به عنوان جریمه و $\beta_2 = 0$ به عنوان پاداش در نظر گرفته می‌شود. در محیط از نوع Q، $\beta(n)$ می‌تواند به طور گسسته، یک مقدار از مقادیر محدود در فاصله $[0, 1]$ و در محیط از نوع S، $\beta(n)$ متغیر تصادفی در فاصله $[0, 1]$ است. c_i احتمال اینکه عمل α_i نتیجه نامطلوب داشته باشد می‌باشد. در محیط ایستا مقادیر c_i بدون تغییر می‌مانند، حال آنکه در محیط غیر ایستا این مقادیر در طی زمان تغییر می‌کنند.

اتوماتای یادگیر با ساختار ثابت توسط پنج تایی $\{\alpha, \beta, F, G, \phi\}$ نشان داده می‌شود که در آن $\alpha \equiv \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r\}$ مجموعه عمل‌ها، $\beta \equiv \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$ مجموعه ورودی‌ها، $\phi \equiv \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_s\}$ مجموعه وضعیت‌های داخلی، $F: \phi \times \beta \rightarrow \phi$ تابع تولید وضعیت جدید و $G: \phi \rightarrow \alpha$ تابع خروجی اتوماتا می‌باشد که وضعیت کنونی اتوماتا را به

بسته را در شبکه منتشر می‌کنند. با رسیدن بسته FEEDBACK به تمامی گره‌های شبکه، این مرحله به اتمام می‌رسد. در پایان این مرحله هر گره دارای چندین مسیر به مقصد است. هر گره برای هر مسیر، احتمالی بر طبق رابطه (۳) محاسبه می‌کند. در این رابطه h_i تعداد گام‌ها تا مقصد برای مسیر i ام و ng تعداد مسیرها در جدول مسیریابی است. هر گره، یک اتوماتای یادگیر با تعداد اعمال برابر با تعداد مسیرها به مقصد ایجاد می‌کند و احتمال هر عمل، برابر با احتمال انتخاب مسیر متناظر با آن عمل در جدول مسیریابی قرار می‌گیرد. در واقع عمل‌ها تناظر یک به یک با مسیرها دارند.

$$P(i) = 1 - \frac{h_i}{\sum_{j=1}^{ng} h_j} \quad (3)$$

مرحله مسیریابی و یادگیری زمانی آغاز می‌شود که گره منبع بسته FEEDBACK را دریافت کند. گره منبع، مسیری که دارای حداکثر احتمال است را انتخاب می‌کند و بسته‌های داده را از طریق این مسیر به گره مورد نظر می‌فرستد. گره‌های میانی نیز این کار را ادامه داده تا بسته داده به گره مقصد برسد. گره‌ها بعد از فرستادن بسته داده، منتظر پاسخ می‌مانند. در صورت دریافت پاسخ مثبت از محیط، مسیر مورد نظر پاداش داده می‌شود. پروتکل TinyLAP از بسته warn استفاده می‌کند. گره، بسته warn را زمانی می‌فرستد که میزان انرژی آن کمتر از ۷۵٪ انرژی زمانی باشد که آخرین بسته warn را فرستاده است. (برای بار اول انرژی اولیه را مدنظر قرار می‌دهد). گره‌های دیگر در صورت دریافت بسته warn از گره مورد نظر و در صورت داشتن مسیر به آن گره، آن مسیر را با استفاده از اتوماتای یادگیرشان جریمه می‌کنند.

پروتکل TinyLAP دارای اشکالاتی می‌باشد: (۱) بر خلاف ادعای طراحان این پروتکل، آنچه آنها اتوماتای یادگیر نامیده‌اند اتوماتای یادگیر نمی‌باشد. آنها برای انتخاب عمل (مسیر) توسط اتوماتای یادگیر بجای نمونه‌گیری، با استفاده از بردار احتمالات اعمال (مسیرها) عملی (مسیری) که دارای بیشترین احتمال انتخاب می‌باشد را انتخاب می‌کنند، (۲) در پروتکل TinyLAP برای گره‌هایی که بیش از دو مسیر به مقصد دارند جمع احتمالات این مسیرها بیشتر از یک می‌شود، (۳) این پروتکل از بسته warn برای تنظیم مصرف

انرژی استفاده کرده است که این کار را می‌توان با همان بسته پاسخ انجام داد، همچنین نحوه انتشار بسته warn به گونه‌ای است که در اواخر عمر یک گره، این بسته بارها منتشر می‌شود که این خود از عوامل مهم مصرف انرژی می‌شود. پروتکل پیشنهادی که در بخش بعدی آمده این مشکلات را برطرف می‌نماید.

