

CLATC: یک پروتکل کنترل توپولوژی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم

برای شبکه‌های حسگر

سید محمد ابوالحسنی مهدی اثنی عشری محمد رضا میبدی

آزمایشگاه محاسبات نرم

دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تهران ایران

mmeybodi@aut.ac.ir, esnaashari@aut.ac.ir, sm_abolhasani@aut.ac.ir

چکیده: پروتکل‌های کنترل توپولوژی از مکانیزم‌های مختلفی به منظور کاهش میانگین محدوده انتقال گره‌ها استفاده می‌کنند. کاهش محدوده انتقال گره‌ها موجب کاهش مصرف انرژی شبکه می‌شود. در این مقاله، یک پروتکل کنترل کنترل توپولوژی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی به نام CLATC پیشنهاد شده است که در آن اتوماتای یادگیر هر گره در همکاری با اتوماتاهای یادگیر گره‌های همسایه، محدوده انتقال مناسب برای آن گره را انتخاب می‌نماید. به منظور ارزیابی، پروتکل CLATC با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز NS2 شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مطلوب پروتکل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلید واژه: شبکه‌های حسگر، کنترل توپولوژی، اتوماتای یادگیر، اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم

در اکثر تحقیقات در زمینه شبکه‌های حسگر، توجه اصلی روی شبکه‌های همگن است. در شبکه‌های همگن تمامی گره‌های شبکه از یک محدوده انتقال یکسان استفاده می‌کنند. وضعیت ارتباطات اینگونه شبکه‌ها را می‌توان توسط یک گراف غیرجهت‌دار مدل نمود. اگرچه تحلیل و آنالیز پروتکل‌های مختلف در شبکه‌های همگن ساده می‌باشد، اما اینگونه شبکه‌ها از نقطه نظر کارائی، طول عمر و استحکام کاری چندان مناسب نمی‌باشند [5,6].

در شبکه‌های ناهمگن برخلاف شبکه‌های همگن، گره‌های شبکه می‌توانند محدوده انتقال غیر یکسان داشته باشند. در این شبکه‌ها، گره‌ها می‌توانند مستقلانه محدوده انتقال خود را انتخاب کنند تا در عین حفظ اتصال محلی، تداخل کمتری را نیز داشته باشند. در نتیجه، چنین شبکه‌هایی تنومندتر^۱ و کارتر از شبکه‌های همگن هستند. هرچند، آنالیز آنها مشکل‌تر است [5,6].

تا کنون در پروتکل‌های کنترل توپولوژی ارائه شده برای شبکه‌های حسگر ناهمگن، از توانایی همکاری گره‌ها برای انتخاب محدوده انتقال مناسب هر گره کمتر استفاده شده است. در این مقاله پروتکل کنترل توپولوژی بر اساس اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم (CLATC²) پیشنهاد می‌گردد. در این پروتکل، یک اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم بر روی شبکه نگاشت می‌شود. در این اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم بر روی شبکه تاثیر نداشت می‌شود. در این اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم، هر گره دارای یک اتوماتای یادگیر است که با استفاده از آن می‌تواند از سه محدوده انتقال خود یکی را با توجه به شرایط شبکه و محدوده انتقال دیگر گره‌ها انتخاب کند.

سازماندهی ادامه مقاله به این صورت است. در بخش ۲ کارهای مرتبط شرح داده می‌شود. در بخش ۳ اتوماتای یادگیر سلولی

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند از تعداد زیادی (که ممکن است به هزاران مورد برسد) گره حسگر کوچک، ارزان قیمت با توانایی بالا و ذخیره انرژی پایین تشکیل شده‌اند. این حسگرها می‌توانند اطلاعاتی (نظیر دما، رطوبت، فشار و ...) را از محیط اطراف خود دریافت کرده و برای حسگرهای همسایه ارسال دارند [1]. شبکه‌های حسگر می‌توانند در کاربردهای مانند نظارت هوشمند بر بزرگراه‌ها، امدادرسانی در حوادث غیرمترقبه، دیده‌بانی محیط و پیگیری هدف به کار گرفته شوند [2,3].

کنترل توپولوژی در شبکه‌های حسگر هنر هماهنگی گره‌ها با تصمیم‌گیری در مورد محدوده انتقالشان به منظور ایجاد یک شبکه با خصوصیات مورد نظر (اتصال و ...) است در حالیکه افزایش ظرفیت شبکه و یا کم مصرف کردن انرژی را تامین می‌کند [5]. انتخاب توپولوژی مناسب برای یک شبکه حسگر تأثیر بسیار زیادی بر روی کارائی آن شبکه خصوصاً از لحاظ مصرف انرژی و طول عمر دارد. تا کنون پروتکل‌های مختلف کنترل توپولوژی به منظور اجازه دادن به گره‌ها برای تنظیم محدوده انتقال خود ارائه شده است [6]. چگونگی این انتخاب بر اساس اولویت‌های مختلف و شرایط متفاوت تغییر می‌کند. از جمله مواردی که در چگونگی انتخاب تاثیر می‌گذارد می‌توان به مصرف انرژی کمتر، تنک بودن، کم بودن درجه گره، تحمل پذیری خط‌ها و کاهش تداخل اشاره کرد [4].

۳- اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم

۳-۱- اتوماتای سلولی

اتوماتای سلولی (CA¹¹) یک مدل ریاضی برای سیستم‌هایی است که در آنها چندین مؤلفه ساده برای تولید الگوهای پیچیده با هم همکاری می‌کنند [13,14]. اتوماتای سلولی در حقیقت سیستم دینامیکی گسته‌ای است که رفتارش کاملاً بر اساس ارتباط محلی استوار است. در اتوماتای سلولی یک مجموعه منظم از سلول‌ها وجود دارد که هر کدام می‌توانند با چند وضعیت مختلف مقداردهی شوند. با توجه به تعداد مقادیری که سلول‌ها می‌توانند اختیار کنند، اتوماتای سلولی به دو نوع دودویی و چندمقداره تقسیم می‌شود. برای هر سلول یک همسایگی از سلول‌ها در نظر گرفته می‌شود. عموماً همسایگی استفاده شده از نوع همسایگی نزدیک می‌باشد که در این نوع همسایگی، سلول‌هایی که با یکدیگر مرز مشترک دارند به عنوان همسایه یکدیگر شناخته می‌شوند. این سلول‌ها در زمان‌های گسته بر طبق یک قانون محلی بهنگام رسانی می‌شوند. در تعیین وضعیت جدید برای هر سلول، مقادیر سلول‌های همسایه نیز تأثیرگذار هستند. انتخاب قوانین مختلف برای بهنگام رسانی، انواع متفاوتی از اتوماتاهای سلولی را وجود آورده است. این قوانین می‌توانند به صورت قطعی و یا احتمالی بیان شوند.

