

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم

مدیریت توپولوژی در شبکه‌های اقتضایی پروازی

نگارنده:

حسن میرزائی

استاد راهنما:

دکتر امیدرضا معروضی

شهریور ۱۴۰۰

تقدیم

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان، آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است.

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم؛

به سبزترین نگاه زندگی‌ام، چشمان سبز مادرم؛

که هر چه آموختم، در مکتب عشق شما آموختم و هر چه بکوشم، قطره‌ای از دریای بی‌کران

مهربانی‌تان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشت، رضای شما؛

رهاوردی گران‌سنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم؛ باشد که حاصل تلاشم نسیم

گونه، غبار خستگی‌تان را بزدايد.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهنمایی اساتید بزرگ موفق به پایان این رساله شده‌ام، وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده‌اند را به عمل آورم:

در آغاز از استاد بزرگ و دانشمند، جناب آقای دکتر امیدرضا معروضی؛ که راهنمایی این پایان‌نامه را به عهده داشته‌اند، کمال تشکر دارم.

از داوران گرامی، جناب آقای دکترسید مسعود میررضایی و جناب آقای دکتر محمدرضا جوان که زحمت داوری و تصحیح این پایان‌نامه را به عهده داشتند، کمال سپاس رادارم.

خالصانه از تمامی اساتید و معلمان و مدرسانی که در مقاطع مختلف تحصیلی به من علم آموخته و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده‌اند، متشکرم.

تعهدنامه

اینجانب حسن میرزائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق - مخابرات دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدیریت توپولوژی شبکه‌های اقتضایی پروازی تحت راهنمایی دکتر امید رضا معروضی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده، استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است)، متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه، بدون ذکر مرجع، مجاز نمی‌باشد.

چکیده

شبکه‌های هواتور، شبکه‌هایی هستند که از وسایل نقلیه پروازی بدون سرنشین تشکیل شده‌اند و به دلیل تنوع و تطبیق‌پذیری پهپادها، از جمله فن‌آوری‌های نویدبخش، برای سیستم‌های شبکه‌ای آینده بشمار می‌روند. یکی از متمایزترین ویژگی‌های شبکه‌های هواتور، تغییرهای توپولوژیکی مکرر و سریع آن‌ها به دلیل سرعت و تحریک‌پذیری بالای پهپادها است؛ از این رو، مدیریت توپولوژی تطبیق‌پذیر با حرکت‌های پهپادها و یافتن مکان‌های بهینه آن‌ها یکی از مهم‌ترین موضوعات در شبکه‌های هواتور است. تحقیق‌های بسیاری به منظور یافتن مکان بهینه پهپادها و حل مسئله استقرار گره‌های شبکه انجام شده است. در طول دهه‌های گذشته به خاطر پیچیدگی و دشواری مسئله استقرار گره‌های رله، بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا این مسئله را در صرفاً در شبکه‌های استاتیک، مانند شبکه‌های حسگر بی‌سیم و بدون در نظر گرفتن تغییرات توپولوژیکی، حل کنند به همین دلیل در این پایان‌نامه، مسئله‌ی مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر تغییرات توپولوژی آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و در این راستا به منظور به حداکثر رساندن عملکرد شبکه، مکان پهپادها و حرکت آن‌ها را بهینه می‌کند.

در هنگام مدل‌سازی این مسئله، پروتکل مسیریابی را به صورت یک تابع دلخواه در نظر می‌گیریم؛ زیرا عملکرد شبکه با پروتکل مسیریابی مورد استفاده در آن کاملاً مرتبط است. در ابتدای این تحقیق دو الگوریتم را توسعه می‌دهیم، اولین الگوریتم، الگوریتم ساخت توپولوژی است که توپولوژی شبکه‌های هواتور را با استفاده از اطلاعات ابتدایی مسئله و بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO) ایجاد می‌کند و الگوریتم دیگر، الگوریتم تنظیم توپولوژی شبکه است که به صورت تدریجی، توپولوژی شبکه‌های هواتور را بر اساس حرکت‌های پهپادها با استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی تنظیم می‌کند. سرانجام توسط تعریف فاصله ویرایش توپولوژی که درجه تغییرات توپولوژی شبکه‌های هواتور را اندازه‌گیری می‌کند، الگوریتم مدیریت توپولوژی یکپارچه‌ای را توسعه می‌دهیم که شامل هر دو الگوریتم ساخت و تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم مدیریت توپولوژی یکپارچه، عملکرد مناسب به همراه بار محاسباتی پایین دارد که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم‌های مدیریت توپولوژی، در شبکه‌های هواتور دارای تغییرات سریع توپولوژی است.

کلمات کلیدی: شبکه‌های هواتور (FANET)، گرادیان نزولی، بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO)،

استقرار رله، مدیریت توپولوژی، وسایل نقلیه پروازی بدون سرنشین، استقرار پهپاد، تحرک پهپاد

جدول ABBREVIATIONS

ABBREVIATIONS	Description
FANET	Flying Ad hoc Network
UAV	Unmanned aerial vehicle
GCS	Ground control station
MU	Mission UAV
RU	Relay UAV
PSO	Particle swarm optimization
LoS	Line-of-sight
MANET	Mobile Ad hoc Networks
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
IOT	Internet of Things
VR	Virtual Reality
GMC	Global Message Connectivity
WCC	Worst Case Connectivity
RSSI	Received Signal Strength Indication
SNR	Signal To Noise Ratio
WSN	Wireless Sensor Networks
DRNS	Dynamical Relay Node Placement Solution
MPC	Model Predictive Control
IFTM	Integrated FANET topology management
FTC	FANET topology construction
FTA	FANET Topology Adjustment
IFTM-RT	IFTM without updating Routing paths and reconstructing the Topology
IFTM-T	IFTM without performing Topology reconstruction
MA	Moving Average
IFTM-P	IFTM with Priority
IFTM-R	Integrated Topology Management In Fanet-With Removed Mu

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: صورت‌بندی و مدل‌سازی مسئله مدیریت توپولوژی در شبکه‌های موردی پروازی.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ارتباطات بی‌سیم و شبکه‌سازی با پهپادها.....	۳
۳-۱- صورت‌بندی و مدل‌سازی مسئله.....	۴
۱-۳-۱- مدل‌سازی و فرموله کردن مسئله مدیریت توپولوژی.....	۴
فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته.....	۱۱
۱-۲- مروری بر کارهای انجام‌شده.....	۱۲
۲-۲- خلاصه.....	۲۱
فصل سوم: الگوریتم‌های مدیریت توپولوژی در شبکه‌های موردی پروازی (هواتور).....	۲۵
۱-۳- ساختار الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی شبکه‌های هواتور.....	۲۶
۱-۱-۳- الگوریتم مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور.....	۲۶
۱-۱-۱-۳- ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور.....	۲۷
۱-۱-۱-۳- الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور: FTC.....	۲۷
۲-۱-۱-۳- تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور: FTA.....	۲۹
۱-۲-۱-۳- الگوریتم گرادیان نزولی.....	۲۹
۳-۱-۱-۳- مدیریت توپولوژی یکپارچه شبکه‌های هواتور: IFTM.....	۳۲
فصل چهارم: نتایج و ارزیابی.....	۳۹
۱-۴- مقدمه.....	۴۰
۲-۴- کارایی الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور.....	۴۰
۳-۴- کارایی الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی شبکه‌های هواتور.....	۴۷
۴-۴- الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی شبکه‌های هواتور اولویت دار.....	۶۰
۵-۴- بررسی رفتار الگوریتم IFTM در هنگام اختلال در عملکرد پهپادهای MU.....	۶۸
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....	۷۵
۱-۵- نتیجه‌گیری.....	۷۶
۲-۵- پیشنهادها.....	۷۷
منابع.....	۷۹

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- نمای کلی یک نمونه از شبکه هواتوری.....	۵
شکل ۱-۳- الگوریتم گرادیان نزولی.....	۳۰
شکل ۲-۳- مثالی از تغییر در توپولوژی شبکه‌های هواتور در مراحل مختلف زمانی T و T.....	۳۵
شکل ۱-۴- مقایسه الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر الگوریتم PSO با الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر روش تصادفی (RND) با تعداد RUهای متفاوت (اندازه تابع معیار عملکرد).....	۴۳
شکل ۲-۴- مقایسه الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر الگوریتم PSO با الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر روش تصادفی (RND) با تعداد RUهای متفاوت (بلندترین طول لینک).....	۴۴
شکل ۳-۴- مقایسه الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر الگوریتم PSO با الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر روش تصادفی (RND) با تعداد RUهای متفاوت (کوتاه‌ترین طول لینک).....	۴۵
شکل ۴-۴- مثالی از ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور که توسط الگوریتم PSO با ۶ پهپاد RU ایجاد شده است.....	۴۷
شکل ۵-۴- نمونه مسیری طی شده برای ۱۰۰۰ مرحله زمانی چهار MU، تولیدشده بر اساس مدل پرواز لوی (دایره و مثلث به ترتیب نقاط شروع و پایان مسیر حرکت پهپاد را نشان می‌دهند و خطوط پررنگ، نشان‌دهنده مسیر حرکت است).....	۵۰
شکل ۶-۴- مقدار تابع معیار عملکرد.....	۵۴
شکل ۷-۴- میانگین متحرک تجمعی ارزش متریک عملکرد.....	۵۵
شکل ۸-۴- طولانی‌ترین فاصله مسیرهای مسیریابی فعال.....	۵۵
شکل ۹-۴- میانگین متحرک تجمعی طولانی‌ترین فاصله مسیرهای مسیریابی فعال.....	۵۶
شکل ۱۰-۴- کوتاه‌ترین فاصله بین پهپاد.....	۵۶
شکل ۱۱-۴- میانگین متحرک تجمعی کوتاه‌ترین فاصله بین پهپاد.....	۵۷
شکل ۱۲-۴- عملکرد تابع معیار نرمالیزه شده IFTM با PSO-ONLY. وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۷-۶ ذکر شده است، در نظر بگیریم.....	۵۹
شکل ۱۳-۴- عملکرد طولانی‌ترین فاصله لینک نرمالیزه شده IFTM با PSO-ONLY، وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۵-۴ ذکر شده است، در نظر بگیریم.....	۵۹
شکل ۱۴-۴- عملکرد کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها نرمالیزه شده IFTM با PSO-ONLY، وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۵-۷ ذکر شده است، استفاده شود.....	۶۰

- شکل ۷-۱۵- مقایسه تعداد پهپادهای مسیر M_1 برای دو الگوریتم IFTM و IFTM-P ۶۲
- شکل ۴-۱۶- شبیه‌سازی تعداد پهپادهای مسیر MU_1 برای الگوریتم IFTM در زمان $(T=372)$ ۶۳
- شکل ۴-۱۷- شبیه‌سازی تعداد پهپادهای مسیر MU_1 برای الگوریتم IFTM-P در زمان $(T=372)$ ۶۳
- شکل ۴-۱۸- مقایسه دو الگوریتم IFTM و IFTM-P ۶۵
- شکل ۴-۱۹- عملکرد الگوریتم IFTM نرمالایز شده با الگوریتم IFTM-P. وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۴-۵ ذکر شده است، در نظر بگیریم..... ۶۷
- شکل ۴-۲۰- حذف یک پهپاد MU و جایگزینی آن با نزدیکترین پهپاد RU در زمان $T = T_0$ ۶۹
- شکل ۴-۲۱- شبیه‌سازی حذف یک پهپاد MU و جایگزینی آن با نزدیکترین پهپاد RU در زمان $T = 635$ ۷۰
- شکل ۴-۲۲- مقایسه دو الگوریتم IFTM و IFTM-R: مقدار تابع عملکرد، طولانی‌ترین فاصله مسیرهای مسیریابی فعال، کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها..... ۷۲
- شکل ۴-۲۳- عملکرد الگوریتم IFTM نرمالایز شده با الگوریتم IFTM-R. وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۴-۵ ذکر شده است، در نظر بگیریم..... ۷۴

فهرست جداول

صفحه	عنوان
ز.....	جدول ABBREVIATIONS
۳.....	جدول ۱-۱- شبکه‌های پهن‌بند در مقابل شبکه‌های سنتی
۴۱.....	جدول ۱-۴- پارامترهای الگوریتم FTC
۵۱.....	جدول ۲-۴- پارامترهای عملیات ویرایش توپولوژی
۵۲.....	جدول ۳-۴- پارامترهای الگوریتم FTA

فصل اول: صورت‌بندی و مدل‌سازی مسئله

مدیریت توپولوژی در شبکه‌های موردی پروازی

در چند سال گذشته بشر شاهد انقلاب بزرگی در زمینه‌ی هواپیماهای بدون سرنشین بوده است که معمولاً به‌عنوان پهپاد شناخته می‌شوند، در حقیقت یک پهپاد یک هواپیمای بدون سرنشین یا روبات است که می‌تواند به‌طور نامحدود یا به‌صورت مستقل یا درحالی‌که از راه دور توسط یک اپراتور کنترل می‌شود در همه مکان‌ها پرواز کند. بسیاری از منابع [۴-۱] منشأ پهپادها را به قرن نوزدهم برمی‌گرداند که از بالن‌های بدون سرنشین برای بمباران شهر ونیز در ایتالیا استفاده می‌شد.