۴- پروتکل پیشنهادی (LABER)

هدف از این پروتکل ایجاد توازن در مصرف انرژی در گره‌های شبکه به منظور بالا بردن طول عمر شبکه می‌باشد. این کار با استفاده از اتوماتاهای یادگیر انجام می‌شود. بطور کلی پروتکل LABER به این صورت عمل می‌کند که هر گره در هر زمان با استفاده از اتوماتای یادگیر خود از بین مسیرهای مختلف یک مسیر را انتخاب می‌کند؛ در صورتی که مسیر انتخابی، مسیر مناسبی باشد به آن مسیر پاداش می‌دهد و در غیر این صورت آن مسیر را جریمه می‌کند. منظور از جریمه و پاداش دادن به مسیرها، کم و زیاد کردن احتمال انتخاب آنها می‌باشد. الگوریتم ارائه شده در شکل ۲ مراحل کلی پروتکل LABER را نشان می‌دهد.

```
Each node for(∞)
{
  If Generate (DATA packet)
    Select one Path // with the aid of Learning Automata
    Transmit(DATA packet) on the selected path
    Wait for ACK
  If received(DATA packet)
    Transmit(ACK packet) to sender node
    If not Destination
      Select one Path // with the aid of Learning Automata
      Transmit(DATA packet) on path
      Wait for ACK
  If received(ACK packet)
    If ACK == "reward" then // a good path
      Reward the path
    If ACK == "Penalty" then // a bad path
      Penalize the path
}
```

شکل ۲: شبه کد پروتکل LABER

پروتکل LABER شامل دو مرحله "ایجاد جداول مسیریابی" و "مسیریابی و یادگیری" می‌باشد. در مرحله ایجاد جداول، جدول مسیریابی هر یک از گره‌ها ایجاد می‌شود. در مرحله مسیریابی و یادگیری منبع شروع به ارسال داده می‌کند و بر اساس پاسخی که از محیط دریافت می‌گردد، جداول گره‌ها به‌روز می‌شوند. این پروتکل از سه بسته به نام‌های DATA، FLOOD و ACK استفاده می‌کند. بسته

FLOOD تنها در مرحله ایجاد جداول استفاده می‌شود. بسته‌های DATA و ACK در مرحله دوم پروتکل استفاده می‌شوند که به ترتیب نشان دهنده بسته داده و جواب بسته داده است. جداول مسیریابی شامل چهار فیلد شماره گره بعدی، احتمال انتخاب، میزان انرژی گره بعد و تعداد گام‌ها تا مقصد هستند. در این پروتکل هر گره دارای یک اتوماتای یادگیر با تعداد عمل‌های برابر با تعداد مسیرهای آن گره به مقصد است که پروتکل از آن برای انتخاب مسیر مناسب به منظور مصرف متوازن انرژی استفاده می‌کند. در ادامه جزئیات این دو مرحله شرح داده می‌شود.

۴-۱- ایجاد جداول مسیریابی

این مرحله توسط گره مقصد آغاز می‌شود. این گره بسته FLOOD را ایجاد کرده و آن را در شبکه منتشر می‌کند تا همه همسایه‌های این بسته را دریافت کنند. این بسته شامل سه فیلد شماره گره فرستنده، تعداد گام‌ها و سطح انرژی گره فرستنده است. گره مقصد قبل از انتشار بسته FLOOD فیلدهای آن را مقداردهی می‌کند. مقداردهی فیلدهای بسته FLOOD به این صورت است که شماره گره فرستنده را برابر شماره خود (گره مقصد)، تعداد گام‌ها را برابر صفر و سطح انرژی را برابر سطح انرژی خود (گره مقصد) قرار می‌دهد.