۳-۲- اتوماتای یادگیر

اتوماتای یادگیر (LA¹²) [15,16] ماشینی است که می‌تواند تعدادی متناهی 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 تأثیر می‌گیرد. هدف نهایی آن است که اتوماتا یاد بگیرد که از بین عمل‌های خود بهترین عمل را انتخاب کند. بهترین عمل، عملی است که احتمال دریافت پاداش از محیط را به حداقل 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 $\{ \alpha, \beta, c \}$ نشان داد که در آن $\{ \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r \}$ مجموعه ورودی‌ها، $\beta = \{ \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m \}$ مجموعه خروجی‌ها و $c = \{ c_1, c_2, \dots, c_r \}$ مجموعه احتمال‌های جریمه می‌باشد. c_i احتمال اینکه عمل α نتیجه نامطلوب داشته باشد می‌باشد. در

نامنظم شرح داده می‌شود. در بخش ۴ مسئله مطرح در این مقاله تعریف می‌شود. در بخش ۵ پروتکل پیشنهادی توضیح داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش ۶ آورده شده است. بخش ۷ نتیجه-گیری می‌باشد.

۲- کارهای مرتبط

آقای سانتی^۳ پروتکل‌های کنترل توپولوژی را با توجه به ماهیت شبکه و اطلاعاتی که هر گره می‌تواند به دست آورد طبقه‌بندی کرده است [5,6]. در ابتدا پروتکل‌های کنترل توپولوژی به دو طبقه کنترل توپولوژی همگن و کنترل توپولوژی ناهمگن تقسیم می‌شوند. در کنترل توپولوژی همگن تمامی گره‌های شبکه از یک محدوده انتقال یکسان استفاده می‌کنند و مسئله کنترل توپولوژی پیدا کردن کمترین مقدار برای محدوده انتقال است به گونه‌ای که خصوصیات شبکه (اتصال و ...) حفظ شود. در کنترل توپولوژی ناهمگن، گره‌های شبکه می‌توانند محدوده انتقال غیر یکسان داشته باشند. در این طبقه، پروتکل‌ها با توجه به اطلاعاتی که برای ساخت توپولوژی استفاده می‌کنند به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول روش‌های R&M⁴ [7] و LMST⁵ [8] در آن جای می‌گیرند، گره‌ها از موقعیت خود مطلع هستند و با استفاده از این اطلاعات، سعی در ایجاد یک توپولوژی مناسب برای شبکه می‌نمایند. دسته دوم روش‌های مبتنی بر جهت می‌باشند. در این روش‌ها گره‌ها اطلاع دقیقی از موقعیت خود ندارند، اما توانایی تشخیص جهت همسایه‌های خود را دارند. پروتکل CBTC⁶ [9] نمونه‌ای از این روش‌ها می‌باشد. دسته سوم روش‌های مبتنی بر همسایه هستند که در آنها گره‌ها اطلاعات محدودی از همسایه‌های خود دارند. این اطلاعات ممکن است شماره شناسایی، فاصله و یا کیفیت لینک همسایه‌های گره باشد. پروتکل‌های Kneigh⁷ [10] و XTC⁸ [11] در این دسته جای می‌گیرند.

از دیگر پروتکل‌های کنترل توپولوژی می‌توان به⁹ RAA_2L اشاره کرد که در آن هر گره یکی از دو محدوده انتقال R_s یا R_w را انتخاب می‌کند [12]. اگر گره با محدوده انتقال R_w خود توانست با همسایه‌های با محدوده انتقال R_s ارتباط برقرار کند (با واسطه یا بی واسطه) گره محدوده انتقال R_w را انتخاب می‌کند و در غیر این صورت محدوده انتقال R_s را انتخاب می‌کند. در پروتکل RAA_3L¹⁰ را هر گره یکی از سه محدوده انتقال R_s یا R_t یا R_w برای دو انتخاب می‌کند. مکانیزم به کار رفته در پروتکل RAA_2L محدوده انتقال R_s و R_t انجام می‌شود. اگر گره محدوده انتقال R_t را انتخاب کرد دوباره مکانیزم به کار رفته در پروتکل RAA_2L برای دو محدوده R_s و R_t انجام می‌شود.

هر اتوماتای یادگیر در اتوماتای یادگیر سلولی یک عمل از مجموعه عمل‌های خود را انتخاب می‌کند. عمل انتخاب شده با توجه به عمل‌های انتخاب شده توسط سلول‌های همسایه و قانون محلی حاکم بر اتوماتای یادگیر سلولی پاداش داده و یا جریمه می‌شود. با توجه به اینکه عمل انتخاب شده پاداش گرفته و یا جریمه شده است، اتوماتای یادگیر رفتار خود را تصحیح کرده و از این طریق ساختار داخلی خود را به روز می‌کند. بعد از به روز درآوردن ساختار داخلی، هر اتوماتای یادگیر در اتوماتای یادگیر سلولی دوباره یک عمل از مجموعه عمل‌های خود را انتخاب کرده و انجام می‌دهد. فرآیند انتخاب عمل و دادن پاداش و یا جریمه تا زمانیکه سیستم به وضعیت پایدار برسد و یا یک معیار از قبل تعریف شده برقرار شود، ادامه می‌یابد. عمل بهنگام‌سازی ساختار اتوماتاهای یادگیر موجود در اتوماتای یادگیر سلولی توسط الگوریتم‌های یادگیری انجام می‌شود. الگوریتم‌های یادگیری از این شود. الگوریتم یادگیری خطی (رابطه‌های ۱ و ۲) یک نمونه از این الگوریتم‌های یادگیری است.

۴-۳- اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم

اگرچه مدل اتوماتای سلولی منظم تاکنون در کاربردهای متعددی مورد استفاده قرار گرفته و توانایی آن برای حل سیستم از مسائل نشان داده شده است، ولی برخی از کاربردها نیازمند مدلی هستند که محدودیت یک توری منظم را نداشته باشد. در [18] اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم (ICLA^{۱۵}) از ترکیب اتوماتای سلولی نامنظم و اتوماتای یادگیر ارائه شده است. ICLA نظمی را که در بیان همسایگی در مدل‌های اتوماتای سلولی و اتوماتای یادگیر سلولی وجود دارد، ندارند.