پیشرفت‌های بی‌سابقه در فن‌آوری پهپاد، امکان استقرار گسترده‌ی آن‌ها را در طیف وسیعی از کاربردها فراهم کرده است، این کاربردها شامل تحویل کالا نظارت [۵]، مراقبت از محیط‌زیست، کنترل ترافیک، انتشار اطلاعات و گسترش پوشش شبکه‌های بی‌سیم و سلولی زمینی [۶-۷] و استفاده در فن‌آوری MIMO [۸-۱۵] می‌شوند. استقرار گسترده مجموعه متنوعی از دستگاه‌های اینترنت اشیا (IoT) شامل کنتورهای هوشمند، گجت‌ها که چالش‌های جدیدی در شبکه بی‌سیم به وجود می‌آورند و به‌طور بالقوه از حضور پهپادها بهره‌مند می‌شوند؛ به‌ویژه، دستگاه‌های کوچک و توان محدود اینترنت اشیا، مانند مراقبت‌های بهداشتی، حمل‌ونقل و شهرهای هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶-۱۹]. مورد استفاده دیگر پهپادها در واقعیت مجازی (VR) است. در این مورد، از پهپادها می‌توان برای تحویل برنامه‌های کاربردی VR، جمع‌آوری داده‌های ردیابی در کاربران VR، نظارت بر حرکت کاربر VR و برای ایجاد اتصال بی‌سیم در برنامه‌های VR استفاده کرد [۲۰-۲۱]. برای فعال کردن همه قابلیت‌ها، پرداختن به انبوهی از چالش‌های تحقیقاتی مربوط به سیستم‌های پهپادها از جمله خودکاری، کنترل، حسگری، ناوبری و ارتباطات ضروری است.

¹ Virtual Reality

۲-۱- ارتباطات بی سیم و شبکه سازی با پهپادها

پهپادها، در انواع و اندازه های مختلف، فرصت های گسترده ای برای ارتباطات بی سیم فراهم می کنند. به طور کلی، انواع پهپادها می توانند به رابط های بی سیم مجهز شوند. چنین اینترفیس های می توانند در هر دو فرکانس WiFi بدون مجوز یا فرکانس های سلولار (تلفن همراه) مجوز دار کار کنند. به طور طبیعی، تجهیز پهپادها به قابلیت های ارتباطی بی سیم، راه را برای انبوهی از کاربردهای جدید در فن آوری پهپاد هموار می کند. در سراسر این حوزه های کاربردی، ما می توانیم سه نقش اصلی ارتباطی برای پهپادها در نظر بگیریم: (الف) پهپادها به عنوان ایستگاه های هوایی پایه (یا نقاط دسترسی) برای ایجاد شبکه های بی سیم و امکانات ارتباطی به مناطق مختلف جغرافیایی مستقر شوند، (ب) پهپادها می توانند از زیرساخت های موجود (به عنوان مثال سلولی یا WiFi) برای برقراری ارتباط با یکدیگر یا با دستگاه های زمینی استفاده کنند (ج) پهپادها را می توان به عنوان رله های (تقویت) هوایی مستقر کرد که به گسترش پوشش و اتصال زیرساخت های بی سیم موجود کمک کنند. در تمام این سه نقش، همان طور که در جدول ۱-۱ خلاصه شده است، می توان تفاوت های اصلی فنی بین شبکه های معمولی، شبکه های بی سیم زمینی و شبکه های بی سیم پشتیبانی توسط پهپادها را شناسایی کرد.

جدول ۱-۱- شبکه های پهپاد در مقابل شبکه های سنتی

شبکه های بی سیم سنتی	شبکه های بی سیم UAV
• طیف کمیاب است. • بیشتر مدل های شبکه دوطبقه • مشکل در حفظ ارتباط بادید خط مستقیم • تحرک محدود به چند مدل (به عنوان مثال، عابران پیاده، اتومبیل و غیره) • بدون محدودیت زمانی	• طیف کمیاب است. • مدل های شبکه سه بعدی • توانایی ذاتی در برقراری ارتباط به صورت خط دید مستقیم به دلیل ارتفاع • پویایی بالا به دلیل تحرک بالا • شناوری و محدودیت های زمان پرواز

۳-۱- صورت‌بندی و مدل‌سازی مسئله

در این تحقیق، ما موضوع مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور^۱ را مورد مطالعه قرار داده‌ایم و در آن پروتکل مسیریابی دلخواهی را استفاده می‌کنیم. در مسئله مدیریت توپولوژی، دو نوع پهپاد در نظر گرفته می‌شوند: پهپادهای MU^2 و پهپادهای RU^3 . هر پهپاد MU مأموریت خود را با یک فرمانده مأموریت تعیین‌شده انجام می‌دهد و سپس داده‌های حاصل را برای ارسال به GCS^4 که در آن فرمانده مأموریت مربوطه قرار دارد آماده‌سازی می‌کند. سپس در فرآیند انتقال داده، هر پهپاد RU نقش مهمی در رله کردن داده بین گره‌های مجاور ایفا می‌کند. فرض می‌کنیم که حرکت‌های MU ها فقط توسط مأموریت آن‌ها تعیین می‌شود و بنابراین امکان کنترل آن‌ها برای بهبود عملکرد شبکه وجود ندارد. از سوی دیگر، حرکت RU ها می‌تواند آزادانه و به‌منظور دستیابی به عملکرد بالای شبکه کنترل شود.

۱-۳-۱- مدل‌سازی و فرموله کردن مسئله مدیریت توپولوژی

در این بخش، ابتدا مدل سیستم را توصیف و سپس مسئله مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور را فرموله می‌کنیم. هدف از تحقیق ما، مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور است؛ به‌گونه‌ای که هر MU بتواند به‌خوبی با GCS که مأموریتی را به آن اختصاص می‌دهد ارتباط برقرار کند.

ابتدا یک شبکه هواتور همانند شکل ۱-۱ را در نظر بگیرید که از تعدادی MU و RU

تشکیل شده است، مجموعه‌های آن‌ها به ترتیب با $\mathcal{R} = \{r_k\}_{k=1}^{|\mathcal{R}|}$ و $\mathcal{G} = \{g_k\}_{k=1}^{|\mathcal{G}|}$ ، $\mathcal{M} = \{m_k\}_{k=1}^{|\mathcal{M}|}$

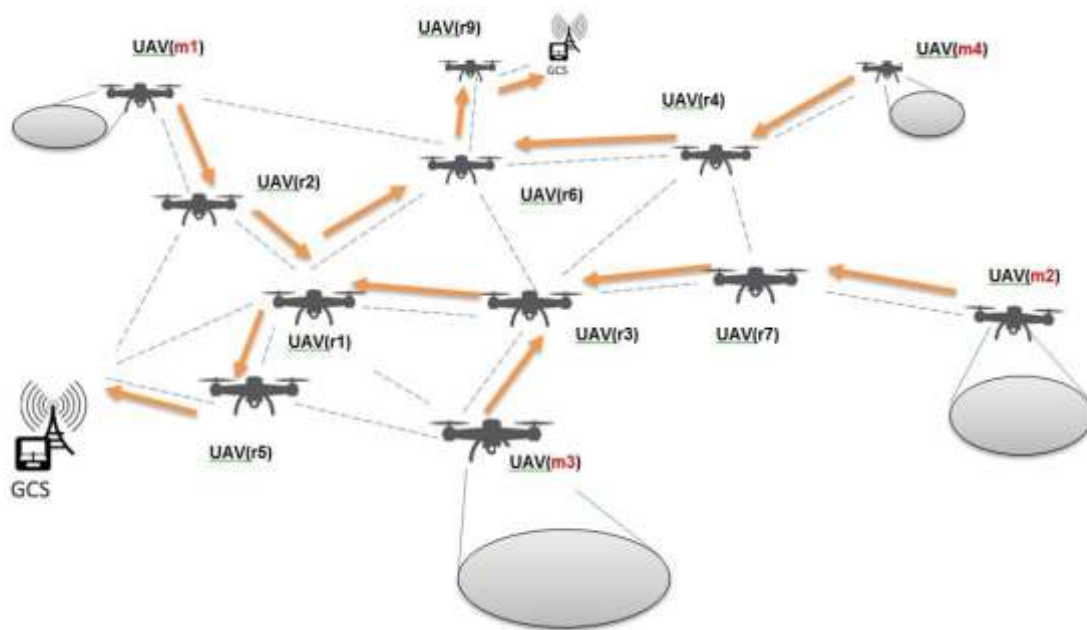
نشان داده می‌شوند، در عبارت‌های فوق منظور از $|\cdot|$ تعداد اعضای مجموعه است.

¹ Flying Ad-hoc Network

² Mission Uav

³ Relay Uav

⁴ Ground Control Station



شکل ۱-۱- نمای کلی یک نمونه از شبکه هواتور

فرض کنید برای هر MU با اندیس m ، GCS مربوطه به آن تعریف شده و با $g^{(m)}$ مشخص می‌شود. در این مدل‌سازی مکان هر گره v در شبکه را با $x_v \in \mathbb{R}^3$ نشان می‌دهیم، بنابراین مجموعه مکان‌های GCS، MU و RU با $\mathcal{X}_G = \{x_v\}_{v \in G}$ ، $\mathcal{X}_M = \{x_v\}_{v \in M}$ و $\mathcal{X}_R = \{x_v\}_{v \in R}$ نشان داده می‌شوند.

در این تحقیق، ما فرض می‌کنیم که مکان GCS مشخص و ثابت هستند. (البته فرض متحرک بودن GCS ها هم می‌تواند در نظر گرفته شود که صرفاً مرتبه استفاده از الگوریتم را بالا می‌برد و موضوع جدیدی نخواهد بود).

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، مکان و تحرک هر MU تنها بر اساس مأموریت داده‌شده آن تعیین می‌شود (به‌عنوان مثال، اگر مأموریت، مانیتور کردن یک هدف باشد، یک MU به دنبال یک هدف خاص متحرک حرکت خواهد کرد و آن را دنبال می‌کند)؛ بنابراین نمی‌توانیم آن‌ها را برای بهبود عملکرد شبکه کنترل کنیم.

در ادامه مدل سازی مسئله مدیریت توپولوژی شبکه، یک پروتکل مسیریابی را در نظر می گیریم که مسیرهای مسیریابی پایان- پایان را بین MU ها و GCS های مربوطه ارائه می دهد و صرف نظر از اینکه از چه روش و الگوریتمی استفاده می کند، مشخص است و به عنوان تابع دلخواهی در نظر می گیریم، به طوری که مکان همه گره ها را به عنوان ورودی می گیرد و مجموعه ای از مسیرهای مسیریابی بین هر MU و GCS مربوطه را در خروجی ظاهر می کند.

بنابراین در این پایان نامه، بدون فرض اینکه باید از پروتکل مسیریابی خاصی استفاده شود، یک پروتکل مسیریابی کلی را به صورت ذیل در نظر گرفته می شود:

$$\rho: \{X_G, X_M, X_R\} \mapsto \{\rho_m\}_{m \in M} \quad (1-1)$$

در اینجا ρ_m نشان دهنده مجموعه مرتب از گره های شبکه است که مسیر مسیریابی بین هر پهنپاد MU m و GCS $g^{(m)}$ را مشخص می کند. به همین ترتیب، k امین عضو در این مجموعه را با ρ_m^k نمایش

داده می شود؛ به طوری که ρ_m^1 نشان دهنده اولین عضو مجموعه (مسیر) مسیریابی و $\rho_m^{|\rho_m|}$ نشان دهنده آخرین عضو این مجموعه است و:

$$\rho_m^i \in \mathcal{R} \quad i = 2, \dots, |\rho_m| - 1 \quad (2-1)$$

به عنوان مثال، فرض کنید MU $_3$ در حال انجام مأموریتی است که از جانب $GCSg_2$ (یعنی $g^{(m_3)} = g_2$) فرماندهی می شود. بدین ترتیب مطابق با پروتکل مسیریابی اگر داده های تولید شده توسط MU $_3$ از طریق ۳ پهنپاد Ru (r_3, r_1, r_5) به GCS_2 تحویل داده شوند؛ بنابراین، مسیر مسیریابی بدین صورت خواهد بود:

$$\rho_{m_3} = \{m_3, r_3, r_1, r_5, g_2\} \quad (3-1)$$

همان طور که میدانید اگر نسبت سیگنال به نویز دریافت شده (SNR) از حد مشخصی بیشتر باشد، در عمل می توان سیگنال را با موفقیت رمزگشایی کرد. همان طور که در فرمول (۴-۵) مشاهده می کنید، توان متوسط سیگنال بی سیم با فاصله انتشار به طور تصاعدی کاهش می یابد.

$$P_{r,j} = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_j} \right)^\alpha \quad (۴-۱)$$

در این رابطه P_r توان متوسط گیرنده، P_t توان فرستنده، G_t گین آنتن فرستنده، G_r گین آنتن گیرنده، d فاصله بین فرستنده و گیرنده، λ طول موج ارسالی و α ضریب توان افت مسیر هست. حال اگر فاصله مناسب دو گره در یک محدوده ارتباطی خاص را d_{cm} فرض کنیم، پهنای می‌تواند به‌طور قابل‌اعتماد ارتباط برقرار کنند. بنابراین می‌توان برای اطمینان از برقراری ارتباط پایان به پایان مطمئن بین تمام MUها و GCSهای مربوطه، قیدی را مطرح کرد که طول تمام لینک‌های بی‌سیم در مسیرهای فعال مسیریابی نباید بیشتر از d_{cm} باشد؛ از این‌رو، باید محدودیت ارتباطی پایان به پایان زیر را در نظر بگیریم:

$$\max_{k=1, \dots, |\rho_m|-1} \delta(\rho_m^k, \rho_m^{k+1}) \leq d_{cm}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (۵-۱)$$

$\delta(u, v)$ فاصله بین گره u و گره v در نظر گرفته و به‌صورت $\delta(u, v) = \|x_u - x_v\|_2$ محاسبه می‌شود.

علاوه بر این، احتمال برخورد پهنای با یکدیگر را به دلیل سرعت بالای حرکت آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. حتی اگر پهنای با سرعت بالا نیز پرواز نکنند، برخی از عوامل محیطی خارجی مانند وزش بادهای شدید می‌توانند معلق شدن و شناوری آن‌ها را در مکان‌های خاص مختل کنند؛ از این‌رو، ما محدودیت ایمنی زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\min_{u, v \in \mathcal{M} \cup \mathcal{R}} \delta(u, v) \geq d_{sf} \quad (۶-۱)$$

d_{sf} حداقل فاصله ایمنی برای جلوگیری از برخورد بین پهنای است. توجه داشته باشید که فاصله ایمنی d_{sf} باید بسیار کمتر از فاصله ارتباطی d_{cm} باشد. این نکته نیز حائز اهمیت است این محدودیت فاصله‌ها در مسیر مسیریابی بین RUها با یکدیگر، RUها با MUها و RUها با GCS است و فرض می‌کنیم که فاصله ایمنی بین MUها حفظ شده است.

