

مسیریابی مؤثر سازگار با انرژی در شبکه‌های

سیار موردی براساس منطق فازی شهودی

ارشام برومند سعید*^۱، مریم حسام پور^۲ و مرجان کوچکی رفسنجانی^۳

^۱بخش ریاضی محض، دانشکده ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۲بخش علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

شبکه‌های سیار موردی بدون هیچ زیرساختار ثابت و مدیریت مرکزی در هر محیطی که نیاز باشد، تشکیل می‌شوند. این شبکه‌ها به‌طور موقت شکل می‌گیرند و گره‌ها می‌توانند آزادانه حرکت کنند؛ به‌طوری‌که هر گره دارای انرژی محدودی است که به‌وسیلهٔ باتری تأمین می‌شود. به‌دلیل محدودیت انرژی، مسیریابی با انرژی کارآمد یکی از مسائل بسیار مهم و چالش برانگیز در این شبکه‌ها است؛ بنابراین بیش‌تر پژوهش‌گران به‌دنبال ارائهٔ روشی برای مسیریابی انرژی آگاه هستند. در این مقاله برای ارائه یک پروتکل مسیریابی انرژی آگاه از یک سامانه منطق فازی شهودی برای تنظیم پارامتر تمایل گره در پروتکل مسیریابی AODV کمک گرفته شده است. تصمیم برای شرکت کردن هر گره متحرک در مسیریابی به‌وسیله سامانه منطق فازی شهودی با مقدار انرژی باقیمانده و مقدار انرژی مصرفی گرفته می‌شود. به‌منظور ارزیابی، پروتکل پیشنهادی (IFEE-AODV) را با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی کرده و با روش‌های دیگر (AODV، DFES-AODV و SFES-AODV) مقایسه کرده‌ایم که نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، این پروتکل از نظر نرخ تحویل بسته و زمان عمر شبکه در مقایسه با سه روش دیگر از عملکرد خوبی برخوردار است.

واژگان کلیدی: شبکه‌های سیار موردی، مسیریابی، انرژی کارآمد، انرژی آگاه، سامانهٔ منطق فازی شهودی.

Intuitionistic fuzzy logic for adaptive energy efficient routing in mobile ad-hoc networks

Arsham Borumand Saeid*¹, Maryam Hesampour² & Marjan Kuchaki Rafsanjani³

¹Department of Pure Mathematics, Faculty of Mathematics and Computer, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

^{2,3}Department of Computer Science, Faculty of Mathematics and Computer, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract

In recent years, mobile ad-hoc networks have been used widely due to advances in wireless technology. These networks are formed in any environment that is needed without a fixed infrastructure or centralized management. Mobile ad-hoc networks have some characteristics and advantages such as wireless medium access, multi-hop routing, low cost development, dynamic topology and etc. In these networks the nodes formed temporarily and can move freely and each node has a limited energy that is supplied by the battery. Energy-efficient routing is one of the most important and challenging issues in these networks because of the limited energy. Therefore, most researchers seek to provide a method for energy aware routing. Soft computing methods help mobile ad-hoc networks, so that these networks would be worked more efficiently. One of these methods is using intuitionistic fuzzy logic that improves the evaluation parameters such as throughput. In this paper, an intuitionistic fuzzy logic system has been used for adjusting node willingness parameter in AODV protocol. Decision about participating in the routing of each mobile node is done by the intuitionistic fuzzy logic system with remaining energy and consumption energy of each node. In order to evaluate the proposed protocol entitled IFEE-AODV (Intuitionistic Fuzzy logic for Energy Efficient routing based AODV), we simulated IFEE-AODV by using MATLAB software and compared these results with AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector),

* Corresponding author

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

سال ۱۴۰۰ شماره ۱ پیاپی ۴۷

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲ • تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۹ • تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱ • نوع مطالعه: پژوهشی

DFES-AODV (Dynamic Fuzzy Energy State based AODV) and SFES-AODV (Static Fuzzy Energy State based AODV) protocols. The results show that this protocol in metrics of packet delivery ratio and network lifetime has better performance than other protocols.

Keywords: Mobile ad-hoc networks (MANETs), Routing, Energy efficient, Energy aware, Intuitionistic fuzzy logic system.

یک سامانه منطق فازی شهودی برای این منظور کمک گرفته شده است.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم کارهای مرتبط بررسی، در بخش سوم پیشنهادهای پژوهش ارائه و در بخش چهارم روش پیشنهادی ارائه می‌شود. بخش پنجم شامل شبیه‌سازی روش پیشنهادی و ارزیابی آن است و در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

۲- کارهای مرتبط

با توجه به ماهیت شبکه‌های سیار موردی از نظر ساختار و محدودیت‌های منابع و انرژی گره‌ها در این شبکه‌ها و با توجه به اینکه در بسیاری از موارد این باتری‌ها نمی‌توانند دوباره شارژ یا جایگزین شوند و همچنین با توجه به کاربردهای روزافزون آنها در زمینه‌های مختلف، طراحی پروتکل‌های مسیریابی کارا برای یک شبکه سیار موردی یکی از موضوعات اساسی در پژوهش‌های اخیر است.

الهاج^۶ و همکارانش [4] یک روش فازی را براساس طرح مسیریابی انرژی کارآمد سلسله‌مراتبی برای شبکه‌های MANET مقیاس بزرگ پیشنهاد کردند که هدف به بیشینه‌رساندن طول عمر شبکه است. هر گره در شبکه به‌وسیله انرژی باقی‌مانده، ترافیک و تحرک آن مشخص می‌شود. این روش یک کنترل‌کننده منطق فازی که ترکیبی از این پارامترهاست را با در نظر گرفتن همکاری بین آنها توسعه می‌دهد. مقدار به‌دست‌آمده اهمیت یک گره را نشان می‌دهد و این مقدار به‌دست‌آمده در شکل‌گیری و نگهداری شبکه استفاده می‌شود.

فیفات^۷ و اوساها^۸ [5] یک الگوریتم انتخاب مسیر با انرژی کارآمد را که هدفش تعادل میان بیشینه‌کردن طول عمر شبکه و کمینه‌کردن مصرف انرژی مسیر در شبکه‌های سیار موردی است، ارائه دادند. این روش مبتنی بر یادگیری تقویتی است که آن را مونت‌کارلو مبتنی بر سیاست (ONMC)^۹ نامیده‌اند.