یک اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم یک ساختار است که در آن G یک گراف بدون جهت $A = (G < E, V >, \Phi, A, F)$ است که مجموعه راس‌ها و E مجموعه یال‌ها را نشان می‌دهد. Φ یک مجموعه متناهی از حالات است. A مجموعه LA ‌هایی است که به هر سلول از اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم نسبت داده شده است. F : $\Phi_j \rightarrow \beta$ قانون محلی از اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم در هر راس j است که $\{j\} = \{\Phi_i | (i, j) \in E\} + \{\Phi_j\}$ مجموعه حالات تمام همسایه‌های j و β مجموعه مقادیری است که سیگنال تقویتی می‌تواند بگیرد. β سیگنال تقویتی را برای z_{LA} بر اساس عمل‌های انتخاب شده توسط اتوماتای یادگیر مجاور محاسبه می‌کند.

۴- تعریف مسئله

در این مقاله فرض می‌شود که هر گره دارای سه محدوده انتقال مختلف است که به دلخواه می‌تواند یکی از آنها را انتخاب کند. محدوده انتقال با توان کم تحت عنوان محدوده انتقال نجوا کننده^{۱۶} (R_w)، محدوده انتقال با توان بالا تحت عنوان محدوده انتقال فریاد

محیط ایستا مقادیر c بدون تغییر می‌مانند، حال آنکه در محیط غیر ایستا این مقادیر در طی زمان تغییر می‌کنند. اتوماتاهای یادگیر به دو گروه با ساختار ثابت و با ساختار متغیر تقسیم‌بندی می‌گردند. در ادامه اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر معرفی می‌شود.

اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر را می‌توان توسط چهارتایی $\{\alpha, \beta, p, T\}$ نشان داد که $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$ مجموعه عمل‌های اتومات، $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_m\}$ مجموعه ورودی‌های اتومات، $p = \{p_1, \dots, p_r\}$ بردار احتمال انتخاب هریک از عمل‌ها و $p(n+1) = T[\alpha(n), \beta(n), p(n)]$ الگوریتم یادگیری می‌باشد. الگوریتم زیر یک نمونه از الگوریتم‌های یادگیری خطی است. فرض کنید عمل α 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 می‌باشند. با توجه به مقادیر a و b سه حالت زیر را می‌توان در نظر گرفت. زمانیکه a و b با هم برابر باشند، الگوریتم را L_{RP} می‌نامند، زمانیکه b از a خیلی کوچکتر باشد، الگوریتم را $L_{R_{RP}}$ می‌نامند و زمانیکه b مساوی صفر باشد الگوریتم را L_{RI} می‌نامند [17].

۳-۳- اتوماتای یادگیر سلولی

اتوماتای یادگیر سلولی (CLA^{۱۷})، مدلی برای سیستم‌هایی است که از اجزاء ساده‌ای تشکیل شده‌اند و رفتار هر جزء بر اساس رفتار همسایگانش و نیز تجربیات گذشته‌اش تعیین و اصلاح می‌شود [16]. اجزاء ساده تشکیل دهنده این مدل، از طریق تعامل با یکدیگر می‌توانند رفتار پیچیده‌ای از خود نشان دهند. هر اتوماتای یادگیر سلولی، از یک اتوماتای سلولی تشکیل شده است که هر سلول آن به یک یا بیشتر اتوماتای یادگیر مججهز می‌باشد که وضعیت این سلول را مشخص می‌سازند. همانند اتوماتای سلولی، قانون محلی در محیط حاکم است و این قانون تعیین می‌کند که آیا عمل انتخاب شده توسط یک اتوماتا در یک سلول بایستی پاداش داده شود و یا جریمه شود. عمل دادن پاداش و یا جریمه منجر به به روز درآوردن ساختار اتوماتای یادگیر سلولی به منظور نیل به یک هدف مشخص می‌گردد. در اتوماتای یادگیر سلولی می‌توان از ساختارهای مختلفی برای همسایگی استفاده نمود. در حالت کلی هر چندتایی مرتب از سلول‌ها را می‌توان به عنوان همسایه در نظر گرفت.

عملکرد اتوماتای یادگیر سلولی به این صورت است که در هر لحظه

اطلاعات دریافتی از همسایه‌هایش فاصله آنها را نسبت به خود محاسبه می‌کند. با توجه به فاصله محاسبه شده، هر گره همسایه در یکی از مجموعه‌های A_w , A_i و یا A_o قرار داده می‌شود.

۲-۵- مرحله انتخاب محدوده انتقال

در این مرحله گره‌ها با توجه به شرایط مجموعه‌های خود و محدوده انتقال گره‌های دیگر، محدوده انتقال خود را انتخاب می‌کنند. این مرحله از دو زیر مرحله "به روز کردن مجموعه‌ها" و "یادگیری" تشکیل شده است.

۱-۲- به روز کردن مجموعه‌ها

در این مرحله، هر گره اعضای مجموعه A_w خود را داخل مجموعه A_c خود قرار می‌دهد. سپس فاصله گره‌های قرار گرفته در مجموعه A_c و A_o را با گره‌های مجموعه A_c محاسبه می‌کند. اگر فاصله محاسبه شده برای گره‌های کمتر از مقدار R_w باشد، آن گره از مجموعه A_i یا A_o حذف شده و به مجموعه A_c اضافه می‌شود. همچنین گره بررسی می‌کند که آیا هیچ یک از گره‌های واقع در مجموعه A_o از طریق گره‌های واقع در A_i قابل دستیابی است یا نه. اگر گره‌ای در مجموعه A_o از طریق گره‌های واقع در A_i قابل دستیابی بود، آن گره از مجموعه A_o حذف و به مجموعه A_i اضافه می‌شود.

گره با توجه به شرایط مجموعه‌های A_i و A_o اقدام به تصمیم گیری به صورت زیر می‌کند.

- مجموعه A_i تهی و مجموعه A_o تهی

گره محدوده انتقال قطعی خود را برابر R_w در نظر می‌گیرد.

- مجموعه A_i غیر تهی و مجموعه A_o تهی

گره می‌تواند یکی از دو محدوده انتقال R_w و R_i را انتخاب کند. به منظور انتخابی مناسب، گره مرحله یادگیری را انجام می‌دهد.

- مجموعه A_i تهی و مجموعه A_o غیر تهی

گره می‌تواند یکی از دو محدوده انتقال R_w و R_s را انتخاب کند. به منظور انتخابی مناسب، گره مرحله یادگیری را انجام می‌دهد.

- مجموعه A_i غیر تهی و مجموعه A_o غیر تهی

گره می‌تواند یکی از سه محدوده انتقال R_w , R_i و R_s را انتخاب کند. به منظور انتخابی مناسب گره مرحله یادگیری را انجام می‌دهد.