اکنون، تابع معیار عملکرد را بررسی می‌کنیم که عملکرد شبکه‌های هواتور را ارزیابی می‌کند. به‌جای هر تابع معیار عملکرد خاص، یک تابع معیار عملکرد کلی را در نظر می‌گیریم که می‌تواند متناسب باهدف سیستم به روش‌های مختلفی تعریف شود؛ از این‌رو، تابع معیار عملکرد را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f: \{X_G, X_M, X_R, \rho(X_G, X_M, X_R)^2\} \mapsto y \quad (7-1)$$

در اینجا ورودی تابع معیار عملکرد، مکان تمام گره‌ها در شبکه هواتور و مسیرهای مسیریابی است و با توجه به مکان گره‌ها توسط تابع مسیریابی به دست می‌آید بدین‌صورت که خروجی آن یک عدد حقیقی است و عملکرد شبکه‌های هواتور را ارزیابی می‌کند.

در مدل‌سازی مسئله مدیریت توپولوژی فرض کنید مقدار تابع معیار عملکرد با توجه به مکان x_r برای هر $r \in \mathcal{R}$ متغیر است و هرچه مقدار آن کوچک‌تر باشد، عملکرد شبکه هواتور بهتر است. به‌عنوان مثال، تابع معیار عملکرد را می‌توان با مجموع α امین توان فاصله لینک در تمام مسیرهای مسیریابی فعال بین MUها و GCSهای مربوطه به آن‌ها، تعریف کرد:

$$f(X_G, X_M, X_R, \rho) = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k=1}^{|\rho_m|-1} \delta(\rho_m^k, \rho_m^{k+1})^\alpha \quad (8-1)$$

که در آن پارامتر α نشان‌دهنده میزان تأثیر فاصله لینک بر کیفیت ارتباط آن است. بر اساس تابع مسیریابی (۱-۱)، محدودیت ارتباطی انتها به انتها (۱-۵)، محدودیت ایمنی (۱-۶) و تابع معیار عملکرد (۱-۸)، سرانجام مسئله مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور به شرح زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{minimize}_{X_R \in \mathcal{S}|\mathcal{R}|} f(X_G, X_M, X_R, \rho) \\ & \max_{k=1, \dots, |\rho_m|-1} \delta(\rho_m^k, \rho_m^{k+1}) \leq d_{cm}, \quad \forall m \in \mathcal{M} \\ & \min_{u, v \in \mathcal{M} \cup \mathcal{R}} \delta(u, v) \geq d_{sf} \quad \mathcal{S} \subseteq \mathbb{R}^3 \end{aligned} \quad (9-1)$$

در ادامه، این تحقیق به شرح زیر بخش‌بندی شده است. در فصل دوم، به بررسی و مرور تحقیق‌های صورت گرفته در دهه‌های گذشته، به‌منظور یافتن مکان بهینه پهناده‌ها و حل مسئله استقرار گره‌های شبکه می‌پردازیم و در فصل سوم، جزئیات الگوریتم مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. سرانجام، ارزیابی عملکرد الگوریتم مدیریت توپولوژی و نتایج شبیه‌سازی آن در بخش پایانی ارائه شده است.

فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مروری بر کارهای انجام شده

وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV)^۱ نقش مهمی در برنامه‌ها و استراتژی دفاعی کشورها ایفا می‌کنند. در حالی که هواپیماهای بدون سرنشین سال‌هاست که در کاربردهای نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرند، پیشرفت‌های تکنولوژیکی در میکروکنترلرها، سنسورها و باتری‌ها کاربرد و تنوع آن‌ها را به طرز چشمگیری افزایش داده است.

وسایل نقلیه بدون سرنشین (پهپادها) می‌توانند مزایای ارتباطی مهمی را برای شبکه‌های اقتضایی^۲ بی‌سیم زمینی ایجاد کنند. زمینه مطالعات پهپادها در درجه اول اکتشافی بوده و روی شبیه‌سازی برای ارزیابی کیفی مزایای شبکه‌های پهپاد تمرکز کرده است. در مقاله [۲۲]، از رویکرد ریاضی برای موقعیت‌یابی و پرواز یک پهپاد روی یک شبکه اقتضایی بی‌سیم برای بهینه‌سازی اتصال شبکه برای کیفیت بهتر خدمات و پوشش دهی استفاده می‌شود. نویسندگان در این مقاله فرض می‌کنند یک پهپاد منفرد بر فراز یک شبکه متصل، با تخمین موقعیت‌ها و سرعت گره‌های شبکه پرواز می‌کند. سپس ذکر می‌شود که پهپاد، خود به عنوان یک گره در شبکه عمل می‌کند و می‌تواند بسته‌های داده را برای بهبود اتصال شبکه تولید، دریافت یا ارسال کند.

در [۲۲]، مکان و حرکت پهپادها برای بهبود اتصال یک شبکه بی‌سیم بهینه‌شده است. چهار نوع اتصال به شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد: اول، اتصال پیام جهانی^۳. دوم، بدترین حالت اتصال^۴. سوم، ما اتصال دوبرخی را تعریف می‌کنیم که هزینه تقسیم شبکه را کمی (کمیت) می‌کند. سرانجام، اتصال k تعریف می‌شود تا تعداد گره‌هایی که قبل از قطع شدن شبکه باید از کار بیفتد را تعیین کند. برای استقرار پهپادها، برخی از طرح‌های تطبیقی ابتکاری برای ارائه راه‌حل‌های ساده اما اثرگذار پیشنهاد شده است. برای اتصال k ، الگوریتمی پیشنهاد می‌شود که اتصال را با استفاده از مثلث‌بندی

^۱. Unmanned Aerial Vehicle

^۲. Ad Hoc Network

^۳. Global Message Connectivity

^۴. Worst Case Connectivity

دلانی^۱ (DT) بهبود می‌بخشد. برای بهینه‌سازی حرکت پهپاد، الگوریتمی که تغییرات توپولوژی شبکه را ردیابی می‌کند نیز ساخته شده است. تجزیه و تحلیل نظری برای یک مورد ساده دو گره بایک پهپاد ارائه شده است و نشان داده است که افزودن پهپاد باعث بهبود ارتباط پیام سراسری شده است. برای تنظیمات کلی شبکه، یک پهپاد می‌تواند اتصال پیام سراسری و بدترین حالت را به ترتیب ۶۰ و ۱۰۹ درصد بهبود بخشد. اتصال شبکه و اتصال k نیز می‌تواند به میزان قابل توجهی بهبود یابد.

به‌طور سنتی، رله ارتباطی یک مأموریت ثانویه، در بستری بود که در مأموریت اصلی دیگری مستقر شده بود؛ با این حال، با ظهور پلتفرم‌های سبک، قوی و مستقل و همچنین فناوری‌های شبکه بی‌سیم، پهپادها (هواپیماهای بدون سرنشین) اکنون می‌توانند این مأموریت رله را انجام دهند.

در مرجع [۲۳] به بررسی استفاده از پهپادهای کوچک به عنوان گره‌های رله ارتباطی برای گسترش لینک‌های ارتباطی و بهبود کیفیت ارتباطات برای ناوگان کشتی‌های دریایی می‌پردازد. این مقاله الگوریتم‌های استقرار سطح بالا را برای بهینه‌سازی مسیر چندین پهپاد برای بهبود اتصال شبکه بی‌سیم در بین ناوگان شناور با توجه به محدودیت‌های مختلف عملیاتی و پویای پهپاد پیشنهاد می‌کند. اتصال شبکه با بستر شبکه‌های سیار موردی^۲ بر اساس اتصال پیام سراسری مدل‌سازی شده است. این اتصال با احتمال انتشار موفقیت‌آمیز دستورات در تمام کشتی‌ها تعریف می‌شود. به‌طور معمول، یک سیستم ارتباطی از شناورها، دارای توان ارسال کافی برای ارتباط ناوگان‌ها در فضایی محدود و در محیط دریایی با یکدیگر ارتباط می‌باشد؛ با این حال، با افزایش تعداد کشتی‌ها در ناوگان، پیچیدگی شبکه ارتباطی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین اطمینان از اتصال شبکه برای به اشتراک‌گذاری اطلاعات در میان آن‌ها به یک مسئله چالش‌برانگیز تبدیل می‌شود. در چنین حالتی، لازم است تعیین شود که کدام لینک‌ها برای توزیع اطلاعات در کل شبکه مورد استفاده

¹. Delaunay Triangulation

². Mobile Ad Hoc Network

قرار می‌گیرند؛ به‌طوری‌که: ۱- همه گره‌ها متصل باشند و ۲- ارتباط کلی شبکه از نظر اتصال پیام سراسری به حداکثر می‌رسد.

در مقاله [۲۳] در ابتدا به استقرار پهپاد برای گره‌های ارتباطی ثابتی می‌پردازد که موقعیت مطلوب پهپادها را برای اطمینان از حداکثر اتصال شبکه پیدا می‌کند؛ سپس، با توجه به حرکت شناورها و محدودیت‌های پهپاد بال ثابت در یک محیط پویا، یک استراتژی برنامه‌ریزی مسیر مبتنی بر کنترل پیش‌بینی مدل غیرخطی^۱ (NMPC) را پیشنهاد می‌کند. با استفاده از تخمین حرکت کشتی‌ها و حالت پهپادها، الگوریتم برنامه‌ریزی مسیر یک‌رشته ورودی را پیدا می‌کند که اتصال شبکه را در یک مدت‌زمان مشخص بهینه می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی عددی تأییدکننده این است که یک شبکه موردی سیار که پهپادها در آن مشغول هستند می‌تواند اتصال شبکه را به‌طور قابل‌توجهی برای محیط‌های ایستا و پویا بهبود بخشد. فرض بر این است که ارتفاع را می‌توان توسط خلبان خودکار پهپاد حفظ کرد. در مقایسه بافاصله بین پهپادها و شناورها، تغییر ارتفاع ناشی از اختلالات ناچیز خواهد بود. اگرچه برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی با مدل سه‌بعدی می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد، اما می‌تواند بعد مسئله و زمان محاسبه را افزایش دهد که ممکن است برای به دست آوردن ورودی‌های کنترل‌شده در زمان، برای فریم NMPC مضر باشد. الگوریتم پیشنهادی اجازه می‌دهد تا مکان و حرکت پهپادها به‌طور خودکار تعیین شود و بنابراین کیفیت اتصال به شبکه و همچنین پوشش ارتباطی برای یک شبکه موردی سیار را به شیوه‌ای کارآمد افزایش می‌دهد؛ علاوه بر این، این کار را می‌توان به‌آسانی به دامنه زمینی غیرنظامی برای افزایش اتصال شبکه نیز گسترش داد.

اطمینان از ارتباط بین عوامل متحرک زمینی یا گره‌ها در محیط‌های شهری به دلیل پهنای باند محدود و فضای مؤثر تجهیزات ارتباطی و مبهم شدن یا انسداد فیزیکی، یک مشکل کاملاً

¹. Nonlinear Model Predictive Control

چالش برانگیز است. به طور خاص، ارتباط بادید مستقیم^۱ (LOS) بین گره‌های زمین اغلب توسط ساختمان‌ها و سایر ویژگی‌های زمین مسدود می‌شود. این امر بر قدرت سیگنال ارتباطی تأثیر می‌گذارد و در نتیجه ارتباطات رادیویی زمینی را غیرقابل اعتماد و ناکارآمد می‌کند. ارتباط ماهواره‌ای^۲ (SATCOM) می‌تواند به جای آن مورد استفاده قرار گیرد، با این حال، از نظر مکانی و زمانی محدود است؛ زیرا ماهواره از مدار از پیش برنامه‌ریزی شده پیروی می‌کند و همچنان سیگنال می‌تواند مسدود شود و یا در محیط‌های شهری به تأخیر بیفتد. با ظهور وسایل نقلیه کوچک بدون سرنشین ارزان قیمت و قوی و همچنین پیشرفت چشمگیر فناوری ارتباطات، می‌توان از پهپادهای کوچک برای حل مشکل ارتباطات شهری استفاده کرد.

نویسندگان در مقاله [۲۴] روشی را برای یافتن موقعیت بهینه وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV) که به عنوان یک گره رله ارتباطی عمل می‌کنند، برای بهبود اتصال شبکه و عملکرد ارتباطی گروهی از گره‌های زمینی پیشنهاد می‌کنند. پهپادها را می‌توان به طور مطلوب در محیط شهری قرارداد تا عملکرد ارتباط بین گره‌های زمینی را بهبود بخشد و در عین حال به عنوان گره رله هوایی عمل کند. پهپادهای رله می‌توانند اکثریت کاستی‌های (SATCOM) و ارتباطات زمینی را با قابلیت حرکت خود برطرف کنند به این معنا که پهپادها را می‌توان به سرعت در هر زمان و هر مکان مستقر کرد و همین‌طور آن‌ها می‌توانند به راحتی موقعیت خود را برای کاهش مشکل مسدود شدن LOS تغییر دهند.

روش‌های مختلفی برای حل مشکل موقعیت‌یابی بهینه برای پهپادها برای حفظ اتصال به شبکه یا بهبود عملکرد ارتباطی یک گروه شبکه‌ای وجود دارد. آن‌ها را می‌توان تا حد زیادی از نظر معیار عملکرد آن‌ها تقسیم‌بندی کرد: (۱) رویکردهای مبتنی بر مدل که در آن یک مدل شناخته شده از محیط ارتباط برای محاسبه/پیش‌بینی عملکرد ارتباط بین اعضای تیم شبکه استفاده می‌شود و

^۱. Line Of Sight

^۲. Satellite Communication

۲) رویکردهای مبتنی بر اندازه‌گیری که در آن اندازه‌گیری کیفیت ارتباطات آنلاین مانند نشانگر توان سیگنال دریافت شده^۱ (RSSI) یا نسبت سیگنال به نویز^۲ (SNR) استفاده می‌شود.

بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای یافتن موقعیت مطلوب پهپاد با استفاده از سه معیار مختلف عملکرد ارتباطی بسته به نیاز استفاده می‌شود: اتصال پیام جهانی^۳ (GMC)، بدترین حالت اتصال^۴ (WCC) و اتصال پیام جهانی اصلاح‌شده^۵ (mGMC).

GMC و WCC برای بهبود عملکرد کلی ارتباط کل گروه و تنها ضعیف‌ترین پیوند به ترتیب مورد استفاده قرار می‌گیرند. در همین حال، mGMC ارائه‌شده در این مقاله از تعداد معینی اتصالات ضعیف برای برآورد الزامات ارتباطی مطلوب با ترکیب مزیت GMC و WCC استفاده می‌کند. برای یافتن موقعیت‌های بهینه پهپادها، ابتدا باید کیفیت ارتباط را مدل‌سازی کرد. در این تحقیق، یک مدل ارتباطی فضای باز در نظر گرفته‌شده و روش‌هایی برای مسدود کردن خط دید مستقیم (LOS) توسط ساختمان‌ها و ارتفاع پرواز پهپاد معرفی شده است. موقعیت مطلوب پهپاد که عملکرد ارتباطی تیم را به حداکثر می‌رساند، بسته به معیار عملکرد (شاخص) مورد استفاده در بهینه‌سازی متفاوت خواهد بود. نویسندگان از تکنیک بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای یافتن موقعیت مطلوب پهپادهای رله‌ای استفاده می‌شود که معیارهای عملکرد ارتباطی تعریف‌شده در بالا را به حداقل می‌رساند زیرا توانایی حل مشکلات پیچیده را دارد.

برای تأیید الگوریتم، یک آزمایش پرواز داخلی با استفاده از یک پهپاد چهار روتور و سه وسیله نقلیه زمینی بدون سرنشین^۶ (UGV) در یک محیط مصنوعی شهری انجام شد و امکان استفاده از

¹. Received Signal Strength Indication

². Signal To Noise Ratio

³. Global Message Connectivity: احتمال انتقال موفقیت‌آمیز پیام به تمام گره‌های حداقل درخت پوشاننده (MST) تعریف می‌شود.

⁴. Worst Case Connectivity: این اتصال به عنوان پیوندی با کمترین احتمال ارتباط موفق از تمام لینک‌های درون MST نشان داده شده است؛ بنابراین، مشکل موقعیت‌یابی پهپاد را می‌توان به عنوان حداقل وزن بدترین پیوند MST با توجه به مکان‌های پهپاد فرموله کرد.

⁵. Modified Global Message Connectivity: با توجه به اینکه WCC تنها بر بهبود بدترین ارتباط متمرکز شده است درحالی‌که GMC عملکرد کلی ارتباطات شبکه را بهبود می‌بخشد اما لزوماً اتصالات ضعیف را بهبود نمی‌بخشد. برای کیفیت ارتباطات کلی و انفرادی لازم است که هر دو معیار توأمان فراورده شوند. برای این منظور، معیار Mgmcc به عنوان سازش بین Wcc و Gmc طراحی شده است.

⁶. Unmanned Ground Vehicles

روش پیشنهادی را در زمان واقعی نشان داد. معیار عملکرد ارتباطات که mGMC نامیده می‌شود، برای یافتن موقعیت مطلوب پهناد که نیازهای ارتباطی موردنظر شبکه را برآورده می‌کند نیز پیشنهاد شده است. شبیه‌سازی‌های عددی احتمال ارتباط موفقیت‌آمیز با استفاده از پهنادهای رله را بهبود بخشیده و آزمایش پرواز داخل ساختمان، پتانسیل اجرای الگوریتم در زمان واقعی را نشان داده است.

همانطور که پیش‌از این بدان اشاره شد شبکه‌های MANET نوع خاصی از شبکه‌های موردی بی‌نیاز از زیرساخت است که دارای قابلیت تغییر موقعیت شبکه و همچنین خودسازمان‌دهی (Self Configuration) هست. شبکه‌های MANET از اتصال بی‌سیم وسیله‌های متحرکی تشکیل می‌شود که هر وسیله می‌تواند به صورت مستقل در هر جهتی حرکت کرده و به صورت مکرر لینک‌های خود را به سایر گره‌های شبکه تغییر دهد. عوامل زیادی بر عملکرد و قابلیت اطمینان MANET تأثیر می‌گذارد. در این شبکه‌ها لینک‌ها بین دستگاه‌های سیار گاهی وجود دارد و گاهی با توجه به موقعیت دستگاه‌ها نسبت به یکدیگر، قدرت انتقال آن‌ها و محیط اطراف، وجود ندارد.

نویسندگان در [۲۵] یک سیستم مدیریت MANET پویا را برای حفظ اتصال MANET با استفاده از گره‌های شبکه کنترل شده که به آن‌ها عامل^۱ می‌گویند ارائه می‌دهد که در آن می‌توان وضعیت کلی شبکه را با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) ردیابی کرد. در حالت کلی دو نوع گره اصلی در شبکه‌های MANET وجود دارد: گره‌های کاربر و گره‌های عامل. گره‌های کاربر گره‌هایی هستند که متقاضی استفاده از خدمات شبکه هستند و گره‌های عامل سیار مسئول کمک به گره‌های کاربر هستند تا بهترین سرویس شبکه ممکن را تجربه کنند. گره‌های کاربر در MANET به میل خود حرکت می‌کنند و فرض بر این است که موقعیت‌های آینده آن‌ها نامشخص است.

¹ Agent

با این حال، فرض بر این است که داده‌های مکانی کاربران و عامل‌ها همیشه در دسترس سیستم کنترل عامل است. این از نظر فنی با استفاده از GPS امکان‌پذیر است. هر گره، دارای محدوده اتصال بی‌سیم مشخص و حداکثر سرعت است. در تکنولوژی GPS، هر گره مجهز به یک گیرنده است و داده‌های مکانی به صورت دوره‌ای با استفاده از فرکانس‌های رادیویی پایین یا مودم ماهواره‌ای تعبیه شده در گره‌ها به گره مرکزی ارسال می‌شوند. در این مقاله، ذکر شده که گره‌های کاربر مجاز به حرکت آزادانه هستند و داده‌های مکان فعلی و گذشته آن‌ها با استفاده از GPS و یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر حرکت برای تخمین مکان آن‌ها در آینده در دسترس است. گره‌های عامل دارای قابلیت‌های ارتباطی بی‌سیم مشابه سایر گره‌های MANET هستند، با این حال حرکت آن‌ها و در نتیجه مکان آن‌ها به طور پویا برای بهینه‌سازی اتصال شبکه تعیین شده است. هدف این نوع از گره‌های شبکه افزایش اتصال گره‌های کاربر به شبکه است. عامل‌ها در هر مرحله طبق عملکرد شبکه حرکت داده می‌شوند تا اتصال شبکه بین گره‌های کاربر بهینه‌سازی شود.

آن‌ها یک رویکرد برای اندازه‌گیری اتصال با استفاده از یک فرمول جریان حداکثر پیشنهاد داده‌اند که هم پاسخگو و هم قابل ردیابی است. از جمله زمینه‌های کاربردی رویکرد پیشنهادی می‌توان به جنگ‌های شبکه محور، ردیابی ناوگان و عملیات جستجو و نجات اشاره کرد که در آن گره‌های شبکه دارای توانایی پشتیبانی از GPS هستند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در راستای به حداکثر رساندن تابع هدف (تابع هدف اندازه‌گیری اتصال شبکه با استفاده از فرمول حداکثر جریان است)، برای انتخاب مکان‌های بهینه عامل‌ها در هر مرحله از عملیات شبکه استفاده می‌شود.

سیستم مدیریت پیشنهادی MANET به طور دقیق بر روی مشکلات استاتیک (ایستایی) و دینامیکی (پویا) متعددی آزمایش شده است که هم مشکلات پویا و هم مشکلات استاتیک مورد آزمایش قرار گرفتند. طبق این آزمایش می‌توان گفت که مورد استاتیکی مراحل مختلف عملکرد شبکه را پوشش می‌دهد و مورد دینامیکی برای سنجش مقایسه با رویکرد MIP و ارزیابی مقیاس‌پذیری برای مشکلات بزرگ‌تر استفاده می‌شود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که رویکرد آن‌ها در بهبود اتصال

MANET ها و پیش‌بینی حرکات اثرگذار است. بر این اساس گره‌های کاربر و استقرار عامل‌ها، عملکرد کلی شبکه MANET را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. لازم به ذکر است که (MIP) مسئله‌ای است که در آن برخی از متغیرها محدود به اعداد صحیح مانند -۱، ۰، ۱، ۲ در راه حل بهینه‌سازی هستند. استفاده از متغیرهای صحیح، دامنه مسائل بهینه‌سازی را تا حد زیادی گسترش می‌دهد.

در بررسی نتایج مشخص گردید که الگوریتم PSO از فرمول MIP بهتر عمل کرده است؛ خصوصاً در مورد مدت‌زمانی که صرف حل مسئله می‌شود عملکرد مناسب‌تری را دارد. رویکرد پیشنهادی، درحالی‌که برای بهینه‌سازی توپولوژی پویا توسعه‌یافته است، به راحتی با افزایش محدودیت‌های سرعت عامل، با یک سناریوی ایستا سازگار می‌شود. سناریوی ایستایی زمانی که کاربران بخواهند یک سیستم موجود از حسگرها یا هاب‌های ارتباطی موجود در زمینه‌ی را بهبود بخشند یا هنگام طراحی یک سیستم استاتیک جدید، مفید است.

در [۲۵] چندین عامل سیار در نظر گرفته شده و هیچ محدودیتی برای حرکت گره‌های کاربر اعمال نمی‌شود. روش پیشنهادی برای همه مدل‌ها و سناریوهای حرکت کاربر قابل اجرا است. تابع هدف اندازه‌گیری، اتصال شبکه با استفاده از فرمول حداکثر جریان است که هدف آن افزایش عملکرد کلی شبکه است. به عنوان نتیجه‌گیری نیز می‌توان گفت که یک مدل جدید برای مفهوم بهینه‌سازی توپولوژی مستقل برای شبکه‌های سیار موردی با استفاده از عامل‌های متعدد سیار پیشنهاد شده است. بازنمایی ارتباطات شبکه‌ای موردی بی‌سیم نیز به صورت جریان شبکه و بهینه‌سازی با استفاده از مدل حداکثر جریان، رویکردی جدید و سودمند است. این بازنمایی هنگام ارزیابی اتصال و عملکرد شبکه به تغییرات کوچک در توپولوژی بسیار پاسخگو است؛ همچنین می‌توان از آن با هر مدل تضعیف سیگنال، هنگام محاسبه جریان داده استفاده کرد.

استقرار شبکه در شبکه‌های بی‌سیم به معنای توزیع گره‌های ارتباطی برای بهبود برخی جنبه‌های عملیاتی مانند صرفه‌جویی در انرژی، پوشش، اتصال و یا صرفاً کاهش هزینه شبکه است و بستگی به برنامه یا زمینه‌های خاصی دارد به‌ویژه، در مورد ماهیت ایستا یا پویای محیط. در حالت اول، محل

اولیه گره‌ها در طول زمان ثابت می‌ماند، درحالی‌که در مورد دوم مکان‌ها تغییر می‌کنند. نمونه‌ای از سناریوهای شبکه استاتیک، شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۱ (WSN) است؛ از سوی دیگر، شبکه‌های سیار موردی (MANET) نمونه‌ای معمولی از سناریوهای تغییر پویا را تشکیل می‌دهند. به‌عنوان مثال، هنگامی‌که زیرساخت‌های ارتباطی ثابت به دلیل بلایای طبیعی دیگر در دسترس نیست، MANET‌ها برای پشتیبانی از ارتباطات بین گشت‌های نجات انسانی توصیه می‌شود. در چنین شرایطی، حفظ ارتباطات از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا تخریب لینک‌های اتصال می‌تواند باعث تلفات انسانی شود. همچنین لازم به ذکر است که بیشتر رویکردهای قرار دادن گره‌ها بر سناریوهای استاتیک مانند WSN متمرکز هستند؛ یعنی دقیقاً جایی که توپولوژی شبکه در طول زمان تغییر نمی‌کند. با این وجود، شرایط خاصی وجود دارد که در آن مکان‌های گره شبکه می‌توانند به‌طور مداوم تغییر کنند. در این مورد، استفاده از گره‌های ویژه، به‌اصطلاح گره‌های رله^۲ (RN) به پشتیبانی، حفظ یا بازیابی ارتباطات در شبکه کمک می‌کند. نقش اصلی گره‌های رله ارسال اطلاعات بین گره‌های باقی‌مانده است؛ در نتیجه، استفاده کافی از RN‌ها به‌ویژه برای ارائه شبکه‌های مقاوم‌تر و پایدارتر در برابر قطع ارتباطات توصیه می‌شود.

نویسندگان در [۲۶]، یک‌راه حل جدید قرار دادن RN برای سناریوهای پویا ارائه داده‌اند که^۳ DRNS نام دارد. این رویکرد، بانام راه‌حل استقرار رله پویا، مبتنی بر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) است و با الهام از تکنیک‌های کنترل مدل پیش‌بینی^۴ (MPC) به دنبال یک روش بهینه‌سازی دو هدفه که در آن بهینه‌سازی اتصال و توان شبکه به‌طور مشترک انجام می‌شود. است. نتایج، نشان‌دهنده مناسب بودن عملکرد آن برای محیط‌های واقعی MANET است.