گره‌های دیگر در صورت دریافت بسته‌های FLOOD اقدام به ایجاد جداول مسیریابی به شرح زیر می‌کنند:

- اگر گره‌ای تنها یک بسته FLOOD دریافت کند، اطلاعات بسته دریافتی را به عنوان یک رکورد از جدول مسیریابی خود اضافه می‌کند و احتمال انتخاب مسیر را برابر یک قرار می‌دهد.
- اگر گره‌ای بیش از یک بسته FLOOD دریافت کند، اطلاعات تمامی بسته‌های دریافتی را در جدول مسیریابی خود وارد می‌کند (هر رکورد برای یک مسیر). احتمال انتخاب هر یک از این مسیرها بر اساس رابطه (۴) تعیین می‌شود.

$$\forall i \leq m \quad P_i = h \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{numhop_i}} + (1-h) \frac{energylevel_i}{\sum_{i=1}^m energylevel_i} \quad (4)$$

در این رابطه، i شماره بسته دریافت شده، $numhop_i$ تعداد

گام‌ها برای بسته i ام، $energylevel_i$ میزان انرژی گره فرستنده بسته i ام و m تعداد بسته‌های دریافتی می‌باشد. h مقداری ثابت است که عددی بین صفر و یک می‌باشد. این پارامتر نشان دهنده نسبت تاثیر تعداد گام‌ها به میزان انرژی گره‌ای که انتخاب می‌شود می‌باشد. هر چه این پارامتر به یک نزدیکتر باشد، تاثیر تعداد گام‌ها و هر چه به صفر نزدیکتر باشد، تاثیر انرژی بر احتمال اولیه انتخاب مسیر بیشتر خواهد بود.

بعد از ایجاد جدول، گره دریافت کننده، فیلدهای بسته FLOOD را مقداردهی کرده و آن را در شبکه منتشر می‌کند. مقدار دهی به این صورت است که شماره خود را به عنوان گره فرستنده معرفی می‌کند و سطح انرژی‌اش را در فیلد مورد نظر قرار می‌دهد. برای مقدار دهی تعداد گام‌ها، یک واحد به تعداد گام‌های مسیری که کمترین تعداد گام را دارد افزوده و آن را در فیلد مورد نظر قرار می‌دهد.

هر گره با توجه به جدول مسیریابی خود یک اتوماتای یادگیر که تعداد عمل‌هایش برابر تعداد مسیرهای جدول مسیریابی گره مورد نظر است ایجاد می‌کند. در واقع بین عمل‌های اتوماتای یادگیر و مسیرهای جدول مسیریابی یک تناظر یک به یک وجود دارد. احتمال انتخاب هر عمل برابر با احتمال مسیر متناظر در جدول می‌باشد. هرگاه اتوماتای یادگیر یک گره عملی را انتخاب می‌کند، مسیر متناظر با آن عمل برای ارسال بسته مورد نظر به مقصد انتخاب می‌شود. اگر عمل (مسیر) انتخاب شده مناسب باشد، احتمال انتخاب آن بر طبق الگوریتم یادگیری افزایش می‌یابد. اگر عمل (مسیر) انتخاب شده مناسب نباشد، احتمال انتخاب آن بر طبق الگوریتم یادگیری کاهش می‌یابد.

در پایان این مرحله هر گره دارای یک اتوماتای یادگیر و جدول مسیریابی می‌باشد که از آنها برای هدایت بسته DATA به سمت مقصد استفاده خواهد نمود.

۴-۲- مرحله مسیریابی و یادگیری

این مرحله را هر گره‌ای که بسته‌ای برای ارسال داشته باشد آغاز می‌کند. در این مرحله، گره منبع شروع به ارسال بسته‌های DATA بر اساس جدول مسیریابی‌اش می‌کند. گره با توجه به اتوماتای یادگیر خود یک مسیر را برای فرستادن بسته DATA، انتخاب می‌کند. بسته DATA

علاوه بر داده مورد نظر، شامل فیلدهای منبع اولیه، مقصد نهایی و منبع فرستنده است. گره منبع، فیلدهای بسته DATA را مقداردهی کرده، و سپس بسته را روی مسیر انتخاب شده می‌فرستد.