با توجه به موارد فوق، اگر گره‌ای محدوده انتقال خود را به صورت قطعی انتخاب کرد، این انتخاب را همراه با مجموعه A_c خود به همسایه‌های خود اطلاع می‌دهد.

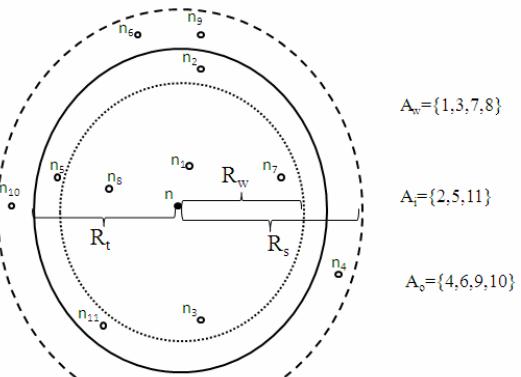
۲-۶- مرحله یادگیری

در ابتدای این مرحله، یک اتماتای یادگیر سلولی نامنظم بر روی شبکه نگاشت می‌شود. به هر گره که این مرحله را آغاز می‌کند، یک

زننده^{۱۶} (R_s) و محدوده انتقال با توان میانی تحت عنوان محدوده انتقال صحبت کننده^{۱۷} (R_t), سه محدوده انتقالی است که هر گره دارد ($R_w < R_t < R_s$). مقدار محدوده انتقال R_t متناسب با چگالی شبکه مشخص می‌شود [19]. مقدار محدوده انتقال R_w برابر $R_s = 1.25R_t$ و مقدار محدوده انتقال $R_t = 0.8R_s$ می‌باشد. هرگاه فاصله دو گره کمتر از مقدار R_s باشد آن دو گره همسایه یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند. هر گره همسایه‌های خود را در چهار مجموعه مختلف قرار می‌دهد. مجموعه‌های A_w , A_i و A_o توسعه رابطه^۳ بدست می‌آیند. در این رابطه، n_i شماره گره همسایه و A_c مجموعه شامل گره‌هایی است که در محدوده انتقال انتخابی گره قرار می‌گیرند.

$$\begin{cases} n_i \in A_w & \text{if } D_{ni} \leq R_w \\ n_i \in A_i & \text{if } R_w < D_{ni} \leq R_t \\ n_i \in A_o & \text{if } R_t < D_{ni} \leq R_s \end{cases} \quad (3)$$

با توجه به تعریف مجموعه‌های A_w و A_c مشخص است که مجموعه A_w زیر مجموعه A_c است. چرا که هر گره حداقل محدوده انتقال R_w را دارد. محدوده‌های انتقال و مجموعه‌های گره، برای گره نمونه n در شکل ۲ دیده می‌شود. مسئله مدنظر در این مقاله انتخاب کمترین محدوده انتقال ممکن از بین سه محدوده انتقال R_t , R_w و R_s برای هر گره می‌باشد به نحوی که اتصال شبکه حفظ شود.



شکل ۲) گره نمونه n با محدوده‌های انتقال مختلف و مجموعه‌های مختلف گره

۵- پروتکل پیشنهادی (CLATC)

پروتکل پیشنهادی کنترل توبولوژی که مبتنی بر اتماتای یادگیر سلولی نامنظم می‌باشد از دو مرحله "راه‌اندازی" و "انتخاب محدوده انتقال" تشکیل شده است.

۱-۵- مرحله راه‌اندازی

در این مرحله هر گره با محدوده انتقال R_s ، اطلاعات خود شامل شماره شناسایی و موقعیت را می‌فرستد. به این طریق گره‌ها اطلاعات همسایه‌های خود را به دست می‌آورند. هر گره با توجه به

یک مجموعه موقت TA_c در نظر می‌گیرد. این مجموعه در ابتدا برابر A_c است. در ادامه، گره مجموعه A_i (در صورتی که گره همسایه محدوده انتقال R_t یا R_s را انتخاب کرده باشد) و A_o (در صورتی که گره همسایه محدوده انتقال R_s را انتخاب کرده باشد) هر همسایه خود را به مجموعه A_c همان همسایه اضافه می‌کند. سپس گره، با توجه به رابطه ۶ مجموعه TA_c را بهروز می‌کند.

$$\forall n_i \in TA_c(N) \quad \exists n_j \in TA_c(n_i) \text{ and} \\ (n_j \in A_i(N) \text{ or } n_j \in A_o(N)) \Rightarrow \quad (6) \\ TA_c(N) = TA_c(N) + n_j$$

بعد از بهروز شدن مجموعه TA_c ، نحوه دادن پاداش و جریمه به صورت زیر است:

$$\bullet \quad \text{اگر } A_o \subset TA_c \text{ و } A_i \subset TA_c$$

- اگر اتماتای یادگیر گره، محدوده انتقال R_w را انتخاب کرده باشد، عمل انتخابی پاداش داده می‌شود.

- در غیر این صورت عمل انتخابی جریمه می‌شود.

$$\bullet \quad \text{اگر } A_o \not\subset TA_c \text{ و يا } A_i \not\subset TA_c$$

- گره مجموعه A_i (در صورتی که گره محدوده انتقال R_t یا R_s را انتخاب کرده باشد) و A_o (در صورتی که گره

محدوده انتقال R_s را انتخاب کرده باشد) را به مجموعه

اضافه کرده و دوباره مجموعه TA_c را با استفاده از

رابطه ۶ بهروز می‌کند. اگر $A_o \subset TA_c$ و $A_i \subset TA_c$ ،

عمل انتخابی پاداش داده می‌شود.

- در غیر این صورت عمل انتخابی جریمه می‌شود.