^۱. Wireless Sensor Networks

^۲. Relay Node

^۳. Dynamical Relay Node Placement Solution

^۴. Model Predictive Control

در مورد نتایج ارزیابی و شبیه‌سازی باید ذکر شود که برای تأیید کارایی روش پیشنهادی DRNS، آزمایش‌های متعددی را برای محیط‌های شبیه‌سازی شده و واقعی انجام می‌دهند. همین‌طور عملکرد DRNS را از طریق شبیه‌سازی طی مراحل مختلف، از جمله سناریوی شبیه‌سازی، عملکرد سیستم و بحث نتایج، زمان اجرا و پیچیدگی محاسباتی در این مقاله ارزیابی می‌شود.

با این وجود، همه جنبه‌های ذاتی محیط‌های واقعی را نمی‌توان به‌طور دقیق شبیه‌سازی کرد. اگرچه نتایج شبیه‌سازی می‌تواند کار آیی یک‌راه حل پیشنهادی را در اولین مرحله تعیین کند، اما استقرار آن در سناریوهای واقعی می‌تواند منجر به دستیابی سیستم به نتایج بسیار متفاوتی شود. آن‌ها آزمایش‌های مشابهی را در یک MANET واقعی انجام دادند که گره‌ها در واقع روبات‌ها هستند که امکان استفاده عملی از DRNS را تأیید می‌کند.

در نتیجه، می‌توان گفت که نویسندگان مقاله [۳۷]، به‌طور کلی، به چالش قرارگیری RN در MANET‌ها می‌پردازد، جایی که تغییرات توپولوژی مداوم به دلیل تحرک ذاتی گره‌ها رخ می‌دهد. سپس، یک‌راه حل پویای جدید، بانام DRNS، پیشنهاد داده‌اند که متکی به یک روش بهینه‌سازی دو هدف است و اتصال گره‌ها و توان مصرفی آن‌ها را بهینه می‌کند.

۲-۲- خلاصه

همان‌طور پیش‌از این بدان اشاره شد، از آنجاکه پهپادها می‌توانند به‌سرعت و به‌راحتی مستقر شوند، در صورت لزوم، نه‌تنها می‌توان پوشش شبکه را به‌راحتی افزایش داد، بلکه توپولوژی شبکه نیز می‌تواند در برابر خرابی‌های گره‌های شبکه پایدارتر و مقاوم‌تر باشد؛ علاوه بر این، شبکه‌های هواتور^۱ که در آن ارتباطات موقت بین پهپادها پشتیبانی می‌شود می‌تواند محدودیت ارتباطات هر پهپاد با هر ایستگاه کنترل زمینی (GCS) که یک فرمانده در آن قرار دارد را برطرف کند. در مقابل این مزایا، ملاحظات و

¹ Flying Ad-hoc Networks

توجهات بیشتری از جمله ساختار ارتباطات هوایی، مدیریت توپولوژی، پروتکل مسیریابی، تحرک زیاد پهپادها، برخورد بین پهپادها و غیره در شبکه‌های هواتور مورد نیاز است.

در مرجع‌های [۲۲] - [۲۴] نویسندگان، بدون در نظر گرفتن وجود مجموعه‌ای از لینک‌های بی‌سیم در شبکه، MANET پشتیبانی شده با پهپادها را در نظر می‌گیرند که در آن پهپادها نقش گره‌های رله را بازی می‌کنند. آن‌ها فرض کرده‌اند که مجموعه‌ای از لینک‌های بی‌سیم میان شبکه تعیین شده است. درحالی‌که این فرض ممکن است در شبکه‌های پویا با تغییرات توپولوژیک بسیار پایین امکان‌پذیر باشد، اما برای شبکه‌های هواتور به دلیل ایجاد و تخریب مکرر لینک‌ها ناشی از تحرک بالای پهپادها قابل استفاده نیست.

اگرچه مسائل متعددی در [۲۲] - [۲۵] در نظر گرفته شده‌اند، ولی همه آن‌ها فرض می‌کنند که توپولوژی اولیه شبکه از پیش داده می‌شود و سپس تلاش می‌کنند تا عملکرد شبکه را با افزودن تعدادی پهپاد بهبود بخشند؛ از این‌رو، راه‌حل آن‌ها تنها می‌تواند بهبودی جزئی برای عملکرد توپولوژی اولیه فراهم کند و در نتیجه کارایی الگوریتم‌های آن‌ها به شدت به توپولوژی اولیه داده شده بستگی دارد. با این وجود، آن‌ها هیچ روشی به منظور پیدا کردن یک توپولوژی اولیه مناسب ارائه نکرده‌اند.

با وجود چنین تلاش‌هایی برای مدیریت توپولوژی در شبکه‌های پویا، تعداد تحقیقات کمی وجود دارد که در آن‌ها از استقرار گره‌های رله برای ساخت توپولوژی شبکه اولیه از معلومات پایه استفاده کرده باشند، به صورتی که مدیریت توپولوژی شبکه با نوسانات توپولوژیک امکان‌پذیر باشد.

اخیراً نویسندگان در مرجع [۲۶] مسئله مدیریت توپولوژی را در MANET مورد مطالعه قرار داده‌اند بدون این‌که فرض شود توپولوژی اولیه داده شده باشد. درجه اول نویسندگان تلاش کرده‌اند تا اتصال شبکه را به حداکثر برسانند و سپس عملکرد ارتباطی بی‌سیم را با استقرار و حرکت گره‌های رله افزایش دهند. در این راستا، آن‌ها الگوریتمی پیشنهاد کرده‌اند که مکان گره‌های رله را برای گام زمانی بعدی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) با بار محاسباتی بالا پیدا می‌کند. الگوریتم آن‌ها باید در هر گام زمانی یک یا دو بار اجرا شود؛ بنابراین بار محاسباتی آن بسیار بالا

خواهد شد. این بار محاسباتی بالا می‌تواند یک محدودیت مهلک برای استفاده از این الگوریتم در شبکه‌های هواتور با تغییرات توپولوژیکی سریع و مکرر باشد.

علاوه بر این، در تمام مطالعات بالا [۲۲] - [۲۶]، پروتکل مسیریابی باوجود اینکه در عمل ارتباط نزدیکی با عملکرد شبکه دارد، به‌طور صریح در نظر گرفته نشده است. لینک‌هایی که در هیچ مسیری فعال نیستند، عملکرد شبکه را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند یا کمی تحت تأثیر قرار می‌دهند، اما اگر در مسیری وجود داشته باشند، در عمل توپولوژی شبکه بهینه به‌شدت وابسته به پروتکل مسیریابی است و همچنین بالعکس؛ از این‌رو، به‌منظور مدیریت توپولوژی شبکه مهم است که پروتکل مسیریابی را برای دستیابی به عملکرد بهینه شبکه مورداستفاده قرار دهیم.

فصل سوم: الگوریتم‌های مدیریت توپولوژی در

شبکه‌های موردی پروازی (هواتور)

۳-۱- ساختار الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی شبکه‌های هواتور

در مسئله مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور، از یک طرف با ساخت یک توپولوژی اولیه بر اساس اطلاعات ابتدایی شبکه مواجه هستیم و از سوی دیگر باید به تنظیم توپولوژی اولیه به صورت سازگار با تغییرات توپولوژی شبکه که ناشی از حرکت‌های پهنادهای MU است، پردازیم. در این راستا ابتدا الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه و سپس الگوریتم تنظیم توپولوژی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این تحقیق به دلیل اینکه یک مسئله پیچیده باید به منظور ساخت یک توپولوژی شبکه هواتور حل شود، الگوریتم بهینه‌سازی PSO را برای استفاده در الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه به کار می‌بندیم و سپس الگوریتم گرادیان نزولی^۱ را با پیچیدگی محاسباتی پایین نسبت به الگوریتم PSO برای تنظیم توپولوژی شبکه به کار می‌بندیم؛ زیرا توپولوژی شبکه‌های هواتور باید به سرعت در پاسخ به تغییرات سریع توپولوژی تطبیق داده شود. سرانجام، روش پیشنهادی ما شامل دو الگوریتم مذکور و تعریف فاصله ویرایش توپولوژی است که درجه تغییرات توپولوژیک را اندازه‌گیری می‌کند، با استفاده از آن‌ها، یک الگوریتم مدیریت توپولوژی یکپارچه را تعریف می‌کنیم که به طور منطبق با شرایط شبکه‌های هواتور تصمیم می‌گیرد که اقدام به بازسازی توپولوژی شبکه کند یا توپولوژی را با به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی تغییر دهد.

۳-۱-۱- الگوریتم مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور

در این بخش، برای حل مسئله مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور در رابطه ۱-۹، ما یک الگوریتم مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور یکپارچه توسعه می‌دهیم که شامل دو زیر الگوریتم است. ابتدا یک الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور ایجاد می‌کنیم که مکان‌های مطلوب RUها را برای ساخت توپولوژی اولیه برای مکان‌های مشخص شده MU در نظر می‌گیرد. سپس یک الگوریتم تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور با پیچیدگی محاسباتی کم ایجاد می‌کنیم که حرکات RUها را با

¹ Gradient Descent

منطبق بر تغییرات توپولوژیکی MU که ناشی از تحرک مبتنی بر مأموریت آن هاست، کنترل می کند. با ترکیب الگوریتم های ساخت و تنظیم توپولوژی شبکه های هواتور و تعریف فاصله ویرایش توپولوژی، ما سرانجام، الگوریتم مدیریت توپولوژی شبکه های هواتور یکپارچه را تعریف می کنیم که به طور مؤثر توپولوژی شبکه های هواتور را برای حفظ عملکرد مناسب شبکه، ضمن تأمین محدودیت ارتباطات پایان به پایان (۵-۱) و فاصله ایمنی (۶-۱)، مدیریت می کند.

۳-۱-۱-۱-۱- ساخت توپولوژی شبکه های هواتور

از آنجایی که مسئله بهینه سازی ما در رابطه (۸-۱)، NP-hard است؛ از این رو، برای حل این مسئله، ما از یکی از الگوریتم های معروف الهام گرفته از طبیعت استفاده می کنیم که بانام الگوریتم PSO شناخته می شود.

۳-۱-۱-۱-۱-۱- الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه های هواتور: FTC۱

اکنون با توجه به ثابت بودن مکان های GCS، مکان های اولیه MU و تابع مسیریابی که مشخصه پروتکل مسیریابی مورد استفاده در آن است، به بررسی الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه های هواتور که مسئله مدیریت توپولوژی شبکه های هواتور را حل می کند (معادله ۹-۱)، می پردازیم. در الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه های هواتور ما از الگوریتم PSO استفاده می کنیم و مسئله بهینه سازی (۹-۱) را با استفاده از روش تابع جریمه به همراه قیود مورد نظر در مسئله بهینه سازی خود مدل کنیم؛ بنابراین مسئله مدیریت توپولوژی شبکه های هواتور به این صورت اصلاح می شود.

$$\text{minimize}_{\mathcal{X}_{\mathcal{R}} \in \mathcal{S}^{|\mathcal{R}|}} \hat{f}(\mathcal{X}_{\mathcal{G}}, \mathcal{X}_{\mathcal{M}}, \mathcal{X}_{\mathcal{R}}, \rho) \quad (3-3)$$

به طوری که $\hat{f}$ ، تابع جریمه معیار عملکرد است و به صورت زیر تعریف می شود:

¹ Fanet Topology Construction

$$\begin{aligned}
\hat{f}(\mathcal{X}_G, \mathcal{X}_M, \mathcal{X}_R, \rho) &= f(\mathcal{X}_G, \mathcal{X}_M, \mathcal{X}_R, \rho) \quad (\lambda - \delta) \\
&+ \sum_{m \in \mathcal{M}} \lambda_m \left(\left[\max_{k=1, \dots, |\rho_m|-1} \delta(\rho_m^k, \rho_m^{k+1}) - d_{cm} \right]^+ \right)^2 \\
&+ \mu \left(\left[d_{sf} - \min_{u, v \in \mathcal{M} \cup \mathcal{R}} \delta(u, v) \right]^+ \right)^2
\end{aligned} \tag{۴-۳}$$

که در آن $\{\lambda_m\}_{m \in \mathcal{M}}$ ضریب جریمه مربوط به قید ارتباطات پایان به پایان (۵-۱) و μ ضریب

جریمه مربوط به محدودیت ایمنی (۶-۱) است و مقصود از $[0]^+$ عبارت $\max\{0, \cdot\}$ می باشد.

همان طور که پیش از این نیز بدان اشاره شد در الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه های هواتور، ابتدا مکان اولیه و مقادیر اولیه مربوط به الگوریتم ها مقداردهی می شوند و سپس مسیرهای مسیریابی مربوط به موقعیت گره ها توسط تابع مسیریابی به دست می آید و پس از آن الگوریتم PSO به منظور پیدا کردن نقاط بهینه برای RU ها در فضای شبکه های هواتور اجرا می گردد.

اگرچه مکان های مطلوب RU را می توان با الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه های هواتور به دست آورد، اما به دلیل اینکه MU ها مطابق با مأموریت های خود حرکت می کنند، بهینه بودن مکان RU ها با گذشت زمان از بین می رود؛ بنابراین هر زمان بهینه سازی با شکست مواجه شد، نیاز به جابه جایی RU ها به مکان های جدید به دست آمده توسط الگوریتم FTC در پاسخ به مکان های جدید MU ها داریم؛ با این حال، فرایند تعیین مکان های بهینه RU ها توسط الگوریتم مذکور به شدت زمان بر هستند؛ زیرا به طور کلی، الگوریتم PSO برای به دست آوردن جواب بهینه برای مکان های RU نیاز به تکرار زیاد دارد؛ از این رو، در شبکه های هواتور که گره ها به سرعت حرکت می کنند؛ (مثلاً MU ها) مدیریت توپولوژی فقط با این الگوریتم برای انطباق با حرکات مداوم گره ها غیر عملی است. به همین دلیل، بخش بعدی، ما از الگوریتمی استفاده می کنیم که سربار محاسباتی بسیار کمتری دارد.