چن^{۱۰} و همکارانش [6] یک روش فازی را برای پروتکل مسیریابی مبتنی بر تقاضا AODV^۱ با

۱- مقدمه

شبکه‌های سیار موردی (MANETs)^۱ شامل یک گروه از گره‌های مستقل با توانایی انتقال بی‌سیم هستند. در این شبکه‌ها هر گره می‌تواند با گره‌های متحرک دیگر با اتصالات بی‌سیم یا با تکیه بر گره‌های دیگر به‌عنوان مسیریاب^۲ در ارتباط باشد. تحرک گره‌ها باعث می‌شود، توپولوژی شبکه به‌سرعت و به‌صورت غیرقابل پیش‌بینی تغییر کند [1]. هر گره دارای یک محدوده رادیویی است و ارتباط بین گره‌ها بدون وجود زیرساخت ثابت انجام می‌شود. وظایف مختلف شبکه‌های سیار موردی بین گره‌های آن توزیع شده است. یکی از اهداف شبکه‌های سیار موردی گسترش پویایی در ناحیه‌ای است که مجموعه‌ای از گره‌ها ساختار مسیریابی شبکه را به‌صورت بی‌سیم شکل می‌دهند. این شبکه‌ها اغلب در مناطقی که پیشرفت سریع و پیکربندی دوباره پویا لازم است و از طرفی شبکه‌های سیمی در دسترس نیستند، کاربرد فراوان دارد [2]. در این شبکه‌ها هر گره دارای توان انرژی محدود است و این انرژی توسط باتری تأمین می‌شود. فعالیت‌های موجود در شبکه برای گره‌ها مانند ارسال و دریافت بسته‌های داده یا بسته‌های کنترلی نیازمند مصرف انرژی است. در بسیاری از موارد این باتری‌ها نمی‌توانند دوباره شارژ یا جایگزین شوند. علاوه‌براین فرسودگی باتری گره‌ها ممکن است نه‌تنها منجر به اتصالات کم، بلکه همچنین می‌تواند موجب بخش‌بندی^۳ شبکه شود. به‌منظور توسعه و گسترش طول عمر MANET، پروتکل‌های مسیریابی انرژی آگاه پیشنهاد شده است. سه روش اصلی در ادبیات مرتبط با آن شناخته شده است؛ نخست، بیشینه‌کردن طول عمر مسیریابی که به‌دنبال تعادل مصرف انرژی در میان گره‌های متحرک است. دوم، روش ذخیره انرژی^۴ که به‌دنبال کمینه‌کردن اتلاف انرژی در طول دوره عدم فعالیت است. سوم، روش کنترل انرژی^۵ است که در آن گره‌ها انرژی انتقالشان را تنظیم می‌کنند که یک سازش خوب بین اهداف پیدا شود: به بیشینه‌رساندن اتصال به شبکه و به کمینه‌رساندن اتلاف انرژی [3]. در این مقاله از

⁶ El-Hajj

⁷ Phiphat

⁸ Usaha

⁹ On-policy Monte Carlo (ONMC)

¹⁰ Chen

¹ Mobile Ad hoc Networks (MANETs)

² Router

³ Partitioning

⁴ Power-save

⁵ Power-control

برخلاف روش فازی، مجموع μ_A و ϑ_A الزاماً برابر با یک نمی‌شود. در صورتی که $\vartheta_A(x) + \mu_A(x)$ برابر با یک شود، مجموعه فازی شهودی به یک مجموعه فازی معمولی تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر منطق فازی سنتی یک حالت خاصی از منطق فازی شهودی است و آن هنگامی است که "درجه عدم عضویت" برابر با "درجه عضویت-۱" باشد، یعنی رابطه زیر برقرار باشد [9]:

$$\forall x \in X, \mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3)$$

برای مجموعه‌های فازی شهودی درجه عدم قطعیت π_x برای عنصر x با رابطه زیر تعریف می‌شود [10]:

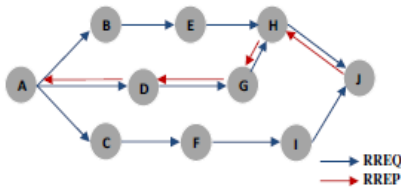
$$\pi_x = 1 - \mu_x - \vartheta_x; \pi_x: X \rightarrow [0,1] \quad (4)$$

بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که مجموعه‌های فازی، مجموعه‌های فازی شهودی هستند که در آنها درجه عدم قطعیت برابر با صفر باشد ($0 = \pi_x$).

مجموعه‌های فازی شهودی و تعمیم‌های آن کاربردهای زیادی در نظریه تصمیم و علوم رایانه دارد [12].

۳-۲- پروتکل مسیریابی AODV

پروتکل مسیریابی AODV یک پروتکل مسیریابی واکنشی مبتنی بر درخواست است. گره‌ای که به یک مسیر روی یک مقصد معین نیاز دارد یک بسته درخواست مسیر (RREQ) را پخش می‌کند. در دریافت یک RREQ یک گره که یک مسیر معتبر را حفظ می‌کند، می‌تواند به‌طور مستقیم پاسخ دهد. در غیر این صورت، RREQ دوباره پخش می‌شود؛ این عمل تکرار می‌شود تا زمانی که یک مسیر پیدا شود. گره موردنظر، یک بسته پاسخ مسیر (RREP) را به سمت گره منبع می‌فرستد. به‌طوری‌که RREP مسیر معکوس را دنبال می‌کند.



(شکل-۱): پروتکل مسیریابی AODV [3]
(Figure-1): AODV routing protocol [3]

در ادامه به معرفی یک پروتکل مسیریابی جدید به‌منظور کشف مسیر با انرژی کارآمد پرداخته می‌شود. پروتکل پیشنهادی از منطق فازی شهودی برای به‌دست‌آوردن ارزش تمایل گره برای شرکت در پروتکل مسیریابی AODV استفاده می‌کند.

در نظر گرفتن انرژی، پیشنهاد کردند. این روش که FPSP-AODV نامگذاری شده، روشی است که کوتاه‌ترین مسیر و اتصال طولانی به شبکه را با استفاده از کمینه‌کردن تعداد گام‌ها، پهنای باند و انرژی باقیمانده شناسایی می‌کند.

هایرمت^۳ و جاشی^۴ [7] یک پروتکل جدید را که باعث صرفه‌جویی در انرژی گره‌های متحرک و در نهایت افزایش طول عمر MANET می‌شود، ارائه دادند؛ به‌طوری‌که این پروتکل، یک پروتکل مسیریابی مبتنی بر تقاضا براساس انرژی آستانه فازی سازگار (AFTE)^۵ است. چتیبای^۶ و چیتی^۷ [8] یک سیستم منطق فازی سوگنو^۸ مرتبه صفر را برای تنظیم پارامتر تمایل^۹ گره برای شرکت در مسیریابی در پروتکل مسیریابی OLSR^{۱۰} پیشنهاد کردند. تصمیم برای شرکت هر گره متحرک در مسیریابی به‌وسیله سامانه منطق فازی با مقدار انرژی باقی‌مانده و طول عمر باقی‌مانده مورد انتظار، گرفته می‌شود.