گره‌های میانی که بسته DATA را دریافت می‌کنند آن بسته را با استفاده از اتوماتای یادگیر و جدول مسیریابی‌شان به سمت گره مقصد هدایت می‌کنند. گره‌ها قبل از ارسال بسته، فیلد منبع فرستنده را برابر شماره خود قرار می‌دهند.

گره دریافت کننده بسته DATA، یک بسته ACK ایجاد کرده و آن را به گره‌ای که بسته DATA را از آن دریافت کرده، می‌فرستد. بسته ACK شامل دو فیلد گره فرستنده و سطح انرژی است. گره فرستنده بسته ACK، فیلدهای این بسته را به این صورت مقدار دهی می‌کند که شماره خود و سطح انرژی‌اش را به ترتیب برابر فیلدهای گره فرستنده و سطح انرژی قرار می‌دهد.

به منظور کاهش پیام‌های ردوبدل شده میان گره‌ها و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، پارامتر p معرفی می‌شود. هر گره با انتخاب هر مسیر، p بسته DATA را روی آن مسیر ارسال می‌دارد. همچنین، هر گره در صورت دریافت p بسته DATA، تنها یک بسته ACK به گره‌ای که بسته‌های DATA را از آن دریافت کرده می‌فرستد. این کار باعث کاهش تعداد بسته‌های ACK و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می‌شود.

هرگاه بسته ACK توسط گره فرستنده بسته DATA دریافت شد، اتوماتای یادگیر آن گره، عمل متناظر با آن مسیر را با توجه به اطلاعات دریافتی پاداش یا جریمه می‌کند. در نتیجه، احتمالات انتخاب مسیرها در جدول مسیریابی تغییر می‌یابد و به مرور زمان، احتمال انتخاب مسیر مناسب بیشتر می‌شود.

روش پاداش یا جریمه دادن عمل (مسیر) انتخاب شده به صورت زیر است:

هرگاه انرژی گره‌ای که بسته ACK از آن آمده:

- کمتر از ۵۰٪ از میانگین انرژی مسیرهای دیگر باشد، عمل (مسیر) انتخاب شده با پارامتر جریمه 3β جریمه می‌شود که β طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

- بیشتر از ۵۰٪ و کمتر از ۸۰٪ میانگین انرژی مسیرهای دیگر باشد، عمل (مسیر) انتخاب شده با استفاده از پارامتر جریمه (رابطه (۵)) جریمه می‌شود.

$$V_p = (1 + \frac{energylevel_i - 50}{30 \cdot avgenergy})\beta \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $avgenergy$ میانگین انرژی گره‌های اول مسیرهای دیگر و $energylevel_i$ سطح انرژی گره‌ای است که بسته ACK از آن آمده است و β توسط رابطه (۷) تعیین می‌شود.

- بیشتر از ۸۰٪ و کمتر از ۱۰۰٪ از میانگین انرژی مسیرهای دیگر باشد و تعداد گام‌های مسیر مورد نظر در بین دیگر مسیرها حداقل باشد، عمل (مسیر) مورد نظر با پارامتر α پاداش داده می‌شود. α توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

- بیشتر از میانگین انرژی گره‌های اول مسیرهای دیگر باشد که در این صورت عمل (مسیر) مورد نظر با پارامتر α پاداش می‌گیرد.

$$\alpha = \lambda_1 + \psi_1 \frac{\gamma * energylevel_i + (maxnumhop - numhop_i)}{\gamma * energylevel + maxnumhop} \quad (6)$$

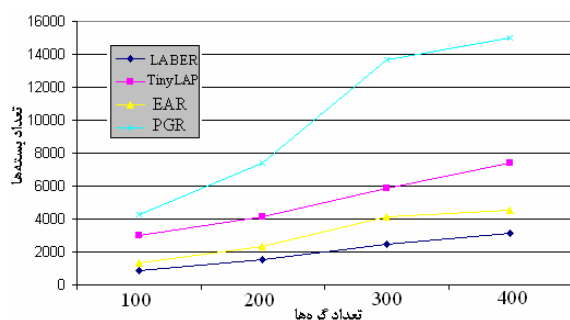
$$\beta = \lambda_2 + \psi_2 \frac{\gamma (avgenergy - energylevel_i) + numhop_i}{\gamma * avgenergy + maxnumhop} \quad (7)$$