پارامترهای پاداش (a) و جریمه (b) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند. در این روابط، my_nodes_A نشان‌دهنده مجموع تعداد اعضای دو مجموعه A_i و A_o گره مورد نظر است؛ λ_1 و λ_2 به ترتیب نشان‌دهنده حداقل مقدار قابل قبول برای پارامترهای پاداش و جریمه می‌باشند. ψ_1 و ψ_2 به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که مقدار پارامترهای a و b از حد مشخصی بزرگتر نشود. مقدار $maxnodes_A$ با استفاده از رابطه ۹ محاسبه می‌شود. در این رابطه $nebR_x$ همسایه‌های انتخاب کننده محدوده انتقال R_x و A_x نشان‌دهنده مجموعه A_x گره y است. در ادامه دوره بعدی شروع می‌شود و گره‌ها دوباره با استفاده از اتماتای یادگیر یک عمل خود را انتخاب کرده و مجموعه‌های مورد نظر را به همسایه‌هایشان می‌فرستند و این روند ادامه می‌یابد.

$$a = \lambda_1 + \psi_1 \frac{my_nodes_A}{maxnodes_A} \quad (7)$$

$$b = \lambda_2 + \psi_2 \frac{my_nodes_A}{maxnodes_A} \quad (8)$$

اتوماتای یادگیر با تعداد اعمال برابر با تعداد محدوده‌های انتقال انتخابی گره نسبت داده می‌شود. هر عمل متناظر با یک محدوده انتقال است و انتخاب آن عمل به معنی انتخاب محدوده انتقال متناظر با آن عمل است. احتمالات اولیه عمل‌های اتماتای یادگیر بر اساس رابطه ۴ تعیین می‌شود. در رابطه ۴ تعداد عمل‌های اتماتاست. هرگاه فاصله دو گره کمتر از R_s باشد اتمات‌های یادگیر نسبت داده شده به آنها همسایه یکدیگر محسوب می‌شوند.

$$\forall i \quad i \leq n \quad P_i = \frac{1}{n} \quad (4)$$

اتومات‌ها در اتماتای یادگیر سلولی نامنظم به صورت همزمان و در فواصل زمانی گسسته بهنگام می‌شوند. هر یک از این فاصله‌های زمانی، یک دوره تعریف می‌شود. دوره اول بعد از ساخت اتماتای یادگیر گره شروع می‌شود. جریمه شدن و یا پاداش دادن عمل انتخاب شده توسط هر اتماتا در دوره بعد، تنها به عمل انتخابی خود اتماتا و عمل‌های انتخاب شده توسط اتمات‌های همسایه بستگی دارد. در هر دوره، اتماتای یادگیر هر گره یکی از عمل‌های (محدوده انتقال) خود را انتخاب می‌کند. گره بر اساس عمل انتخابی اتماتای یادگیر خود، مجموعه A_c خود را به همراه A_i (اگر محدوده انتقال R_s یا R_t انتخاب شده باشد) یا A_o (اگر محدوده انتقال R_s انتخاب شده باشد) با استفاده از بسته Learnp به همسایه‌های خود ارسال می‌کند. در حقیقت بسته Learnp شامل عمل انتخابی اتماتا، مجموعه A_c و ترکیبی از مجموعه‌های A_i و A_o می‌باشد. در ادامه اتماتا، عمل‌های انتخابی همسایه‌های خود را دریافت کرده و با

توجه به آنها، عمل انتخابی خود را جریمه یا پاداش می‌دهد.

در صورتی که گره تمامی بسته‌های Learnp همسایه‌های خود را دریافت کرد، با توجه به A_c های دریافتی مجموعه‌های خود را بهروز می‌کند. هرگاه به علت تداخل^{۱۸}، بسته Learnp یک یا چند همسایه دریافت نشد، گره فرض می‌کند که گره‌های همسایه مورد نظر دارای محدوده انتقال انتخابی R_w (کوچکترین محدوده انتقال) و مجموعه A_c تهی هستند. بهروز کردن مجموعه‌های گره به این صورت انجام می‌پذیرد که هرگاه یکی از اعضاء (شماره گره) مجموعه A_c گره‌ای که عضو مجموعه A_c خود گره است، عضو مجموعه A_i و یا A_o خود گره باشد آن عضو از مجموعه A_i و یا A_o حذف شده و به مجموعه A_c گره اضافه می‌شود. به طور دقیق‌تر برای گره N بهروز کردن مجموعه‌ها با توجه به رابطه ۵ انجام می‌شود.

$$\forall n_i \in A_c(N) \quad \exists n_j \in A_c(n_i) \text{ and}$$

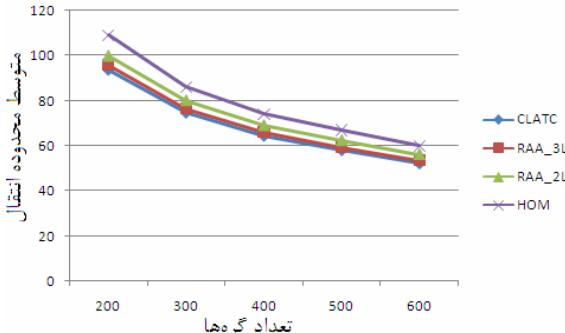
$$(n_j \in A_i(N) \text{ or } n_j \in A_o(N)) \Rightarrow \quad (5)$$

$$\begin{cases} A_c(N) = A_c(N) + n_j \\ A_i(N) = A_i(N) - n_j \text{ or } A_o(N) = A_o(N) - n_j \end{cases}$$

در رابطه ۵ $A_{x(y)}$ نشان‌دهنده مجموعه گره y است. پس از به روز کردن مجموعه‌ها، گره عمل انتخابی خود را با توجه به عمل انتخابی همسایه‌هایش پاداش و جریمه می‌دهد. بدین منظور گره

نظر گرفته شده است تا گره‌ها بتوانند بسته‌های Learnp همسایه‌های خود را دریافت کرده و با توجه به اطلاعات ارسالی توسط آنها و محاسبات لازم محدوده انتقال خود را در آن دوره انتخاب کنند. مدل انرژی به کار رفته در این شبیه‌سازی‌ها مدل انرژی ارائه شده در مرجع [21] می‌باشد. با توجه به محیط شبیه‌سازی و اندازه شبکه (تعداد گره‌ها)، پروتکل‌های CLATC، RAA_2L، RAA_3L و RAA و حالت همگن (HOM) بر اساس چهار معیار متوسط محدوده انتقال، متوسط تعداد همسایه‌های هر گرده، وضعیت اتصال شبکه و متوسط انرژی باقیمانده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بررسی وضعیت اتصال شبکه برای اندازه‌های مختلف شبکه حالتی را که تمامی گره‌ها بزرگترین محدوده انتقال را انتخاب کرده باشند نیز به عنوان یک نتایج حاصله، میانگین اجرای پروتکل‌های مورد بررسی برای ۱۰۰ پیکربندی تصادفی مختلف از گره‌هاست.