۳- پیش‌نیازهای پژوهش

۳-۱- منطق فازی شهودی

مفهوم مجموعه‌های فازی شهودی را آتاناسف^{۱۱} به منزله تعمیم مجموعه‌های فازی معرفی کرد [9-11]. اگر X یک مجموعه ثابت ناتهی باشد، مجموعه فازی شهودی A در مجموعه مرجع X به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A := \{ \langle x, \mu_A(x), \vartheta_A(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (1)$$

که در آن تابع $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ و $\vartheta_A: X \rightarrow [0,1]$ به‌ترتیب درجه عضویت و درجه عدم عضویت عنصر $x \in X$ را تعیین می‌کند. به‌ازای هر $x \in X$ برای μ_A و ϑ_A داریم:

$$0 \leq \mu_A(x) + \vartheta_A(x) \leq 1 \quad (2)$$

با توجه به دو فرمول مطرح‌شده در بالا، در منطق فازی شهودی، عدم قطعیت با استفاده همزمان تابع تعلق و تابع عدم تعلق یک مجموعه (که دیگر به‌الزام متمم یکدیگر نیستند) توصیف می‌شوند.

¹ Ad hoc On demand Distance Vector (AODV)

² Fuzzy Path Selection Power-based AODV (FPSP-AODV)

³ Hiremath

⁴ Joshi

⁵ Adaptive Fuzzy Threshold Energy (AFTE)

⁶ Chettibi

⁷ Chikhi

⁸ Sugeno fuzzy logic system

⁹ Willingness

¹⁰ Optimized Link State Routing (OLSR)

¹¹ Atanassov

¹² Route Request (RREQ)

¹³ Route Reply (RREP)

۴- پروتکل پیشنهادی IFEE-AODV

پروتکل مسیریابی پیشنهادی از یک سامانه منطق فازی شهودی برای تنظیم پارامتر تمایل گره برای شرکت در مسیریابی در پروتکل مسیریابی AODV استفاده می‌کند. تصمیم برای شرکت در مسیریابی در هر گره متحرک به وسیله سامانه منطق فازی شهودی با مقدار انرژی باقی‌مانده و مقدار انرژی مصرفی گرفته می‌شود. پروتکل پیشنهادی می‌تواند در مواردی که بهره‌وری انرژی اهمیت ویژه‌ای دارد، مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۱- روند کار پروتکل IFEE-AODV

با توجه به ماهیت شبکه‌های سیار موردی از نظر ساختار و محدودیت‌های منابع و انرژی گره‌ها در این شبکه‌ها، انرژی گره به یکی از پارامترهای مهم در این نوع شبکه‌ها تبدیل شده است. از آنجایی که بحث روی انرژی گره‌ها است، در پروتکل پیشنهادی برای هر گره دو پارامتر تعریف می‌شود: یکی انرژی باقی‌مانده و دیگری انرژی مصرفی. شکل (۲) روند کار پروتکل IFEE-AODV و شکل (۳) جزئیات الگوریتم پروتکل IFEE-AODV را نشان می‌دهد.

کنترل‌کننده فازی شهودی برای مسیریابی با انرژی کارآمد در شبکه‌های MANET پیشنهاد شده است. کنترل‌کننده دو ورودی انرژی باقی‌مانده و انرژی مصرفی را می‌گیرد و تمایل گره برای شرکت در مسیریابی به‌عنوان خروجی کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود.

گام ۱- S گره منبع است که n همسایه با انرژی باقیمانده RE_i و انرژی مصرفی $CE_i, i=1,2,\dots,n$ دارد. انرژی باقیمانده در ابتدا برای هر گره برابر با ۱۰ ژول و انرژی مصرفی صفر ژول است.
گام ۲- برای گره S، مقدار تمایل گره با استفاده از روش ریاضی فازی شهودی که در ادامه توضیح داده شده است، محاسبه می‌گردد.
گام ۳- گره S مقدار تمایل گره را برای تمام همسایه‌هایش محاسبه می‌کند.
گام ۴- گره S پس از تعبیه مقدار تمایل خود در بسته درخواست مسیر، بسته درخواست مسیر را به گره‌ای که بیشترین تمایل را دارد برای ایجاد اتصال به گره مقصد D منتشر می‌کند.
گام ۵- گره میانی بسته درخواست مسیر را بعد از تعویض مقدار تمایل تعبیه شده در آن به گره‌ای که بیشترین تمایل را دارد ارسال می‌کند.
گام ۶- گره مقصد معکوس بسته RREP را ایجاد کرده و به سمت گره مبدأ ارسال می‌کند.
گام ۷- گره مقصد میزان تمایل گره‌ها در مسیر را جمع کرده و در بسته RREP قرار می‌دهد.
گام ۸- در نهایت مسیری انتخاب می‌شود که مجموع تمایل گره‌هایش از همه بیشتر است.

(شکل-۳): الگوریتم پروتکل IFEE-AODV
(Figure-3): Algorithm of IFEE-AODV protocol

۴-۲-۱- فازی‌ساز شهودی

برای تبدیل ارزش‌های قطعی به ارزش‌های زبانی، فازی‌ساز شهودی برای هر دو ورودی استفاده می‌شود. اعدادی که برای دو ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است با توجه به شبیه‌سازی به‌دست آمده‌اند. برای ورودی انرژی باقی‌مانده، محدوده توابع عضویت و عدم عضویت بین صفر تا ده (۰-۱۰) است. محدوده به سه تابع عضویت تقسیم می‌شود. توابع عضویت انرژی باقیمانده "کم" (۰-۴)، "متوسط" (۳-۸) و "زیاد" (۷-۱۰) است. برای انرژی مصرفی محدوده توابع عضویت و عدم عضویت بین صفر تا ۰/۰۵ (۰-۰/۰۵) است. محدوده به سه تابع عضویت تقسیم می‌شود. توابع عضویت انرژی مصرفی "کم" (۰-۰/۰۱)، "متوسط" (۰/۰۰۵-۰/۰۳۵) و "زیاد" (۰/۰۳-۰/۰۵) است [3]. توابع عدم عضویت انرژی باقی‌مانده "کم" (۰-۴)، "متوسط" (۳-۸) و "زیاد" (۷-۱۰) هستند و توابع عدم عضویت انرژی مصرفی "کم" (۰-۰/۰۱)، "متوسط" (۰/۰۰۵-۰/۰۳۵) و "زیاد" (۰/۰۳-۰/۰۵) است. این مجموعه‌های فازی شهودی به‌عنوان اعداد فازی شهودی دوزنقه‌ای در شکل‌های (۴، ۵، ۶، ۷) نشان داده شده است.