۳-۱-۱-۲- تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور: FTA^۱

در این زیر بخش، ما الگوریتم تنظیم توپولوژی FAENT را با کمی سربار محاسباتی ایجاد می‌کنیم که با تنظیم تدریجی مکان RUهای که با حرکات MU منطبق هستند، عملکرد مطلوب شبکه را تا حد ممکن حفظ می‌کند. برخلاف الگوریتم (FTC) که در آن توپولوژی شبکه و به تبع آن مسیرهای مسیریابی با توجه به موقعیت گره‌ها به‌روزرسانی می‌شوند، در این الگوریتم، ما مسیر مسیریابی را ثابت‌شده در نظر می‌گیریم و تنها تحت شرایط خاصی این به‌روزرسانی صورت می‌گیرد؛ زیرا که به‌روزرسانی مسیرها، فرآیندهای زمان‌بری هستند. این الگوریتم در هر گام زمانی به‌صورت تطبیقی عمل می‌کند؛ به‌طوری‌که طول بازه هر گام زمانی به‌اندازه کافی کوچک مشخص می‌شود تا حرکات MUها به‌خوبی دنبال شود. ما موقعیت گره v در گام زمانی t را با $x_v(t)$ و به‌طور مشابه مجموعه موقعیت‌های MUها و RUها در هر گام زمانی با $x_M(t)$ و $x_R(t)$ تعیین می‌شود.

۳-۱-۱-۲-۱- الگوریتم گرادیان نزولی

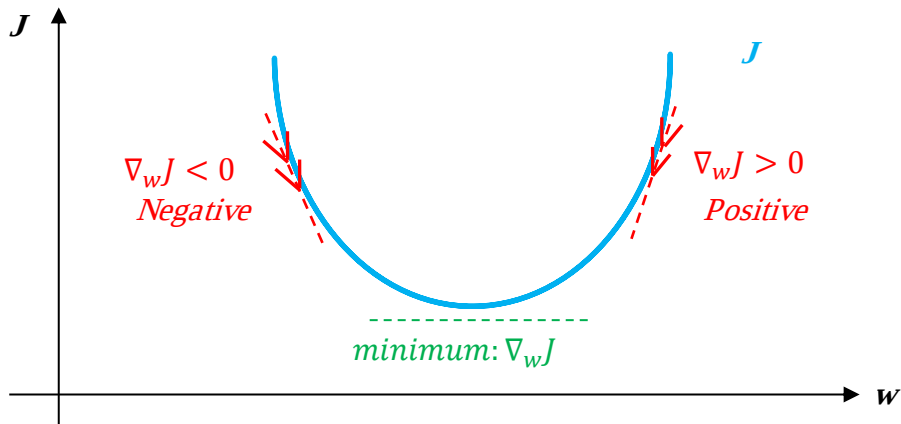
گرادیان نزولی رایج‌ترین الگوریتم بهینه‌سازی در یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به حساب می‌آید. این یک الگوریتم بهینه‌سازی مرتبه اول (First-Order) است. این بدان معنی است که هنگام به‌روزرسانی‌های پارامترها فقط مشتق اول را در نظر می‌گیرد. در هر تکرار، پارامترها را در جهت عکس گرادیان تابع هدف $J(w)$ به‌روزرسانی می‌کنیم؛ اندازه گامی که در هر تکرار برای رسیدن به کمینه محلی (local minimum) برمی‌داریم، با توجه به نرخ یادگیری α تعیین می‌شود؛ بنابراین مسیر سراسیمی را دنبال می‌کنیم تا به کمینه محلی (local minimum) برسیم.

رابطه زیر مدل ریاضی الگوریتم گرادیان نزولی را نشان می‌دهد:

$$w(n+1) = w(n) - \mu \nabla_w J[w(n)] \quad (۵-۳)$$

^۱ Fanet Topology Adjustment

در این رابطه ∇_w عملگر گرادیان، μ ضریب گام حرکت و $w(n)$ تابع هزینه مسئله بهینه‌سازی می‌باشد.



شکل ۳-۱- الگوریتم گرادیان نزولی

ما در الگوریتم تنظیم توپولوژی FAENT، روش گرادیان نزولی را جهت یافتن موقعیت بهینه پهنادهای رله در شبکه استفاده می‌کنیم؛ بنابراین گرادیان تابع معیار عملکرد در گام زمانی t با توجه به مکان هر پهناد RU می‌تواند به صورت زیر باشد.

$$\nabla_{x_r} f(x_G, x_M(t), x_R(t), \{\rho_m\}) \quad (3-6)$$

با توجه به اینکه در رابطه بالا $x_G, x_M(t), x_R(t)$ و $\{\rho_m\}$ مشخص شده است، مقدار دیورژانس به راحتی قابل محاسبه است. به این ترتیب، برای اینکه مقدار تابع معیار عملکرد کاهش یابد، یعنی عملکرد شبکه‌های هواتور افزایش یابد، هر پهناد RU باید در جهت عکس گرادیان حرکت کند؛ بنابراین موقعیتی که هر پهناد رله r در گام زمانی بعدی $T+1$ قرار می‌گیرد، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}_r(t+1) \\ = & \begin{cases} \mathbf{x}_r(t) - \gamma \cdot \nabla_{\mathbf{x}_r} f(t), & \text{if } \|\gamma \cdot \nabla_{\mathbf{x}_r} f(t)\|_2 \leq \gamma_r, \\ \mathbf{x}_r(t) - \gamma_r \cdot \frac{\nabla_{\mathbf{x}_r} f(t)}{\|\nabla_{\mathbf{x}_r} f(t)\|_2}, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (7-3)$$

که γ اندازه گام حرکت و مقداری مثبت است و γ_r ماکزیمم اندازه گام حرکت هر پهباد RU در هر مرحله زمانی است.

با توجه به اینکه موقعیت‌های بهینه RUها متناسب با حرکات MUها تغییر می‌کند، این الگوریتم به‌طور مداوم مکان‌های RU را در جهت بهبود عملکرد شبکه تنظیم می‌کند.

علاوه بر این، برخلاف الگوریتم FTC که فقط به‌صورت متمرکز اجرا می‌شود و به زمان اجرای زیادی احتیاج دارد، نه‌تنها الگوریتم تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور از نظر پیچیدگی محاسباتی بسیار کم است، بلکه می‌تواند در صورت وجود برخی شرایط به‌صورت توزیع‌شده نیز اجرا شود و عملکرد مطلوبی را ارائه دهد؛ به‌عبارت‌دیگر، هر RU می‌تواند مکان خود را برای مرحله بعدی تنها بر اساس اطلاعات مکان گره‌های همسایه خود که می‌تواند مستقیماً با آن‌ها ارتباط برقرار کند، بدست آورد.

هنگامی که تابع معیار عملکرد، مانند (۸-۱) تعریف‌شده باشد، مشتق (گرادیان) تابع با توجه به موقعیت هر پهباد RU در مرحله زمان t از معادله (۳-۶) به دست می‌آید که در این رابطه $N_r(t)$ مجموعه‌ای از گره‌های همسایه پهباد RU متعلق به مسیرهای مسیریابی فعال و در گام زمانی t است؛ ازاین‌رو، گرادیان را می‌توان تنها با مکان‌های خود گره و گره‌های همسایه آن محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} & \nabla_{\mathbf{x}_r} f(\mathcal{X}_G, \mathcal{X}_M(t), \mathcal{X}_R(t), \{\boldsymbol{\rho}_m\}) \\ = & \sum_{m \in M} \sum_{v \in N_r(t)} [\alpha \cdot \|\mathbf{x}_r(t) - \mathbf{x}_v(t)\|_2^{\alpha-2} \cdot (\mathbf{x}_r(t) - \mathbf{x}_v(t))] \end{aligned} \quad (8-3)$$

همان‌طور که مشخص است در مقایسه با الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور، الگوریتم تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور نیاز به محاسبات بسیار ساده‌ای دارد که این موضوع به دلیل عدم استفاده از الگوریتم زمان‌بر فرا ابتکاری همانند PSO است؛ همچنین در صورتی که میزان تغییرات

توپولوژیکی در الگوریتم تنظیم توپولوژی اندک باشد، کافی است چند حرکت کوچک توسط RUها انجام شود. بر این اساس، اجرای هر الگوریتم تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور در هر مرحله، زمان کمی را احتیاج دارد. با این حال، اگر تغییرات توپولوژیکی برای مراحل طولانی انباشته شوند و صرفاً اکتفا به تغییرات کوچک مکان‌های RU در مقایسه با مکان قبلی خود در گام زمانی قبلی کنیم، ممکن است بهینه بودن مسیرهای مسیریابی از بین برود که این به دلیل عدم قابلیت به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی در الگوریتم تنظیم توپولوژی خواهد بود و ممکن است مسیرهای مسیریابی جدیدی وجود داشته باشد که عملکرد شبکه‌ی بهتری نسبت به مسیرهای مسیریابی فعلی را ارائه دهند؛ همچنین اثر جمع شدن تغییرات توپولوژیکی ممکن است شرایطی ایجاد کند که محدودیت‌ها برآورده نشوند و تنها با به‌روزرسانی‌های تدریجی مکان‌ها با الگوریتم تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور برطرف نشود؛ از این رو، برای پرداختن به تغییرات انباشته‌شده در توپولوژی شبکه‌های هواتور، در ادامه، الگوریتمی را پیشنهاد می‌دهیم که با ادغام الگوریتم ساخت و تنظیم توپولوژی شبکه، شبکه‌های هواتور را به‌طور مؤثر مدیریت می‌کند.

۳-۱-۱- مدیریت توپولوژی یکپارچه شبکه‌های هواتور: IFTM^۱

در این بخش، ما الگوریتم مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور یکپارچه با استفاده از الگوریتم‌های ساخت و تنظیم توپولوژی را گسترش می‌دهیم. هدف اصلی ما در این الگوریتم جلوگیری از به‌روزرسانی مکرر مسیرهای مسیریابی و بازسازی توپولوژی شبکه‌های هواتور به دلیل سربار بالای محاسباتی در الگوریتم ساخت توپولوژی، ضمن حفظ عملکرد شبکه در بهترین وجه ممکن، است. برای این منظور، فقط در صورت تغییر توپولوژی در سطوح خاص یا در صورتی که محدودیت و قید ارتباطی پایان به پایان (۵-۱) یا محدودیت ایمنی (۶-۱) نقض شده باشد مسیرهای مسیریابی را به‌روزرسانی می‌کنیم یا به بازسازی توپولوژی شبکه می‌پردازیم. ما میزانی که توپولوژی شبکه‌های

¹ Integrated FANET Topology Management

هواتور تغییر کرده و محدودیت‌ها سخت‌تر می‌شود (به‌عنوان مثال، گره‌های توپولوژی چقدر به مرزهای محدودیت نزدیک شده‌اند) را از طریق تعریف فاصله ویرایش توپولوژی، اندازه می‌گیریم.

قبل از معرفی فاصله ویرایش توپولوژی، ما به‌طور خلاصه فاصله ویرایش گراف [۲۷] را توضیح می‌دهیم که تعیین می‌کند چه مقدار دو گراف باهم اختلاف دارند. در تئوری گراف، یک گراف Q_1 با استفاده از تعداد زیادی از عملیات ویرایش گراف، مانند اضافه و حذف یک گره و یک یال، می‌تواند به گراف دیگر Q_2 تبدیل شود. به مجموعه مرتب از عملیات ویرایش گراف که Q_1 را به Q_2 تبدیل می‌کنند یک مسیر ویرایش گراف از Q_1 به Q_2 گفته می‌شود. با توجه به هزینه هر عملیات ویرایش گراف، می‌توان هزینه یک مسیر ویرایش گراف (که شامل مجموعه چند عملیات ویرایش گراف است) را با مجموع هزینه‌های کلیه عملیات ویرایش گراف در مسیر تعریف کرد. در این حالت فاصله ویرایش گراف بین Q_1 و Q_2 به‌عنوان کمترین هزینه مسیر ویرایش گراف از Q_1 تا Q_2 تعریف می‌شود؛ به‌عنوان مثال خاص، فرض کنید دو گراف A و B موردنظر است، اگر هزینه هر عملیات ویرایش گراف یک باشد، می‌توان فاصله ویرایش گراف بین دو گراف A و B را به‌عنوان حداقل تعداد عملیات ویرایش گراف موردنیاز جهت تبدیل گراف A به B در نظر گرفت.

حال با استفاده از اصل فاصله ویرایش گراف ابتدا عملیات ویرایش توپولوژی را تعریف خواهیم کرد و سپس فاصله ویرایش توپولوژی را به‌عنوان مجموع وزن‌دار از عملیات ویرایش توپولوژی تعریف می‌کنیم. برای تعریف عملیات ویرایش توپولوژی، ابتدا یک توپولوژی شبکه‌های هواتور را در مرحله زمانی t به‌عنوان گراف $\mathcal{T}(t)$ با مجموعه گره $\mathcal{N}$ و مجموعه یال $\mathcal{E}(t)$ در نظر می‌گیریم و مجموعه مکان گره‌های گراف $\mathcal{T}$ را با $\mathcal{X}_{\mathcal{N}}(t)$ مدل می‌کنیم. در این مدل، مجموعه $\mathcal{N}$ به‌عنوان مجموعه‌ای از همه گره‌های بی‌سیم در شبکه‌های هواتور تعریف می‌شود، مجموعه (یال) لبه $\mathcal{E}(t)$ به‌عنوان مجموعه‌ای از زوج‌های نامرتب گره‌ها که طول آن‌ها از d_{cm} بزرگ‌تر نیست و مجموعه مکان $\mathcal{X}_{\mathcal{N}}(t)$ به‌عنوان مجموعه مکان همه گره‌ها در $\mathcal{N}$ تعیین می‌شود.