آزمایش اول: هدف از این آزمایش بررسی متوسط محدوده انتقال گره‌های شبکه برای پروتکل‌های CLATC، RAA_2L، RAA_3L و RAA می‌باشد. در هر گرده هر چه محدوده انتقال انتخاب شده کمتر باشد (در عین حفظ اتصال شبکه)، انرژی مصرفی کمتر و با توجه به کاهش تعداد همسایه‌ها، احتمال بروز تداخل نیز کمتر خواهد بود. در شکل ۳ متوسط محدوده انتقال گره‌ها برای پروتکل-CLATC دارای کمترین میزان متوسط محدوده انتقال R_s و HOM در اندازه‌های مختلف شبکه دیده می‌شود. همانگونه که دیده می‌شود، پروتکل CLATC دارای کمترین میزان متوسط محدوده انتقال نسبت به دیگر پروتکل‌های است. حالت همگن (HOM) دارای بیشترین میانگین محدوده انتقال است که به این علت است که تمامی گره‌ها در آن دارای محدوده انتقال R_t می‌باشند. پروتکل RAA_3L دارای متوسط محدوده انتقال کمتری نسبت به پروتکل RAA_2L است. علت این امر این است که در پروتکل RAA_3L هر گرده می‌تواند از بین سه محدوده انتقال، محدوده انتقال خود را انتخاب کند، در حالی که در پروتکل RAA_2L هر گرده از بین دو محدوده انتقال، محدوده انتقال خود را انتخاب می‌کند.



شکل ۳) متوسط محدوده انتقال گره‌های شبکه برای پروتکل‌های CLATC، RAA_3L، RAA_2L و HOM در اندازه‌های مختلف شبکه

به منظور نمایش بهتر اختلاف پروتکل‌های مورد بررسی، درصد کاهش محدوده انتقال پروتکل‌های CLATC، RAA_2L و

$$\max_{\text{nodes_}} A = \max(a, b, c)$$

$$\begin{cases} a = \max(\|A_i n_j\| + \|A_o n_j\| \forall n_i \in nebR_s) \\ b = \max(\|A_i n_j\| \forall n_i \in nebR_t) \\ c = my_nodes_ A = \|A_i N\| + \|A_o N\| \end{cases} \quad (9)$$

هر گره دوره‌های انتخاب محدوده انتقال (با استفاده از اتماتاتی یادگیر) را برقراری یکی از شروط زیر ادامه می‌دهد.

- احتمال یکی از عمل‌ها از حد آستانه‌ای (T_p) بیشتر شود: در این حالت گره محدوده انتقال متناظر با عملی که احتمالش از حد آستانه بیشتر شده است را انتخاب می‌کند.
- تعداد دوره‌های انتخاب محدوده انتقال به حد آستانه‌ای (T_s) برسد یا تمام گره‌های همسایه محدوده انتقال خود را انتخاب کرده باشند: گره با توجه به شرایط مجموعه‌های خود، محدوده انتقال خود را مشخص می‌کند. این کار بدین صورت انجام می‌شود که اگر مجموعه A_i غیر تهی باشد محدوده انتقال R_s انتخاب می‌شود. در غیر این صورت اگر مجموعه A_i غیر تهی باشد محدوده انتقال R_t و در غیر این صورت محدوده انتقال R_w انتخاب می‌شود.
- مجموعه‌های A_i و A_o تهی شده باشند: این حالت به خاطر به روز شدن مجموعه‌های گره با توجه به مجموعه‌های A_i ارسالی از همسایه‌ها اتفاق می‌افتد. در این حالت گره محدوده انتقال R_w را انتخاب می‌کند.
- در هر یک از شروط قبل، هرگاه گره‌ای انتخاب قطعی خود را مشخص کرد، این انتخاب را همراه با مجموعه A_i به روز شده خود به همسایه‌های اعلام می‌کند. همسایه‌ها با دریافت این پیغام و پس از به روز کردن مجموعه‌های خود اتماتاتی نسبت داده شده به آن گره را از لیست همسایه‌های خود خارج می‌کنند.

۶- نتایج شبیه‌سازی‌ها

به منظور ارزیابی، پروتکل‌های RAA_3L، RAA_2L، CLATC و حالت همگن (HOM) [19] در نرم‌افزار شبیه‌ساز NS2 [20] شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شبیه‌سازی، گره‌ها در منطقه‌ای به مساحت ۱۰۰۰ * ۱۰۰۰ متر مربع توزیع شده‌اند. تعداد گره‌ها برابر با ۲۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ گره در نظر گرفته شده است. هر گرده دارای سه محدوده انتقال R_t، R_s و R_w است. محدوده انتقال R_t (متناسب با چگالی شبکه) برابر با ۱۰.۹m (برای ۲۰۰ گره)، ۸.۶m (برای ۳۰۰ گره)، ۷.۴m (برای ۴۰۰ گره)، ۶.۷m (برای ۵۰۰ گره) و ۶.۰m (برای ۶۰۰ گره) در نظر گرفته شده است [19]. محدوده‌های انتقال R_s و R_w با توجه به محدوده انتقال R_t مشخص می‌شوند. پارامترهای λ_1 و λ_2 هر دو برابر $\frac{1}{2}$ ، پارامترهای α و β هر دو برابر $\frac{3}{4}$ و مقادیر حد آستانه‌های T_s و T_p به ترتیب برابر ۰.۹۸ و ۰.۹۶ در نظر گرفته شده‌اند. فاصله بین دو انتخاب عمل اتماتاتی یادگیر نیز ۵ ثانیه در

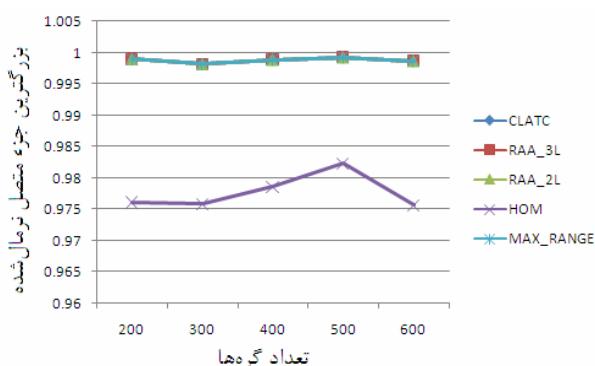
بزرگترین جزء متصل نرمال شده یکسان هستند. در واقع اگر تمامی گرهها دارای محدوده انتقال_s (بزرگترین محدوده انتقال) باشند MAX_RANGE، مقدار بزرگترین جزء متصل نرمال شده آنها برابر بزرگترین جزء متصل نرمال شده پروتکل‌های CLATC، RAA_2L، RAA_3L هستند و این برتری مکانیزم‌های مورد نظر را نشان می‌دهد که در عین حفظ مقدار بزرگترین جزء متصل نرمال شده، توانسته‌اند متوسط محدوده انتقال و متوسط تعداد همسایه‌های گرههای شبکه را کاهش دهند.