- ۱- شروع
- ۲- مقدار انرژی باقی‌مانده در ابتدا برای هر گره برابر با ۱۰ ژول است.
- ۳- مقدار انرژی مصرفی در ابتدا برای هر گره برابر با صفر ژول است.
- ۴- محاسبه انرژی مصرفی برای هر گره.
- ۵- محاسبه انرژی باقیمانده برای هر گره.
- ۶- محاسبه درجه عضویت و عدم عضویت انرژی مصرفی.
- ۷- محاسبه درجه عضویت و عدم عضویت انرژی باقیمانده.
- ۸- محاسبه درجه عضویت و عدم عضویت تمایل گره برای شرکت در مسیریابی.
- ۹- به کاربردن قوانین فازی شهودی و محاسبه مجموعه‌های فازی خروجی استنباط شده از مجموعه‌های ورودی.
- ۱۰- غیرفازی‌سازی: محاسبه ارزش دقیق خروجی (تمایل گره برای شرکت در مسیریابی) با استفاده از نتایج مجموعه‌های فازی.
- ۱۱- پایان.

(شکل-۲): روند کار پروتکل IFEE-AODV
(Figure-2): Workflow of IFEE-AODV protocol

۴-۲- سامانه استنتاج فازی شهودی-IFEE-AODV

سامانه از واحدهای زیر تشکیل شده است:

- فازی‌ساز شهودی
- موتور استنتاج فازی شهودی
- غیرفازی‌ساز شهودی

¹ Intuitionistic Fuzzy logic for Energy Efficient routing based AODV (IFEE-AODV)

$$\mu_{low}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 0.8 & 0 \leq x \leq 3 \\ -0.8(x-4) & 3 \leq x \leq 4 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{medium}(x) = \begin{cases} 0 & x < 3 \\ 0.8(x-3) & 3 \leq x < 4 \\ 0.8 & 4 \leq x \leq 7 \\ -0.8(x-8) & 7 \leq x \leq 8 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{high}(x) = \begin{cases} 0 & x < 7 \\ 0.8(x-7) & 7 \leq x \leq 8 \\ 0.8 & 8 \leq x \leq 10 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (7)$$

توابع عدم عضویت برای انرژی باقی‌مانده با توجه به شکل

(۶) به صورت زیر است:

$$\vartheta_{low}(x) = \begin{cases} 0.8 & x < 0 \\ 0.1 & 0 \leq x \leq 3 \\ 0.7(x-3) + 0.1 & 3 \leq x \leq 4 \\ 0.8 & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

$$\vartheta_{medium}(x) = \begin{cases} 0.8 & x < 3 \\ -0.7(x-4) + 0.1 & 3 \leq x < 4 \\ 0.1 & 4 \leq x \leq 7 \\ 0.7(x-7) + 0.1 & 7 \leq x \leq 8 \\ 0.8 & otherwise \end{cases} \quad (9)$$

$$\vartheta_{high}(x) = \begin{cases} 0.8 & x < 7 \\ -0.7(x-8) + 0.1 & 7 \leq x \leq 8 \\ 0.1 & 8 \leq x \leq 10 \\ 0.1 & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

توابع عضویت برای انرژی مصرفی با توجه به شکل (۵) به

شرح زیر است:

$$\mu_{low}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 0.8 & 0 \leq x \leq 0.005 \\ -160 * (x - 0.01) & 0.005 \leq x \leq 0.01 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{medium}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.005 \\ 160 * (x - 0.005) & 0.005 \leq x < 0.01 \\ 0.8 & 0.01 \leq x \leq 0.03 \\ -160 * (x - 0.035) & 0.03 \leq x \leq 0.035 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{high}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.03 \\ 160 * (x - 0.03) & 0.03 \leq x \leq 0.035 \\ 0.8 & 0.035 \leq x \leq 0.05 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (13)$$

توابع عدم عضویت مربوط به انرژی مصرفی با توجه به

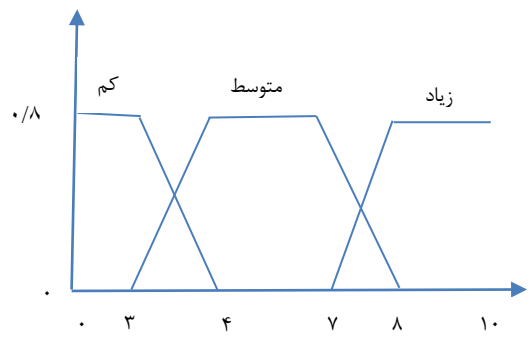
شکل (۷) به صورت زیر است:

$$\vartheta_{low}(x) = \begin{cases} 0.8 & x < 0 \\ 0.1 & 0 \leq x \leq 0.005 \\ 140 * (x - 0.01) + 0.8 & 0.005 \leq x \leq 0.01 \\ 0.8 & otherwise \end{cases} \quad (14)$$

$$\vartheta_{medium}(x) = \begin{cases} 0.8 & x < 0.005 \\ -140 * (x - 0.01) + 0.1 & 0.005 \leq x < 0.01 \\ 0.1 & 0.01 \leq x \leq 0.03 \\ 140 * (x - 0.03) + 0.1 & 0.03 \leq x \leq 0.035 \\ 0.8 & otherwise \end{cases} \quad (15)$$

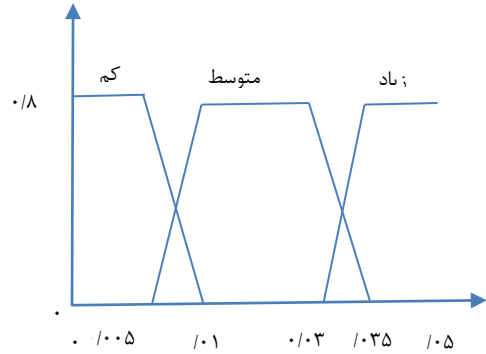
(۱۶)

$$\vartheta_{high}(x) = \begin{cases} 0.8 & x < 0.03 \\ -140 * (x - 0.03) + 0.8 & 0.03 \leq x \leq 0.035 \\ 0.1 & 0.035 \leq x \leq 0.05 \\ 0.1 & otherwise \end{cases}$$