در روابط (۶) و (۷)، $energylevel_i$ و $numhop_i$ به ترتیب سطح انرژی و تعداد گام‌های گره‌ای هستند که بسته ACK از آن آمده است، $energylevel$ انرژی آغازین گره مورد نظر، $maxnumhop$ بیشترین تعداد لینک از گره دریافت کننده بسته ACK به مقصد و $avgenergy$ میانگین انرژی گره‌های اول مسیرهای دیگر می‌باشد. λ_1 و λ_2 به ترتیب نشان دهنده حداقل مقدار قابل قبول برای پارامترهای پاداش و جریمه می‌باشند. با توجه به وجود اختلاف مقیاس میان تعداد گام‌ها ($numhop$) و میزان انرژی باقیمانده ($energylevel$)، پارامتر γ به گونه‌ای انتخاب می‌شود که این دو ترم در یک مقیاس تقریباً برابر قرار بگیرند. ψ_1 و ψ_2 به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که مقدار پارامترهای α و β از حد مشخصی بزرگتر نشود.

۵- نتایج شبیه‌سازی‌ها

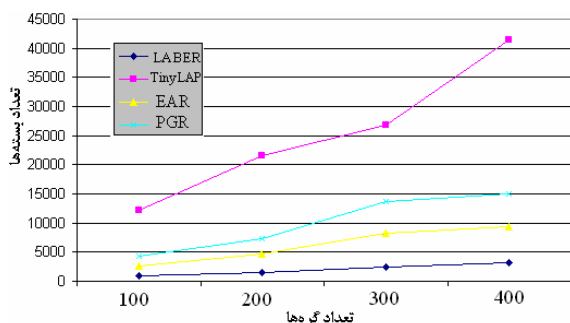
برای شبیه‌سازی محیط شبکه، از نرم‌افزار NS2 استفاده شده است. هر گره برای فرستادن هر نوع بسته‌ای ۶۶۰ mJ انرژی، و برای دریافت هر نوع بسته‌ای ۳۹۵ mJ انرژی

شبکه در محیط‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۳: تعداد دریافت‌ها و فرستادن‌های بسته‌های کنترلی در اوایل کار شبکه برای چهار پروتکل LABER, TinyLAP, EAR و PGR

تعداد دریافت‌ها و ارسال‌های بسته‌های کنترلی در اواخر عمر شبکه برای پروتکل TinyLAP بسیار زیاد می‌شود، زیرا بسته‌های WARN به شدت افزایش می‌یابد. تعداد دریافت‌ها و ارسال‌های بسته‌های کنترلی در پروتکل EAR به علت تکرار مرحله انتشار کلی در اواخر عمر شبکه بیشتر از اوایل کار شبکه خواهد بود. برای دو پروتکل LABER و PGR تغییری مشاهده نمی‌شود و دریافت‌ها و ارسال‌های بسته‌های کنترلی تنها در همان اوایل عمر شبکه انجام می‌شود. شکل ۴ نمایش دهنده تعداد دریافت‌ها و ارسال‌های بسته‌های کنترلی برای چهار پروتکل مورد نظر در اواخر عمر شبکه در محیط‌های مختلف است.



شکل ۴: تعداد دریافت‌ها و فرستادن‌های بسته‌های کنترلی در اواخر عمر شبکه برای چهار پروتکل LABER, TinyLAP, EAR و PGR

ضریب تغییرات که از تقسیم انحراف معیار بر میانگین به دست می‌آید یک پارامتر مناسب برای بررسی متوازن انرژی در گره‌ها می‌باشد. هر چه ضریب تغییرات انرژی باقیمانده گره‌ها کمتر باشد، نشان دهنده این نکته است که اختلاف انرژی گره‌ها نسبت به هم کمتر شده و یا به عبارت دیگر، مصرف انرژی گره‌ها متوازن‌تر بوده است. پروتکل‌های LABER و TinyLAP با استفاده از بسته‌های ACK و