متصل بودن شبکه به معنی توانایی ارتباط تمامی گرههای شبکه با یکدیگر است. در واقع هرگاه بزرگترین جزء متصل شبکه (mcp) برابر با تعداد گرههای شبکه (N_n) باشد، شبکه متصل و در غیر این صورت شبکه غیر متصل نامیده می‌شود. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی از نقطه نظر متصل بودن شبکه، مفهوم احتمال متصل بودن کامل شبکه را به صورت رابطه 10^{-t} تعریف می‌کنیم. در این رابطه t تعداد پیکربندی‌های مختلف گرههای شبکه است که در این آزمایش برابر 100 در نظر گرفته شده است.

$$P_C = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_d} C_i}{N_d} \quad (10)$$

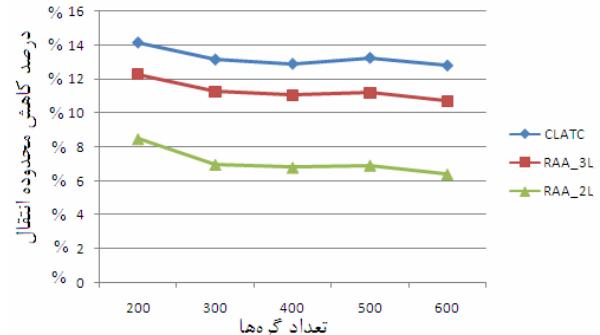
$$\begin{cases} C_i = 1 & \text{if } mcp = N_n \\ C_i = 0 & \text{other} \end{cases}$$

احتمال متصل بودن کامل گرههای شبکه با استفاده از پروتکل‌های MAX_RANGE، HOM، RAA_3L، RAA_2L، CLATC برای مشاهده می‌شود، احتمال اتصال کامل گرهها با استفاده از چهار پروتکل CLATC، RAA_3L، RAA_2L و RAA_3L، RAA_2L، CLATC یکسان می‌باشد. اگر تمامی گرههای شبکه دارای محدوده انتقال Rs باشند (MAX_RANGE)، باز هم مقدار احتمال اتصال کامل شبکه از مقدار احتمال اتصال کامل گرهها با استفاده از سه پروتکل RAA_3L، RAA_2L، CLATC بیشتر نمی‌شود.



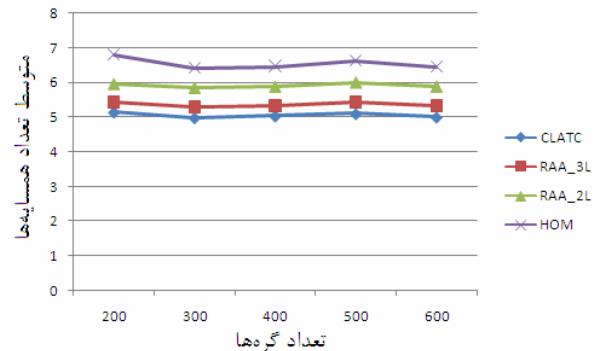
شکل ۶) بزرگترین جزء متصل نرمال شده گرههای شبکه برای پروتکل‌های مختلف شبکه MAX_RANGE و HOM، RAA_3L، RAA_2L، CLATC در اندازه‌های مختلف

RAA_3L نسبت به حالت همگن محاسبه گردید. نتایج این محاسبات در شکل ۴ دیده می‌شود.



شکل ۴) درصد کاهش متوسط محدوده انتقال گرههای شبکه برای پروتکل‌های RAA_3L، RAA_2L، CLATC نسبت به حالت همگن در اندازه‌های مختلف شبکه

آزمایش دوم: در این آزمایش متوسط تعداد همسایه‌های گرههای شبکه برای پروتکل‌های RAA_3L، RAA_2L، CLATC و HOM مورد بررسی قرار گرفته است. متوسط تعداد همسایه‌های گرههای شبکه برای ۴ پروتکل مورد بررسی در اندازه‌های مختلف شبکه در شکل ۵ دیده می‌شود. از آنجا که تعداد همسایه‌ها تاثیر مستقیم بر روی تداخل بین گرهها دارد، کم بودن این پارامتر اهمیت بسیار بالاتی دارد. همانگونه که مشاهده می‌شود، پروتکل پیشنهادی کمترین میزان متوسط تعداد همسایه‌ها را نسبت به پروتکل‌های دیگر دارد.



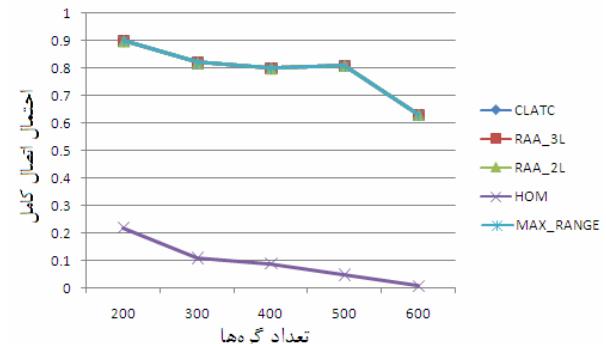
شکل ۵) متوسط تعداد همسایه‌های گرههای شبکه برای پروتکل‌های HOM، RAA_3L، RAA_2L، CLATC در اندازه‌های مختلف شبکه

آزمایش سوم: هدف از این آزمایش بررسی متصل بودن شبکه و بزرگترین جزء متصل از شبکه برای پروتکل‌های CLATC، MAX_RANGE، HOM، RAA_3L، RAA_2L می‌باشد. بزرگترین جزء متصل نرمال شده از تقسیم بزرگترین تعداد گرههایی که به هم متصل هستند به تعداد گرههای شبکه به دست می‌آید. هر چه این میزان بیشتر باشد شبکه بیشتری گره متصل به هم است که توانایی ارتباط با یکدیگر را دارد. بزرگترین جزء متصل نرمال شده برای چهار پروتکل مورد بررسی در اندازه‌های مختلف شبکه در شکل ۶ دیده می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود، چهار پروتکل CLATC، RAA_3L، RAA_2L، MAX_RANGE در

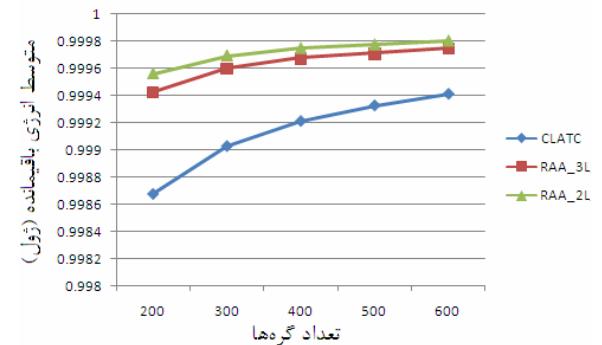
سازی و با دیگر پروتکل‌ها مقایسه گردید. نتایج مقایسه‌ها نشان دهنده برتری پروتکل پیشنهادی نسبت به دیگر پروتکل‌هاست.