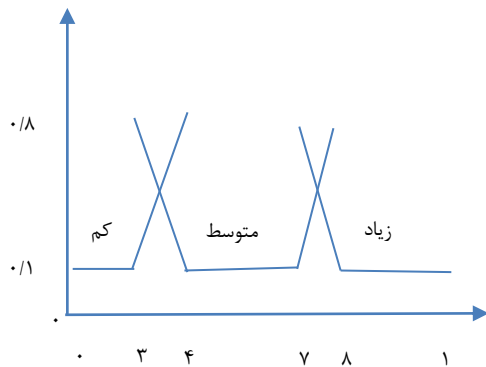
(شکل-۴): تابع عضویت انرژی باقی‌مانده

(Figure-4): Membership function of remaining energy



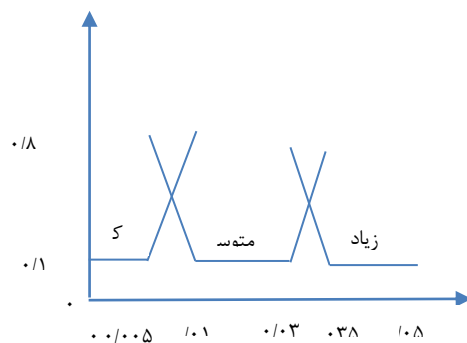
(شکل-۵): تابع عضویت انرژی مصرفی

(Figure-5): Membership function of consumption energy



(شکل-۶): تابع عدم عضویت انرژی باقیمانده

(Figure-6): Non-membership function of remaining energy



(شکل-۷): تابع عدم عضویت انرژی مصرفی

(Figure-7): Non-membership function of consumption energy

توابع عضویت برای انرژی باقی‌مانده با توجه به شکل (۴) به صورت زیر است:

$$\vartheta_{verylow}(x) = \begin{cases} 2.33 * x + 0.1 & 0 \leq x \leq 0.3 \\ 0.8 & otherwise \end{cases} \quad (21)$$

$$\vartheta_{low}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 0.1 & 0.1 \leq x \leq 0.3 \\ (1.75) * (x - 0.3) + 0.1 & 0.3 \leq x \leq 0.7 \\ 0.8 & otherwise \end{cases} \quad (22)$$

$$\vartheta_{medium}(x) = \begin{cases} -1.75 * (x - 0.7) + 0.1 & 0.3 \leq x \leq 0.7 \\ 0.8 & otherwise \end{cases} \quad (23)$$

$$\vartheta_{high}(x) = \begin{cases} (-2.33) * (x - 1) + 0.1 & 0.7 \leq x \leq 1 \\ 0.8 & otherwise \end{cases} \quad (24)$$

۲-۲-۴- موتور استنتاج فازی شهودی

موتور استنتاج فازی شهودی شبیه انسان استدلال می‌کند که به وسیله قوانین بیان می‌شود. متغیرهای فازی شهودی به موتور استنتاج فازی شهودی با ۹ قانون داده می‌شود و دستگاه استنتاج فازی شهودی بر اساس روش استنتاج ممدانی-لارنس کار می‌کند [13,14] و قوانین به صورت جملات اگر-آنگاه هستند.

قوانین استفاده شده به شکل زیر هستند:

قانون ۱: اگر انرژی باقی‌مانده کم و انرژی مصرفی زیاد است، آن‌گاه تمایل گره خیلی کم است.

قانون ۲: اگر انرژی باقی‌مانده کم و انرژی مصرفی کم است، آن‌گاه تمایل گره کم است.

قانون ۳: اگر انرژی باقی‌مانده زیاد و انرژی مصرفی زیاد است، آن‌گاه تمایل گره متوسط است.

قانون ۴: اگر انرژی باقی‌مانده زیاد و انرژی مصرفی کم است، آن‌گاه تمایل گره زیاد است.

قانون ۵: اگر انرژی باقی‌مانده کم و انرژی مصرفی متوسط است، آن‌گاه تمایل گره کم است.

قانون ۶: اگر انرژی باقی‌مانده زیاد و انرژی مصرفی متوسط است، آن‌گاه تمایل گره کم است.

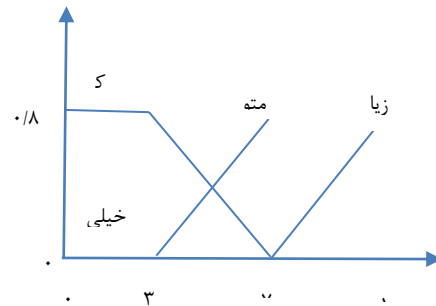
قانون ۷: اگر انرژی باقی‌مانده متوسط و انرژی مصرفی متوسط است، آن‌گاه تمایل گره کم است.

قانون ۸: اگر انرژی باقی‌مانده متوسط و انرژی مصرفی کم است، آن‌گاه تمایل گره متوسط است.

قانون ۹: اگر انرژی باقی‌مانده متوسط و انرژی مصرفی زیاد است، آن‌گاه تمایل گره کم است.

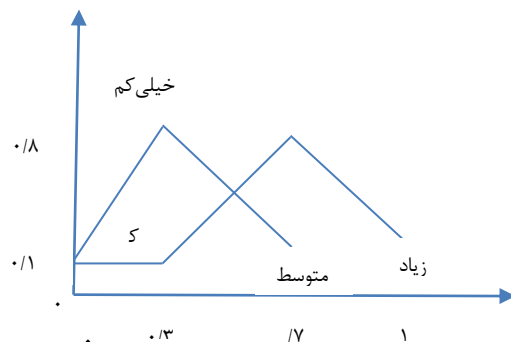
در سامانه استنتاج فازی شهودی هر قانون در صورتی فعال^۱ می‌شود که کمترین^۲ مقدار عضویت دو ورودی مخالف با صفر باشد و بیشترین^۳ مقدار عدم عضویت دو ورودی مخالف با ۰/۸ باشد.

چهار تابع عضویت فازی مثلثی و دوزنقه‌ای برای خروجی تمایل گره برای شرکت در مسیریابی وجود دارد. محدوده تمایل گره بین صفر و یک (۰-۱) است. توابع عضویت تمایل گره "خیلی کم" (۰-۰/۳)، "کم" (۰/۳-۰/۷)، "متوسط" (۰/۳-۰/۷) و "زیاد" (۰/۷-۱) است [3]. توابع تعریف شده این مجموعه‌های فازی در شکل (۸) نشان داده شده است. متناظر با توابع عضویت چهار تابع عدم عضویت نیز وجود دارد. توابع عدم عضویت متناظر با "خیلی کم"، "کم"، "متوسط" و "زیاد" در شکل (۹) نشان داده شده است.