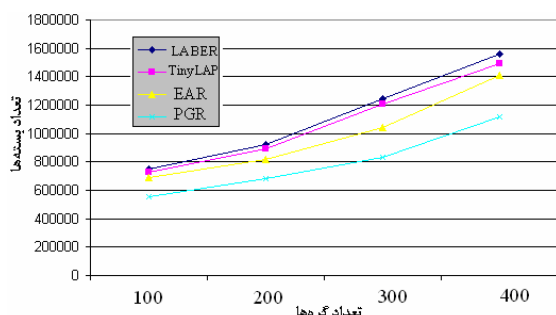
مصرف می‌کند تا شبیه‌سازی به محیط واقعی نزدیک باشد. پارامترهای λ_1 و λ_2 الگوریتم یادگیری برابر 0.1 در نظر گرفته شده است و پارامتر p ، برابر ۳ است. موقعیت گره‌ها در شبکه به صورت تصادفی تعیین می‌شود. شبیه‌سازی‌ها در چهار محیط به ابعاد $1500m \times 1500m$ با تعداد ۱۰۰ گره، $2000m \times 2000m$ با تعداد ۲۰۰ گره، $2500m \times 2500m$ با تعداد ۳۰۰ گره و $3000m \times 3000m$ با تعداد ۴۰۰ گره انجام شده است. هدف شبکه حسگر در این محیط جمع‌آوری تغییرات دما می‌باشد. گره‌های حسگر هرگاه تغییرات دمایی را احساس کردند، اطلاعات مربوط به آن را به سمت گره مقصد هدایت می‌کنند [3]. محدوده انتقال هر گره برابر $250m$ در نظر گرفته شده است.

پروتکل‌های LABER, TinyLAP, EAR و PGR در محیط تعریف شده شبیه‌سازی شده‌اند. این چهار پروتکل با توجه به تعداد ارسال‌ها و دریافت‌های بسته‌های کنترلی در اوایل و اواخر عمر شبکه، ضریب تغییرات انرژی باقیمانده گره‌ها در اواسط عمر شبکه و تعداد بسته‌های داده دریافت شده توسط گره مقصد در طول عمر شبکه، مورد بررسی قرار می‌گیرند. باید توجه داشت که برخلاف پروتکل‌های LABER و TinyLAP، پروتکل‌های EAR و PGR پروتکل‌هایی آگاه از موقعیت هستند.

تعداد پیغام‌های کنترلی در اوایل کار شبکه (دریافت حدود ۵۰,۰۰۰ بسته داده توسط مقصد از منابع) برای پروتکل LABER در مقایسه با پروتکل‌های دیگر کمتر است. این بدین خاطر است که پروتکل LABER تنها نیاز به انتشار اولیه که توسط بسته FLOOD انجام می‌شود دارد.

پروتکل EAR نیز تنها بسته کنترلی FLOOD را برای انتشار کلی دارد، اما به خاطر نوع فرستادن بسته‌های FLOOD، تعداد پیغام‌های کنترلی آن در مقایسه با پروتکل LABER افزایش می‌یابد. در این پروتکل، بسته FLOOD گره به گره و نه بر اساس انتشار کلی ارسال می‌شود. پروتکل TinyLAP علاوه بر بسته کنترلی FLOOD، بسته‌های کنترلی FEEDBACK و WARN را نیز در شبکه منتشر می‌کند. در پروتکل PGR بالا بودن پیغام‌های کنترلی به منظور احوالپرسی اولیه گره‌ها به منظور آگاهی از موقعیت و محاسبه قابلیت گره‌های همسایه می‌باشد. شکل ۳ تعداد پیغام‌های کنترلی چهار پروتکل مورد بررسی را، در اوایل کار

EAR، مقصد داده‌های بیشتری را در مقایسه با پروتکل PGR دریافت می‌کند که این به علت استفاده پروتکل EAR از تمامی مسیرهای ممکن بین منبع و مقصد می‌باشد، در حالی که در پروتکل PGR تنها مسیرهای نزدیکتر به مقصد مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۶: تعداد بسته‌های داده دریافت شده توسط گره مقصد توسط پروتکل‌های LABER، TinyLAP، EAR و PGR

تعداد بسته‌های داده دریافت شده توسط گره مقصد برای پروتکل LABER در مقایسه با پروتکل TinyLAP به علت ایجاد توازن در مصرف انرژی در بین گره‌های شبکه بیشتر می‌باشد. علاوه بر این، پروتکل TinyLAP در اواخر عمر شبکه بسته‌های warn زیادی ارسال و یا دریافت می‌کند که این خود موجب مصرف انرژی بیشتر در گره‌ها می‌شود. در حالی که پروتکل LABER از بسته warn استفاده نمی‌کند.