مراجع

- [1] Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y. and Cayirci E., “A survey on sensor networks”, IEEE Communication Magazine, Vol. 40, pp. 102-114, August 2002.
- [2] Janakiram D., Venkateswarlu R. and Nitin S., ”A survey on programming languages, middleware and applications in wireless sensor networks”, IITM-CSE-DOS-2005-04, 2005.
- [3] Estrin D., “Embedded Everywhere: A research agenda for network systems of embedded computers”, National Academy Press, 2001, Computer Science and Telecommunication Board (CSTB) Report, 2001.
- [4] Wattenhofer R. and Zollinger A., “XTC: a practical topology control algorithm for ad-hoc networks”. Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, pp. 2-16, 26-30 April 2004.
- [5] Santi P., “Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks”, Wiley, 2005.
- [6] Santi P., “Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks”, ACM Computer Survey, Vol. 37, No. 2, pp. 164-194, 2005.
- [7] Rodoplu V. and Meng T. H, “Minimum energy mobile wireless networks”, in: Proceedings of the IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 17, pp. 1333-1344, 1999.
- [8] Li N., Hou J. and Sha L., “Design and analysis of an mst-based topology control algorithm”, in: Proceedings of the IEEE Infocom, Vol. 4, pp. 1195-1206, May 2005.
- [9] Wattenhofer R., Li L., Bahl P. and Wang Y., “Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks”, in: Proceedings of the IEEE Infocom, Vol. 3, pp. 1388-1397, 2001.
- [10] Blough D., Leoncini M., Resta G. and Santi P., “The k-neighbors protocol for symmetric topology control in ad hoc networks”, in: Proceedings of the ACM MobiHoc 03, pp. 141-152, 2003.
- [11] Wattenhofer R. and Zollinger A., “XTC: a practical topology control algorithm for ad-hoc networks”. in: Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, pp. 2-16, 26-30 April 2004.
- [12] Venuturumilli A. and Minai A. A., “Obtaining Robust Wireless Sensor Networks Through Self-Organization of Heterogeneous Connectivity”, Proceedings of the 2006 International Conference on Complex Systems (ICCS'06), Boston, MA, June 2006.
- [13] S. Wolfram, “Cellular Automata”, Los Alamos Science, vol. 9, pp. 2-21, Fall 1983.
- [14] S. Wolfram, “Universality and complexity in cellular automata”, Physica D, no. 10, pp. 1-35, January 1984.
- [15] Narendra K. S. and Thathachar M. A. L, “Learning Automata: An Introduction”, Prentice Hall, 1989.
- [16] Beigy H. and Meybodi M. R., “A Mathematical Framework for Cellular Learning Automata”, Advances on Complex Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1-25, 2004.



شکل ۷) احتمال اتصال کامل گرههای شبکه برای پروتکل‌های CLATC و RAA_3L و RAA_2L و HOM در اندازه‌های مختلف شبکه آزمایش چهارم؛ در این آزمایش که نتایج آن در شکل ۸ دیده می‌شود، متوسط انرژی باقیمانده هر گره برای پروتکل‌های CLATC و RAA_3L و RAA_2L، CLATC همانگونه که دیده می‌شود متوسط انرژی باقیمانده گرههای شبکه پس از اتمام مرحله تعیین محدوده انتشار تقریباً نزدیک به انرژی اولیه گرهها (یک ژول) می‌باشد. به عبارت دیگر، با وجود آنکه انرژی مصرفی پروتکل CLATC تقریباً دو برابر پروتکل‌های RAA_3L و RAA_2L است (به علت انجام مرحله یادگیری در این پروتکل)، اما این انرژی مصرفی نسبت به کل انرژی هر گره (یک ژول) بسیار ناچیز است. افزایش انرژی باقیمانده با افزایش تعداد گرههای شبکه به علت کاهش محدوده انتقال در شبکه‌های با چگالی بیشتر است. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت که پروتکل‌های مورد بررسی بدون مصرف زیاد انرژی توپولوژی مناسبی را ارائه می‌کنند.



شکل ۸) متوسط انرژی باقیمانده هر گره برای پروتکل‌های CLATC و RAA_3L و RAA_2L در اندازه‌های مختلف شبکه

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله پروتکل کنترل توپولوژی بر اساس اتماتای یادگیر سلولی نامنظم پیشنهاد گردید. در این پروتکل گرهها با استفاده از اتماتای یادگیر سلولی نامنظم محدوده انتقال مناسب را از بین سه محدوده انتقال خود انتخاب می‌کنند. استفاده از اتماتای یادگیر این امکان را فراهم می‌کند که گرهها بتوانند تا جای ممکن محدوده انتقال کوچکتر را انتخاب کنند. پروتکل پیشنهادی CLATC شبیه-

- [19] Stauffer D. and Aharony A., “***Introduction to Percolation Theory***”, London: Taylor & Francis, 1994.
- [20] **The Network Simulator - ns-2.** <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [21] Heinzelman W., Chandrakasan A. and Balakrishnan H., “***Energy Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks***”, Intl. Conf. on System Sciences, Hawaii, vol. 2, pp. 3005-3014 January 2000.
- [17] Thathachar M. A. L. and Sastry P. S., “***Varieties of Learning Automata: An Overview***”, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. 32, No. 6, PP. 711-722, 2002.
- [18] Esnaashari M. and Meybodi M. R., “***Irregular Cellular Learning Automata and Its Application to Clustering in Sensor Networks***”, Proceedings of 15th Conference on Electrical Engineering (15th ICEE), Volume on Communication, Telecommunication Research Center, Tehran, Iran, May 15-17, 2007.

¹ Robustness

² Cellular Learning Automata based Topology Control

³ Santi

⁴ Rodoplu and Ming

⁵ Local Minimum Spanning Tree

⁶ Cone Based Topology Control

⁷ k -neighbors

⁸ Extreme Topology Control

⁹ Radius Adaptation Algorithm_2 Level

¹⁰ Radius Adaptation Algorithm_3 Level

¹¹ Cellular Automata

¹² Learning Automata

¹³ Cellular Learning Automata

¹⁴ Irregular Cellular Learning Automata

¹⁵ Whisperer

¹⁶ Shouter

¹⁷ Speaker

¹⁸ Collision