(شکل-۸): تابع عضویت تمایل گره

(Figure-8): Membership function of node willingness



(شکل-۹): تابع عدم عضویت تمایل گره

(Figure-9): Non-membership function of node

توابع عضویت برای تمایل گره به شکل ریاضی با توجه به شکل (۸) به شرح زیر است:

$$\mu_{verylow}(x) = \begin{cases} -2.66 * (x - 0.3) & 0 \leq x \leq 0.3 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu_{low}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 0.8 & 0 \leq x \leq 0.3 \\ -2 * (x - 0.7) & 0.3 \leq x \leq 0.7 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu_{medium}(x) = \begin{cases} 2 * (x - 0.3) & 0.3 \leq x \leq 0.7 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (19)$$

$$\mu_{high}(x) = \begin{cases} 2.66 * (x - 0.7) & 0.7 \leq x \leq 1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (20)$$

توابع عدم عضویت مربوط به تمایل گره به شکل ریاضی با توجه به شکل (۹) به صورت زیر است:

¹ Fire

² Min

³ Max

غیرفازی سازی واحد نهایی از موتور استنتاج فازی شهودی است که مقدار فازی تمایل گره را می گیرد و خروجی نهایی را تولید می کند. چندین روش برای غیرفازی سازی وجود دارد که اینجا از روش^۱ TS استفاده شده که فرمول آن به شکل زیر است [15]:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^M x^j ((1-\pi_{Aj})\mu_{Aj} + \mu_{Aj}^{\pi_{Aj}})}{\sum_{j=1}^M ((1-\pi_{Aj})\mu_{Aj} + \mu_{Aj}^{\pi_{Aj}})} \quad (25)$$

به طوریکه X خروجی نهایی سامانه فازی شهودی، x^j مقادیر فازی خروجی و M تعداد مقادیر فازی خروجی است.

$$\mu_{Aj} = \bigwedge_{i=1}^n \mu_{Ai}(x) \quad (26)$$

$$\vartheta_{Aj} = \bigvee_{i=1}^n \mu_{Ai}(x) \quad (27)$$

$$\pi_{Aj} = 1 - \mu_{Aj} - \vartheta_{Aj} \quad (28)$$

۳-۴- فرآیند کشف مسیر

زمانی که گره مبدأ برای ارسال داده مسیری را به مقصد خاص نیاز دارد؛ اما مسیری به مقصد مورد نظر در جدول مسیریابی این گره وجود نداشته باشد، عملیات کشف مسیر توسط گره مبدأ آغاز می شود. این گره برای کشف مسیر بسته RREQ را پخش فراگیر می کند. این بسته حاوی فیلدهای (شناسه مبدأ، شناسه مقصد، میزان تمایل پیوست شده با گره های میانی و...) است. هر گره در طول مسیر بعد از دریافت RREQ، میزان تمایل خود را در فیلد مربوط به میزان تمایل الحاق شده با گره های میانی در بسته RREQ قرار می دهد؛ سپس میزان تمایل گره همسایه های خود را محاسبه و بسته RREQ را به گره های که تمایل بیشتری دارند، ارسال می کند. گره مقصد معکوس بسته RREP را ایجاد و آن را به صورت تک بخشی به سمت گره مبدأ ارسال می کند. این گره میزان تمایل گره ها در مسیر را جمع می کند و در بسته RREP قرار می دهد. در نهایت مسیری انتخاب می شود که مجموع تمایل گره های آن از همه بیشتر است.

۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش قابلیت و کارایی پروتکل پیشنهادی (IFEE-AODV) را مورد بررسی قرار داده و این پروتکل با پروتکل های AODV، DFES-AODV و SFES-AODV مقایسه و هم چنین پروتکل پیشنهادی را در شبکه با تعداد

^۱ Takagi Sugani (TS)

گره های مختلف مورد بررسی قرار داده و ارزیابی نتایج انجام خواهد شد. برای شبیه سازی پروتکل از نرم افزار متلب استفاده شده است. پارامترها و تنظیمات پیش فرض برای شبیه سازی با استفاده از نرم افزار متلب/ شبیه ساز True Time در جدول (۱) ارائه شده است.

(جدول ۱): پارامترها و تنظیمات شبیه سازی

(Table 1): Simulation parameters and setting

مقادیر	پارامترها
مربع ۱۰۰ × ۱۰۰ مترمربع	محدوده ناحیه شبیه سازی
۱ متر بر ثانیه	سرعت گره ها
۰/۱ ثانیه	بازه زمانی بین انتقال ترافیک
۵۱۲ بایت	اندازه بسته ها
۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰	تعداد گره ها
۱۰ ژول	انرژی اولیه
۱ مگابایت بر ثانیه	پهنای باند
CBR	نوع ترافیک

۱-۵- معیارها

از معیارهای زیر برای مقایسه کارایی IFEE-AODV با DFES-AODV و AODV و SFES-AODV استفاده شده است.

- نرخ تحویل بسته (PDR)^۲: نسبت تعداد بسته هایی که به طور موفق توسط گره مقصد دریافت شده به تعداد کل بسته هایی که از هر گره برای آن مقصد ارسال می شود.

- تأخیر انتها به انتها (EED)^۳: اختلاف بین زمانی که یک بسته داده به وسیله گره مقصد دریافت شده و زمانی که این بسته توسط گره مبدأ فرستاده شده است. این اختلاف ناشی از این است که گره مبدأ به دلیل نداشتن مسیری به مقصد، نیاز به انجام کشف مسیر دارد و بسته داده باید تا کشف مسیر در گره مبدأ منتظر بماند.

- زمانی که نخستین گره انرژی خود را از دست می دهد (FND)^۴.

- مدت زمانی که نیمی از گره ها انرژی خود را از دست می دهند (THNED)^۵: زمانی که شبکه می بیند پنجاه درصد (نیمی) از گره ها انرژی شان تخلیه شده است.

- بازده^۶: اگر در زمان t تعداد l بیت به یک گره تحویل داده شود، بازده برای آن گره به صورت $\frac{l}{t}$ محاسبه می شود.

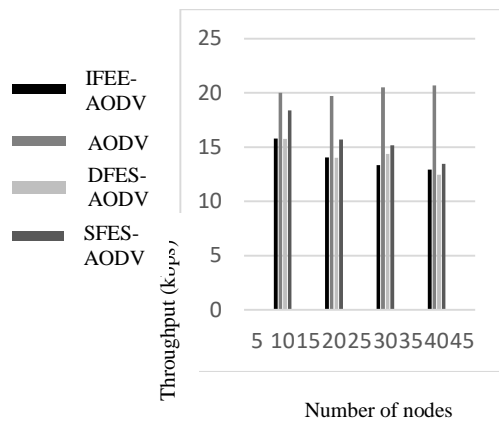
^۲ Packet Delivery Ratio (PDR)

^۳ End-to-End-Delay (EED)

^۴ First Node Die (FND)

^۵ Time to Half Nodes Energy Die (THNED)

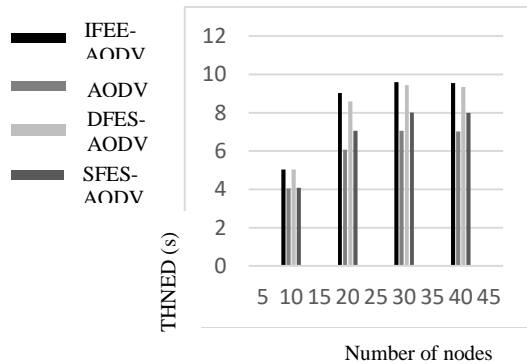
^۶ Throughput



(شکل-۱۲): مقایسهٔ بازده IFEE-AODV با DFES-AODV ، AODV و SFES-AODV

IFEE-AODV و AODV

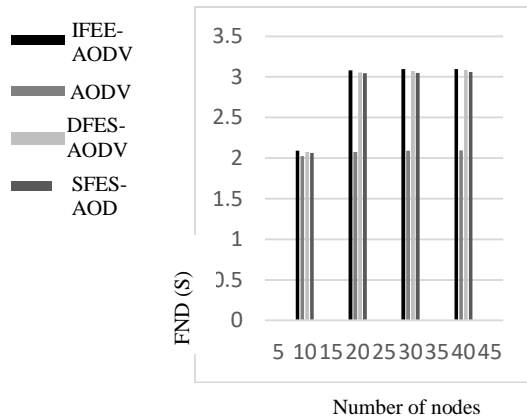
(Figure-12): Comparison of throughput IFEE-AODV with DFES-AODV ، AODV and SFES-AODV