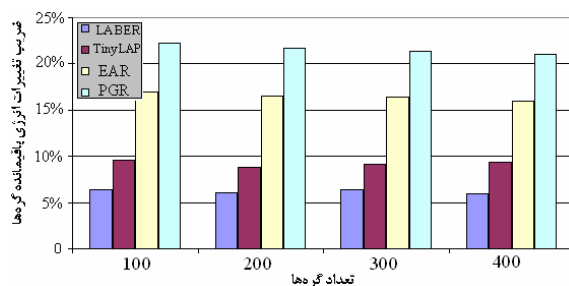
باید توجه داشت که در صورتی که چگالی گره‌ها در شبکه زیاد باشد، طول عمر پروتکل LABER بهتر از پروتکل‌های EAR و PGR نخواهد بود. علت این امر آن است که در پروتکل LABER، برای ارتباط دو گره از حداکثر محدوده انتقال هر گره استفاده می‌شود، در حالی که در پروتکل‌های EAR و PGR ارتباط دو گره متناسب با فاصله دو گره است.

۶- جمع‌بندی

در این مقاله یک پروتکل آگاه از انرژی به نام LABER که از اتوماتاهای یادگیر برای یافتن مسیرهای مناسب برای ارسال بسته‌های داده به منظور متوازن کردن مصرف انرژی در بین گره‌ها استفاده می‌کند، پیشنهاد گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که پروتکل پیشنهادی از نظر مصرف متوازن انرژی بین گره‌ها و در نتیجه طول عمر شبکه از

WARN (برای پروتکل TinyLAP) احتمال‌های انتخاب مسیرها را به‌روز می‌کنند و در نتیجه خود را با شرایط شبکه بهتر از دو پروتکل دیگر تطبیق می‌دهند. البته این تطابق برای پروتکل LABER در مقایسه با پروتکل TinyLAP بیشتر است و در نتیجه پروتکل LABER از توازن بیشتری در مصرف انرژی بین گره‌ها برخوردار است.

ضریب تغییرات انرژی باقیمانده گره‌ها برای پروتکل EAR به علت اینکه احتمالات انتخاب مسیرها برای این پروتکل در فاصله‌های زمانی مشخص تعیین می‌شود چندان متناسب با شرایط شبکه نیست و در نتیجه اختلاف انرژی گره‌ها بر اساس این پروتکل در مقایسه با پروتکل‌های LABER و TinyLAP بالاتر است. پروتکل PGR به علت استفاده از مسیرهای نزدیکتر به مقصد و نه استفاده از تمامی مسیرهای ممکن، دارای ضریب تغییرات انرژی باقیمانده بیشتری در مقایسه با دیگر پروتکل‌ها می‌باشد. ضریب تغییرات انرژی باقیمانده گره‌ها برای پروتکل‌های مورد بررسی در محیط‌های مختلف شبیه‌سازی در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵: ضریب تغییرات انرژی باقیمانده گره‌ها در محیط‌های مختلف شبیه‌سازی برای پروتکل‌های LABER، TinyLAP، EAR و PGR

تعداد بسته‌های داده دریافت شده توسط مقصد در طول عمر شبکه می‌تواند معیار خوبی برای میزان طول عمر شبکه باشد. هر چه بسته‌های داده بیشتری دریافت شده باشد، نشان دهنده طولانی‌تر بودن عمر شبکه می‌باشد. شکل ۶ تعداد بسته‌های داده دریافت شده توسط گره مقصد برای چهار پروتکل مورد بررسی را در محیط‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، پروتکل پیشنهادی از این نظر نسبت به سه پروتکل دیگر برتر است. گره مقصد در پروتکل‌های EAR و PGR داده‌های دریافتی کمتری را در مقایسه با دو پروتکل LABER و TinyLAP دارد که این به خاطر عملکرد ضعیفتر EAR و PGR در ایجاد توازن در مصرف انرژی بین گره‌های شبکه می‌باشد. البته در پروتکل