در الگوریتم مدیریت توپولوژی، به اندازه‌گیری میزان تغییر توپولوژی شبکه‌های هواتور از مرحله زمان t به $t < \tau$ نیاز داریم. مجموعه گره‌ها در توپولوژی شبکه‌های هواتور در زمان t و τ یکسان و برابر با $G \cup M \cup R$ است؛ (در این پایان‌نامه، ما تغییرات تعداد پهنابندها را در نظر نمی‌گیریم و ثابت فرض می‌کنیم)، اما مجموعه زوج نامرتب یال‌ها ممکن است به دلیل تغییر در مکان‌های گره متفاوت باشد؛ بنابراین ما اضافه و حذف شدن گره‌ها را در نظر نمی‌گیریم و تنها مینیمم تعداد اضافه و حذف یال‌ها را برای تبدیل گراف $T(t)$ به $T(\tau)$ به‌عنوان دو عمل ابتدایی ویرایش و تغییر توپولوژی تعریف می‌کنیم:

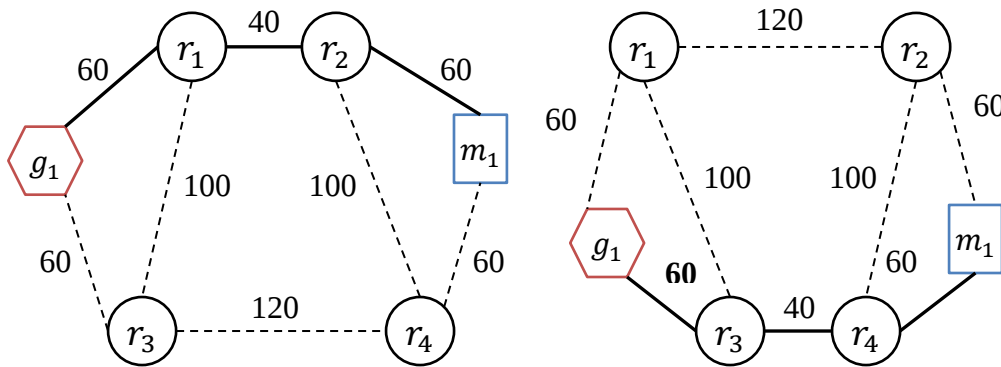
$$e_1(t, \tau) = |\mathcal{E}(\tau) \setminus \mathcal{E}(t)|, e_2(t, \tau) = |\mathcal{E}(t) \setminus \mathcal{E}(\tau)| \quad (9-3)$$

که مقصود از معادله $e_1(t, \tau)$ در رابطه ۶-۷، اعضای که عضو مجموعه $\mathcal{E}(\tau)$ هستند و در مجموعه $\mathcal{E}(t)$ حضور ندارند و منظور از $e_2(t, \tau)$ اعضای که در مجموعه $\mathcal{E}(t)$ وجود دارند و متعلق به مجموعه $\mathcal{E}(\tau)$ نیستند، می‌باشد.

علاوه بر این، ما نیاز به در نظر گرفتن طول یال‌ها داریم؛ زیرا طول هر یال مرتبط با کیفیت ارتباط بی‌سیم است. اجازه دهید یک مثال ساده را نظر بگیریم که در شکل ۶-۱ نمایش داده شده است. در این مثال دیتای تولیدی توسط یک MU (m_1) به GCS (g_1) در توپولوژی شبکه هواتور در دو مرحله زمانی مختلف t و τ ارسال می‌شود. فرض کنید که پروتکل کوتاه‌ترین مسیر مسیریابی در حال استفاده است و هزینه هر یال متناسب با طول آن تنظیم شده است، مسیر مسیریابی بهینه در مرحله زمانی t و τ $\{m_1, r_2, r_1, g_1\}$ و $\{m_1, r_4, r_3, g_1\}$ است. این موضوع در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. فرض کنید هیچ تغییری در اعضای مجموعه یال‌ها وجود نداشته باشد؛ یعنی $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}(\tau)$ ؛ با این حال مسیر مسیریابی مطلوب به دلیل تغییر در طول یال‌های (r_1, r_2) و (r_3, r_4) می‌تواند متفاوت باشد؛ بنابراین ما مجموع مقدار تغییرات در طول یال‌ها را به‌عنوان عملیات ویرایش توپولوژی سوم در نظر می‌گیریم.

$$e_3(t, \tau) = \sum_{(u,v) \in \mathcal{E}(t) \cap \mathcal{E}(\tau)} |\delta(u, v, t) - \delta(u, v, \tau)| \quad (۱۰-۳)$$

که در رابطه فوق $\delta(u, v)$ معرف فاصله بین دو گره u و v در مرحله زمانی t یعنی $\delta(u, v, t) = \|x_u(t) - x_v(t)\|_2$ است.



گراف $\mathcal{T}(t)$ در زمان t

گراف $\mathcal{T}(\tau)$ در زمان τ

شکل ۳-۲- مثالی از تغییر در توپولوژی شبکه‌های هواتور در مراحل مختلف زمانی t و τ (شش ضلعی، مربع و دایره‌ها به ترتیب GCS، MU و RU را نشان می‌دهند. خطوط منقطع و پررنگ به ترتیب لینک‌های بی‌سیم موجود و مسیر مسیریابی فعال بین MU و GCS را به نمایش می‌گذارند و اعداد کنار یال‌ها، طول یال را به متر نشان می‌دهند).

در پایان، میزان نقض و تجاوز از محدودیت‌های ارتباطاتی پایان به پایان و محدودیت ایمنی در تغییر توپولوژی شبکه‌های هواتور در زمان τ را در نظر می‌گیریم. هرچه محدودیت ارتباطی انتها به انتها یا محدودیت ایمنی سخت‌تر شود، به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی بیشتر شده و احتمال بازسازی توپولوژی شبکه به‌منظور اجتناب از تخطی از این محدودیت‌ها افزایش می‌یابد؛ از این‌رو، ما دو عملیات ویرایش توپولوژی اضافی را تعریف می‌کنیم که با تشدید تخطی از محدودیت‌های ارتباطات و ایمنی پایان به پایان، مقادیر آن‌ها بزرگ‌تر می‌شود.

$$e_4(t, \tau) = \exp \left[\psi_1 \left(\max_{k=1, \dots, |\rho_m|-1} \delta(\rho_m^k, \rho_m^{k+1}, \tau) - d_{cm} \right) \right] \quad (11-3)$$

$$e_5(t, \tau) = \exp \left[\psi_2 \left(d_{sf} - \min_{u, v \in \mathcal{M} \cup \mathcal{R}} \delta(u, v, \tau) \right) \right] \quad (12-3)$$

در معادلات بالا ψ_1 و ψ_2 پارامترهای حساسیت هستند. عملیات ویرایش توپولوژی e_4 با بزرگ‌تر شدن طولانی‌ترین فاصله لینک در کلیه مسیرهای مسیریابی فعال، به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. به همین ترتیب، با کاهش کوچک‌ترین فاصله بین پهپادها، عملیات ویرایش توپولوژی e_5 به‌صورت نمایی افزایش یافته است؛ از این‌رو، می‌توان قضاوت کرد که چقدر محدودیت‌های ارتباطی و ایمنی پایان به پایان از طریق عملیات ویرایش توپولوژی e_4 و e_5 ، سخت‌تر شده است؛ علاوه بر این، می‌توانیم تشخیص دهیم که اگر عملیات ویرایش توپولوژی e_4 و e_5 بیشتر از یک باشند، توپولوژی فعلی گره‌های شبکه، محدودیت‌های ارتباطی و ایمنی انتهایی را برآورده نمی‌کند؛ (چون توان در رابطه ۶-۹ و ۶-۱۰ بزرگ‌تر از صفر شده است).

سرانجام، فاصله ویرایش توپولوژی شبکه‌های هواتور بین مراحل مختلف زمانی t و τ به‌صورت زیر تعریف شده است.

$$\delta_{\text{ted}}(\mathcal{T}(t), \mathcal{T}(\tau), \{\rho_m\}) = \sum_{i=1}^5 w_i \cdot e_i(t, \tau) \quad (13-3)$$

که پارامتر w_i وزن عملیات ویرایش توپولوژی e_i است و $\{\rho_m\}$ مجموعه مسیرهای مسیریابی فعال فعلی است. یک فاصله ویرایش توپولوژی بزرگ دلالت بر این دارد که توپولوژی شبکه‌های هواتور بسیار تغییر کرده و یا اینکه تخطی از هر محدودیتی بیشتر شده است؛ از این‌رو، بر اساس فاصله ویرایش توپولوژی، می‌توانیم تصمیم بگیریم که برای جلوگیری از تخطی محدودیت‌ها و بهینه کردن مسیر مسیریابی، مسیرهای مسیریابی را به‌روزرسانی کنیم یا اینکه می‌بایست توپولوژی شبکه‌های هواتور را بازسازی کرد. برای این منظور، دو سطح آستانه ϵ_1 و ϵ_2 را معرفی می‌کنیم؛ به‌طوری‌که رابطه بین آن‌ها به‌صورت $\epsilon_1 < \epsilon_2$ است. ما در نظر می‌گیریم که اگر فاصله ویرایش توپولوژی

(مجموع وزن دار عملیات ویرایش توپولوژی e_i) بیشتر از ϵ_1 باشد، توپولوژی شبکه‌های هواتور به اندازه‌ای تغییر کرده است که باید مسیریابی مسیرها را به‌روزرسانی کند. به همین ترتیب، که اگر فاصله ویرایش توپولوژی بیشتر از ϵ_2 باشد، توپولوژی به‌اندازه‌ای تغییر کرده است که نمی‌توان تنها با به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی کارایی شبکه را بهینه کرد و باید توپولوژی شبکه را با استفاده از الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور بازسازی نمود.

توجه داشته باشیم که وزن‌های w_4 و w_5 و آستانه ϵ_2 باید به‌دقت تعیین شوند تا از قرارگیری پهنپایها در مکانی که هرگونه محدودیتی را نقض می‌کنند، جلوگیری شود. بدین منظور مطابق با روابط ۱۱-۳ و ۱۲-۳ مقدار عملیات ویرایش توپولوژی هنگامی که طولانی‌ترین فاصله لینک از تمام مسیرهای مسیریابی فعال برابر با d_{cm} و کمترین فاصله بین پهنپایها برابر d_{sf} باشد، یک می‌شوند؛ بنابراین برای اینکه توپولوژی شبکه‌های هواتور قبل از نقض و تخطی از هرگونه محدودیتی بازسازی شود w_4 و w_5 و حد آستانه ϵ_2 را به‌گونه‌ای تعیین می‌کنیم که $\epsilon_2 < \min\{w_4, w_5\}$ باشد.

هرچه اختلاف بین ϵ_2 و $\min\{w_4, w_5\}$ بیشتر باشد احتمال بیشتری وجود دارد که طولانی‌ترین فاصله ارتباطی کوچک شود و کوتاه‌ترین فاصله بین پهنپایها بزرگ شود؛ باین‌حال، سربار محاسباتی به دلیل بازسازی پیوسته توپولوژی نیز افزایش خواهد یافت.

اکنون الگوریتم مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور یکپارچه ما را با جزئیات بیشتری توضیح می‌دهیم. در مرحله مقدماتی، با توجه به موقعیت‌های GCS و MUS، ابتدا توپولوژی اولیه شبکه‌های هواتور را می‌سازیم و مسیرهای مسیریابی اولیه را توسط الگوریتم FTC^1 تعیین می‌کنیم. توپولوژی ساخته‌شده را به‌عنوان توپولوژی مرجع T_{ref} تنظیم می‌کنیم.

پس‌از آن، در حلقه تکرار، توپولوژی شبکه‌های هواتور را توسط الگوریتم FTA^2 تنظیم می‌کنیم تا با حرکات MUها سازگار شود و سپس در هر تکرار، توپولوژی شبکه‌های هواتور جدید که منطبق بر

¹. Fanet Topology Construction

². Fanet Topology Adjustment

حرکات MUها است را با توپولوژی مرجع مقایسه می‌کنیم تا بتوانیم تشخیص دهیم که از نظر توپولوژی مرجع، تغییرات توپولوژی شبکه‌های هواتور چه اندازه بوده است و چقدر محدودیت‌ها برآورده شده‌اند. اگر فاصله ویرایش توپولوژی بین آن‌ها از آستانه ϵ_1 تجاوز نکند، درمی‌یابیم که مجموع تغییرات در توپولوژی شبکه‌های هواتور بزرگ نیست؛ بنابراین به تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور توسط الگوریتم FTA ادامه می‌دهیم تا با حرکات MUها سازگار شود؛ از طرف دیگر، اگر فاصله ویرایش توپولوژی از حد آستانه ϵ_1 بیشتر باشد، تصمیم می‌گیریم که توپولوژی شبکه‌های هواتور به اندازه کافی برای به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی یا بازسازی توپولوژی تغییر کرده است. از آنجاکه بازسازی توپولوژی توسط الگوریتم FTC نیاز به سربار محاسباتی قابل‌توجهی دارد، سعی می‌کنیم این وضعیت را با به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی و بدون استفاده از بازسازی توپولوژی در ابتدا برطرف کنیم و در صورتی که علیرغم به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی، فاصله ویرایش توپولوژی از ϵ_2 بیشتر باشد، الگوریتم بازسازی توپولوژی شبکه‌های هواتور را اجرا می‌کنیم و توپولوژی مرجع را به توپولوژی فعلی شبکه‌های هواتور بروز می‌کنیم.