(شکل-۱۳): مقایسهٔ معیار THNED پروتکل IFEE-AODV با DFES-AODV ، AODV و SFES-AODV

IFEE-AODV و DFES-AODV

(Figure-13): Comparison of THNED of IFEE-AODV with DFES-AODV ، AODV and SFES-AODV



(شکل-۱۴): مقایسهٔ معیار FND پروتکل IFEE-AODV با DFES-AODV ، AODV و SFES-AODV

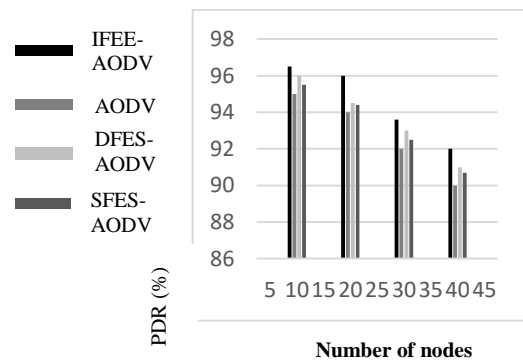
IFEE-AODV و DFES-AODV

(Figure-14): Comparison of FND of IFEE-AODV with DFES-AODV ، AODV and SFES-AODV

شکل‌های (۱۳ و ۱۴)، زمانی که نیمی از گره‌ها انرژی خود را از دست می‌دهند و زمانی را که نخستین گره انرژی خود را از دست می‌دهد، به ترتیب نشان می‌دهند. این دو معیار در پروتکل پیشنهادی بیشتر از دو

همان‌طور که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، نرخ تحویل بستهٔ پروتکل پیشنهادی (IFEE-AODV) از نرخ تحویل بستهٔ سه پروتکل دیگر بیشتر است. در هر مرحله براساس انرژی مصرفی و انرژی باقی‌مانده تمایل گره برای شرکت در مسیریابی به دست می‌آید و چون گره‌ای انتخاب می‌شود که تمایل بیشتری دارد، در نتیجه تعداد بسته‌هایی که به مقصد تحویل داده می‌شود، بیشتر است.

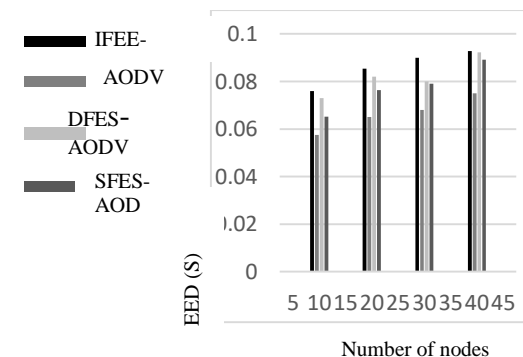
همان‌طور که توضیح داده شد، برای محاسبهٔ تمایل گره از سامانه منطق فازی شهودی استفاده می‌شود که شامل محاسبهٔ توابع عضویت و عدم عضویت برای هر یک از ورودی‌ها و خروجی، قوانین فازی و غیرفازی‌سازی است. این محاسبات باعث می‌شود تأخیر انتهایی‌ها در روش پیشنهادی کمی بیشتر از دو روش دیگر شود که زیاد قابل ملاحظه نیست؛ در نتیجه بازده روش پیشنهادی کمی از دو روش دیگر کمتر می‌شود؛ اما مسیری که پیدا می‌شود از نظر انرژی بهینه است. تأخیر انتها به انتها و بازده به ترتیب در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است.



(شکل-۱۰): مقایسهٔ نرخ تحویل بسته IFEE-AODV با DFES-AODV ، AODV و SFES-AODV

IFEE-AODV و DFES-AODV

(Figure-10): Comparison of packet delivery ratio IFEE-AODV with DFES-AODV ، AODV and SFES-AODV



(شکل-۱۱): مقایسهٔ تأخیر انتها به انتها IFEE-AODV با DFES-AODV ، AODV و SFES-AODV

IFEE-AODV و DFES-AODV

(Figure-11): Comparison of end-to-end delay IFEE-AODV with DFES-AODV ، AODV and SFES-AODV

می‌شود که شامل محاسبهٔ توابع عضویت، عدم عضویت، قوانین فازی و غیرفازی‌سازی است. این محاسبات باعث می‌شود که تأخیر انتهابه‌انتهای کمی بیشتر از سه پروتکل دیگر شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پروتکل پیشنهادی توانایی پیدا کردن مسیر با انرژی کارآمد را دارد.

7- References

۷- مراجع

- [1] H. M. Sun, C. H. Chen and Y. F. Ku, "A novel acknowledgment-based approach against collude attacks in MANET", *Journal of Expert System with Application*, Vol. 39, pp. 7968-7975, 2012.
- [2] M. Ilyas, *The Hand book of Ad Hoc Wireless Networks*, CRC press, 2002.
- [3] S. Chettibi and S. Chikhi, "Dynamic fuzzy logic and reinforcement learning for adaptive energy efficient routing in mobile ad-hoc networks", *Applied Soft Computing*, Vol. 38, pp. 321-328, 2016.
- [4] W. El-Hajj, D. Kountanis, A. Al-Fuqaha and M. Guizani, "A fuzzy based hierarchical energy efficient routing protocol for large scale mobile ad hoc networks", *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Istanbul, Turkey*, pp. 3585-3590, June 11-15, 2006.
- [5] W. Naruephiphat and W. Usaha, "Balancing tradeoffs for energy efficient routing in MANETs based on reinforcement learning", *Proceedings of the 67th IEEE Vehicular Technology Conference, Singapore*, pp. 2361-2365, May 11-14, 2008.
- [6] N. Chen, Q. Zhang and S. Jin, A fuzzy path selection power-based for MANET, *Fuzzy Information and Engineering*, B Cao, T. Li, C. Zhang (Eds.), Springer, Berlin Heidelberg, pp. 1283-1291, 2009.
- [7] P. Hiremath and S. Joshi, "Energy efficient routing protocol with adaptive fuzzy threshold energy for MANETs", *International Journal of Computer Networks and Wireless Communications*, Vol. 2, No. 3, pp. 402-407, 2012.
- [8] S. Chettibi and S. Chikhi, "An adaptive energy aware routing protocol for MANETs using zero-order sugeno fuzzy system", *International Journal of Computer Science*, Vol. 10, No. 1, pp. 136-141, 2013.
- [9] K. T. Atanassov, *Intuitionistic fuzzy logic: Theory and Applications*, Studies in Fuzziness and soft computing Heildberg, Physica-verlag, 1999.