- [11] M. Younis, M. Youssef, K. Arisha., "Energy-Aware routing in cluster-based sensor networks", in the Proc. Of MASCOTS2002, Fort Worth, TX, October 2002.
- [12] Y. T. Hou, Y. Shi, H.D. Sherali, "Rate allocation in wireless sensor networks with network lifetime requirement", in Proc. of ACM MobiHoc, Roppongi, Japan, May 2004, pp. 67-77.
- [13] K. Akkaya and M. Younis, "Energy-aware delay-constrained routing in wireless sensor networks", Int. J. of Communication Systems, vol. 17, no. 6, Aug. 2004, pp. 663-687.
- [14] I. Papadimitriou and L. Georgiadis, "Energy-aware Routing to Maximize Lifetime in Wireless Sensor Networks with Mobile Sink", 13th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2005, September 2005.
- [15] R. Shah, J. Rabaey, "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks", in: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Orlando, FL, March 2002.
- [16] T. Roosta, "Probabilistic geographic routing protocol for ad hoc and sensor networks", Proceeding of Wireless Networks and Emerging Technologies, 2005.
- [17] M. Esnaashari, M. R. Meybodi, M. Sabaei, "A novel method for QoS support in sensor networks", CSICC2007, PP. 740-747, 2007.
- [18] N. Farajzadeh, M. R. Meybodi, "Learning automata-based clustering algorithm for sensor networks", Proceedings of CSICC2007, PP. 780-787, 2007.
- [19] M. Gholipour, M. R. Meybodi, "LA-Mobicast: A learning automata based distributed protocol for mobicast in sensor networks", Proceedings of CSICC2007, PP. 1154-1161, 2007.
- [20] K. S. Narendra and M. A. L. Thathachar, "Learning Automata: An Introduction", Prentice Hall, 1989.
- [21] H. Beigy and M. R. Meybodi, "A mathematical framework for cellular learning automata", Advances on Complex Systems, Vol. 7, Nos. 3-4, pp. 295-320, September/December 2004
- [22] M. A. L. Thathachar and P. S. Sastry, "Varieties of learning automata: An overview", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. 32, No. 6, PP. 711-722, 2002.

عملکرد بهتری نسبت به پروتکل‌های TinyLAP و EAR و PGR برخوردار است. پروتکل LABER بر خلاف پروتکل‌های EAR و PGR به اطلاعات مکانی نیاز ندارد.

مراجع

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci., "Wireless sensor networks: a survey", in Computer Networks, pp. (38)393. 422, 2002.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks", IEEE Communication Magazine, Vol. 40, pp. 102-114, August 2002.
- [3] D. Janakiram, R. Venkateswarlu, and S. Nitin, "A survey on programming languages, middleware and applications in wireless sensor networks", IITM-CSE-DOS-2005-04, 2005.
- [4] D. Estrin et al., "Embedded Everywhere: A research agenda for network systems of embedded computers", National Academy Press, 2001, Computer Science and Telecommunication Board (CSTB) Report.
- [5] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey". In IEEE Wireless Communications, Volume 11, pp. 6-28, 2004.
- [6] M. Ankit, M. Arpit, T. J Deepak, R. Venkateswarlu and D. Janakiram, "TinyLAP: A Scalable learning automata-based energy aware routing protocol for sensor networks". Communicated to IEEE Wireless and Communications and Networking Conference to be held in Las Vegas, NV USA. 2006.
- [7] The Network Simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [8] J. H. Chang and L. Tassiulas, "Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks", in Proc. of 37th Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing, Monticello, IL, Sept. 1999.
- [9] J. H. Chang and L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks", in Proc. of IEEE INFOCOM, Tel-Aviv, Israel, Mar. 2000, pp. 22-31.
- [10] J. H. Chang and L. Tassiulas, "Maximum lifetime routing in wireless sensor networks", IEEE/ACM Trans. on Networking, vol. 12, no. 4, Aug. 2004, pp. 609-619.