روش دیگر است. هر چه انرژی مصرفی کمتر و انرژی باقیمانده بیشتر باشد، تمایل گره برای شرکت در مسیریابی نیز بیشتر است؛ در نتیجه طول عمر نیز افزایش می‌یابد. به این دلیل که هر دفعه گره‌ای انتخاب می‌شود که تمایل بیشتری دارد؛ پس مدت‌زمان بیشتری طول می‌کشد که گره‌ها انرژی‌شان صفر شود.

در حالت کلی، با افزایش تعداد گره‌ها، تأخیر نیز بالا می‌رود. زیرا هر گام می‌تواند سهمی از تأخیر در ترافیک پیش‌رو داشته باشد؛ علاوه‌براین، گره‌های شبکه که بیشتر می‌شود، تراکم نیز بیشتر می‌شود و می‌تواند مسیریابی بیشتری را پوشش دهد. در نتیجه با افزایش تأخیر، بازده نیز کم می‌شود. نرخ تحویل بسته، زیاد تغییر نمی‌کند، زیرا با افزایش تعداد گره‌ها نیز مسیر پیدا می‌شود. در حالت کلی با افزایش تعداد گره‌ها، نرخ تحویل بسته کمی کمتر می‌شود. با افزایش تعداد گره‌ها، زمانی که نخستین گره و هم‌چنین زمانی که نیمی از گره‌ها انرژی‌شان تمام می‌شود، بیشتر می‌شود ولی از یک جایی به بعد این زمان ثابت و یا کمتر می‌شود. هر چقدر مدت‌زمانی که نخستین گره و یا نیمی از گره‌ها در شبکه از بین می‌روند، بیشتر باشد، طول عمر شبکه نیز بیشتر است.

۶- نتیجه‌گیری

از آن‌جایی که گره‌ها در شبکه‌های ویژه سیار باتری‌ها را به‌عنوان منبع تغذیه استفاده می‌کنند، فعالیت‌های گره در شبکه نظیر شرکت در فرآیند کشف مسیر، ارسال بسته‌های کنترلی یا بسته‌های داده و ... از میزان این انرژی می‌کاهد. با توجه به محدودیت باتری به‌عنوان منبع انرژی، مسیریابی با انرژی کارآمد یکی از مسائل مهم در شبکه‌های سیار موردی است. در این مقاله سعی شده است با به‌کارگیری سامانه منطق فازی شهودی روشی برای مسیریابی انرژی کارآمد ارائه شود. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پروتکل پیشنهادی (IFEE-AODV) نرخ تحویل بسته بیشتری نسبت به سه پروتکل AODV، DFES-AODV و SFES-AODV دارد. هم‌چنین در پروتکل پیشنهادی، مدت‌زمانی که نخستین گره و مدت زمانی که نیمی از گره‌ها در شبکه انرژی‌شان تمام می‌شود، بیشتر است، در نتیجه طول عمر شبکه نیز در این پروتکل بیشتر از سه پروتکل دیگر است. عیب پروتکل پیشنهادی این است که تأخیر را افزایش و در نتیجه بازده را کاهش می‌دهد؛ به این دلیل که برای محاسبهٔ تمایل گره از سامانه منطق فازی شهودی استفاده



مریم حسام‌پور کارشناس ارشد علوم رایانه از دانشگاه شهید باهنر کرمان است. زمینه‌های پژوهشی وی شبکه‌های رایانه‌ای و سامانه‌های فازی است. نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

hesampourmaryam@gmail.com



مرجان کوچکی رفسنجانی دکترای خود را در رشته مهندسی رایانه گرایش نرم‌افزار در سال ۱۳۸۷ دریافت کرده است. ایشان هم‌اکنون دانشیار بخش علوم رایانه دانشکده ریاضی و رایانه در

دانشگاه شهید باهنر کرمان است. نامبرده تاکنون بیش از ۱۷۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و خارجی به چاپ رسانده است. زمینه‌های پژوهشی وی شبکه‌های رایانه‌ای (شبکه‌های ویژه سیار، شبکه‌های حس گر بی‌سیم، شبکه‌های ویژه خودرویی)، تجارت الکترونیک، هوش مصنوعی و رایانش گرید و ابری است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

kuchaki@uk.ac.ir

[10] K. T. Atanassov, "Intuitionistic fuzzy sets", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 20, pp. 87-96, 1986.

[11] K. T. Atanassov, "More on intuitionistic fuzzy sets", *Fuzzy sets and Systems*, Vol. 33, pp. 37-45, 1989.

[۱۲] م. کوچکی رفسنجانی، ا. برومند سعید و فرزانه میرزاپور، تصمیم‌گیری گروهی چندمعیاره ترکیبی برای مسأله انتخاب تأمین‌کننده با داده‌های فازی شهودی بازه‌ای مقدار، دوره ۱۷، شماره ۳، صفحات ۱۶-۳، ۱۳۹۹.

[12] M. Kuchaki Rafsanjani, A. Borumand Saeid, F. Mirzapour, "Hybrid multi-criteria group decision making for supplier selection problem with interval-valued intuitionistic fuzzy data", *Signal and Data Processing (JSDP)*, Vol. 17, No. 3, pp. 3-16, 2020.

[۱۳] ا. اسلامی، نظریه مجموعه‌های فازی و تصمیم‌های آن، سیستم‌های فازی و کاربردها، سال اول، شماره اول، صفحات ۲۲-۱، ۱۳۹۷.

[13] E. Eslami, "Fuzzy set theory and its extensions", *Fuzzy Systems and Applications*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-22, 2018.

[14] E.H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588, December 1974.

[15] M. Akram, S. Shahzad, A. Butt and A. Kaliq, "Intuitionistic fuzzy logic control for heater fans", *Mathematics in Computer Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 137-254, 2013.



ارشام برومند سعید دکترای خود را

در رشته ریاضی در سال ۱۳۸۳ دریافت کرده است. ایشان هم‌اکنون استاد بخش ریاضی دانشکده ریاضی و رایانه در دانشگاه شهید باهنر کرمان

است. نامبرده تاکنون بیش از سیصد مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و خارجی به چاپ رسانده است. زمینه‌های پژوهشی وی منطق، سامانه‌های فازی و کاربردهای آنها است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

arsham@uk.ac.ir