فصل چهارم: نتایج و ارزیابی

۴-۱- مقدمه

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی را برای ارزیابی اثربخشی الگوریتم‌های پیشنهادی ارائه می‌دهیم. ابتدا عملکرد الگوریتم ساختار توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر PSO را با در نظر گرفتن شرایط محیطی ایستا که مکان پهنادهای MU در آن ثابت هستند را ارزیابی می‌کنیم و پس‌از آن، الگوریتم را با در نظر گرفتن محیط پویا که مکان پهنادهای MU بر اساس مأموریت‌های مشخص‌شده آن‌ها تغییر می‌کند، مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شبیه‌سازی‌های زیر یک شبکه‌های هواتور را در نظر می‌گیریم که از یک GCS و چهار MU تشکیل شده است و در تابع عملکرد (X_G, X_M, X_R, ρ) به صورت مجموع توان دوم فاصله لینک روی همه مسیرهای مسیریابی تعریف می‌شود. به عنوان پروتکل مسیریابی در حال استفاده، ما الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مسیریابی را در نظر می‌گیریم که در آن هزینه لینک با مربع فاصله لینک تعریف می‌شود. در این شبیه‌سازی منطقه مستطیل شکل $[50; 150] \times [0; 1500] \times [0; 1500]$ را به عنوان فضای قابل قبول سه‌بعدی S برای پهنادها در نظر می‌گیریم. حد آستانه d_{cm} ارتباطات بی‌سیم و فاصله ایمنی d_{sf} به ترتیب ۳۰ و ۳۰۰ متر تعیین شده است.

۴-۲- کارایی الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور

در این زیر بخش، الگوریتم FTC^۱ که توپولوژی اولیه شبکه‌های هواتور را ایجاد می‌کند، مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. برای شبیه‌سازی الگوریتم FTC سناریویی را در نظر می‌گیریم که در آن GCS در نقطه ثابت (۷۵۰، ۷۵۰، ۰) قرار دارد و پهنادهای MU در نقاط (۳۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰)، (۳۰۰، ۱۰۰، ۳۰۰)، (۱۲۰۰، ۱۲۰۰، ۱۰۰) و (۳۰۰، ۱۲۰۰، ۱۰۰) از فضا ثابت شده‌اند.

پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم FTC به شرح زیر است:

^۱. Fanet Topology Construction

- ۱- ضرایب جریمه تابع هزینه $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ و μ در معادله (۳-۴) ۵۰ تعیین شده است.
- ۲- تعداد ذرات Np الگوریتم PSO روی ۳۰ تنظیم شده است و پارامترهای $C1$ ، $C2$ و W الگوریتم PSO در معادله (۳-۱) برابر با ۰/۷۲۹، ۱/۴۹۶۳ و ۱/۴۹۶۳ تنظیم شده است.
- ۳- آستانه محدودیت سرعت V_j^{max} به ترتیب ۱۰ درصد از دامنه فضای جستجو، یعنی ۱۵۰، ۱۵۰ و ۱۰ برای محورها x ، y و z تعیین شده است.
- ۴- معیار خاتمه الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور را روی ۳۰۰ تکرار تنظیم کرده‌ایم.

جدول ۴-۱- پارامترهای الگوریتم FTC

Parameteric values of FTC Algorithm	
Parameter	Value
Position of the GCS	(750, 750, 0)
Initial Position of the mUAVs	$m_1 = (300, 300, 100)$ $m_2 = (300, 1200, 100)$ $m_3 = (1200, 300, 100)$ $m_4 = (1200, 1200, 100)$
Deployable space (S)	$x\text{-axis} \in [0, 1500]$ $y\text{-axis} \in [0, 1500]$ $z\text{-axis} \in [50, 150]$
Communication range (dcm)	300 m
Safety distance (dsafe)	30 m
Link weight parameter α	2
Penalty coefficients ($\lambda m, \mu$)	30
The number of particles (Np)	30
Inertia weight (w)	0.7298
Cognitive parameter (C_1)	1.4962
Social parameter (C_2)	1.4962
The number of iterations	300

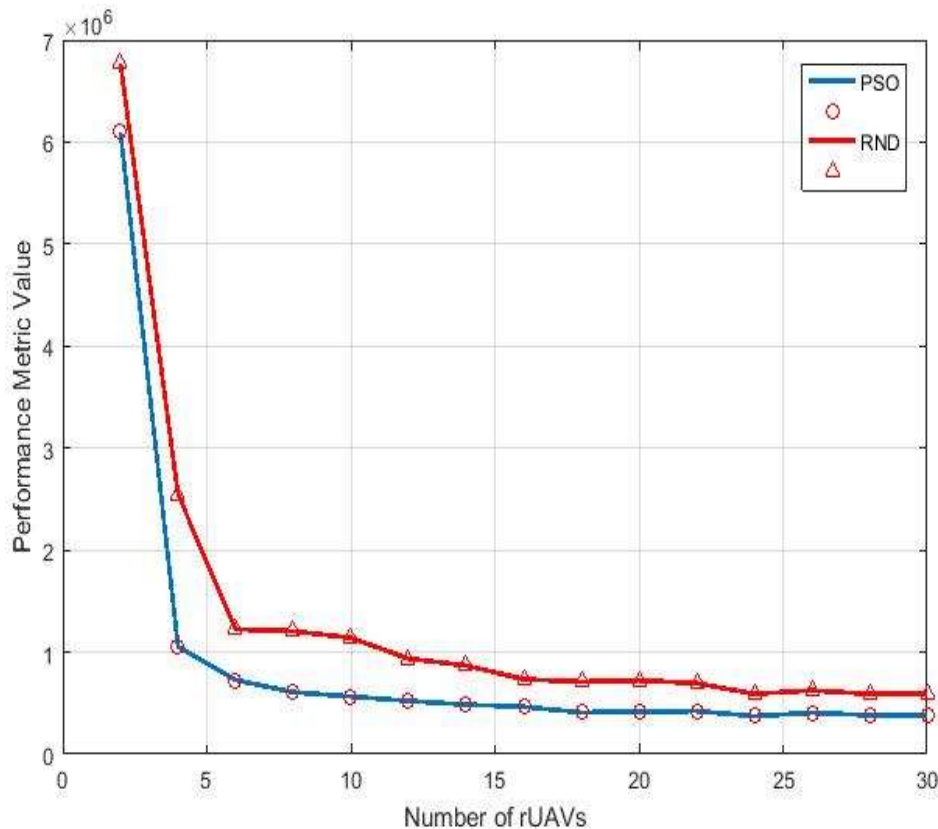
ما عملکرد الگوریتم ساخت توپولوژی مبتنی بر PSO را با الگوریتم ساخت توپولوژی به صورت تصادفی برای تعداد متفاوتی از RUها از ۱ تا ۳۰ مقایسه کرده ایم. الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه های هواتور مبتنی بر روش تصادفی یک توپولوژی شبکه های هواتور را با اعمال تصادفی موقعیت پهنادهای RU در فضای قابل استقرار S ایجاد می کند.

نتایج مقایسه دو الگوریتم از طریق شبیه سازی مونت کارلو با ۳۰ اجرای مستقل به دست آمده است و در شکل های زیر نشان داده شده است. در شکل ۴-۱، مقادیر معیار عملکرد به دست آمده از الگوریتم ها را مورد مقایسه قرار داده ایم. این شکل بیان می کند که مقدار تابع معیار عملکرد شبکه در صورت استفاده از الگوریتم مبتنی بر PSO همیشه مقادیر کمتری را نسبت به مقادیر تابع معیار عملکرد شبکه مبتنی بر روش تصادفی دارد و این بدان معنی است که الگوریتم مبتنی بر PSO، مدیریت توپولوژی شبکه های هواتور بهینه تری را ایجاد می کند. تابع معیار عملکرد مورد استفاده در شبیه سازی شبکه توسط الگوریتم FTC از رابطه $\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k=1}^{|\rho_m|-1} \delta(\rho_m^k, \rho_m^{k+1})^\alpha$ پیروی می کند و تابع هزینه طولانی ترین فاصله لینک که در الگوریتم FTC مورد استفاده قرار گرفته است به شرح ذیل است:

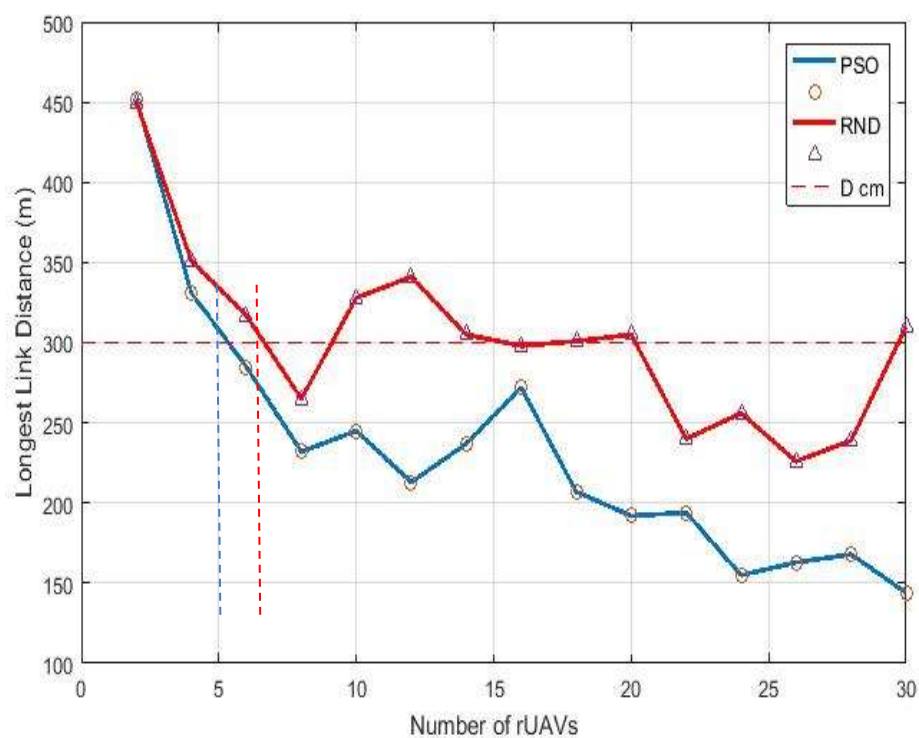
$$f(\mathcal{X}_G, \mathcal{X}_M, \mathcal{X}_R, \rho) = \max_{m \in \mathcal{M}} \max_{k=1, \dots, |\rho_m|-1} \delta(\rho_m^k, \rho_m^{k+1}) \quad (1-4)$$

در ادامه ، در شکل ۴-۲، طولانی ترین فاصله لینک را در همه مسیرهای مسیریابی مورد مقایسه قرار می دهیم. مشاهده می شود که الگوریتم مبتنی بر روش تصادفی برای ساخت توپولوژی شبکه های هواتور با در نظر گرفتن طولانی ترین فاصله لینک کمتر از dcm، به تعداد پهناد RU بیشتری نسبت به الگوریتم PSO نیاز دارد. از طرف دیگر، با توجه به شکل ۴-۲، الگوریتم مبتنی بر PSO می تواند توپولوژی شبکه های هواتوری را ایجاد کند که در صورت استقرار بیش از یا مساوی با ۶ پهناد RU، طولانی ترین فاصله لینک پایین تر از dcm باشد؛ از این رو، الگوریتم ساخت توپولوژی مبتنی بر الگوریتم PSO می تواند ارتباطات پایان به پایان بین هر MU و GCS را با تعداد کمتری از پهنادهای RU پشتیبانی کند. علاوه بر این، با مقایسه طولانی ترین فاصله لینک در الگوریتم مبتنی بر PSO و

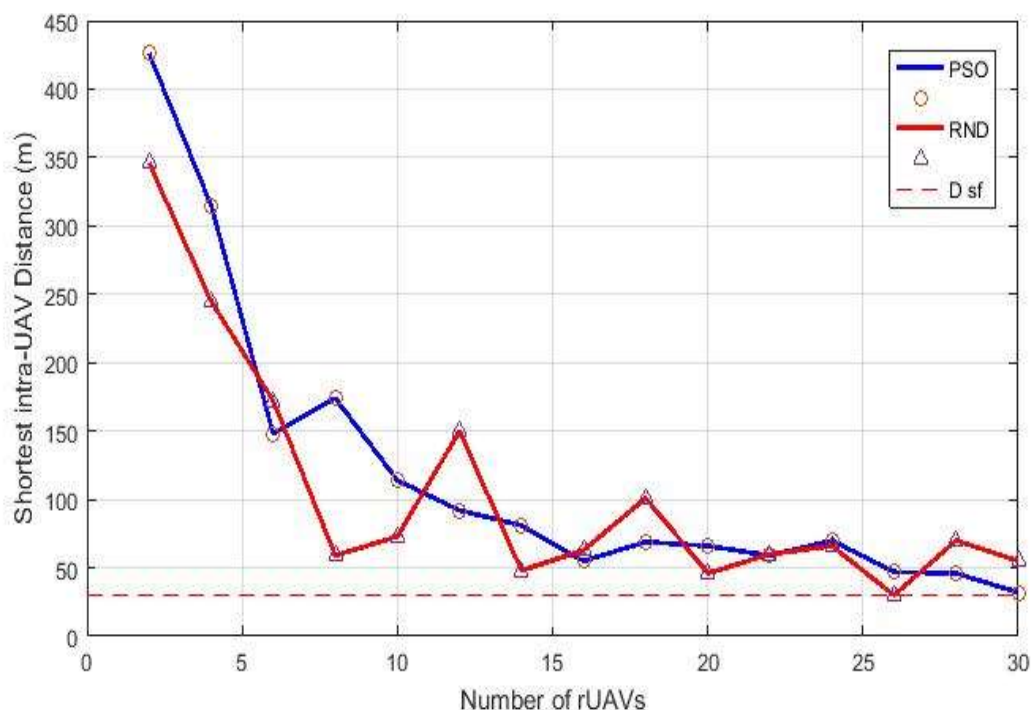
الگوریتم مبتنی بر روش تصادفی در تعدادهای متفاوت از استقرار پهپادهای RU، مشاهده می‌کنیم که مقادیر بدست آمده از الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم مبتنی بر روش تصادفی کوچک‌تر است، بنابراین درمی‌یابیم که الگوریتم مبتنی بر PSO ارتباطات پایان به پایان قابل اطمینان‌تری را نسبت به نوع مبتنی بر روش تصادفی، پشتیبانی می‌کند.



شکل ۴-۱- مقایسه الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر الگوریتم PSO با الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر روش تصادفی (RND)، با تعداد RUهای متفاوت (اندازه تابع معیار عملکرد)



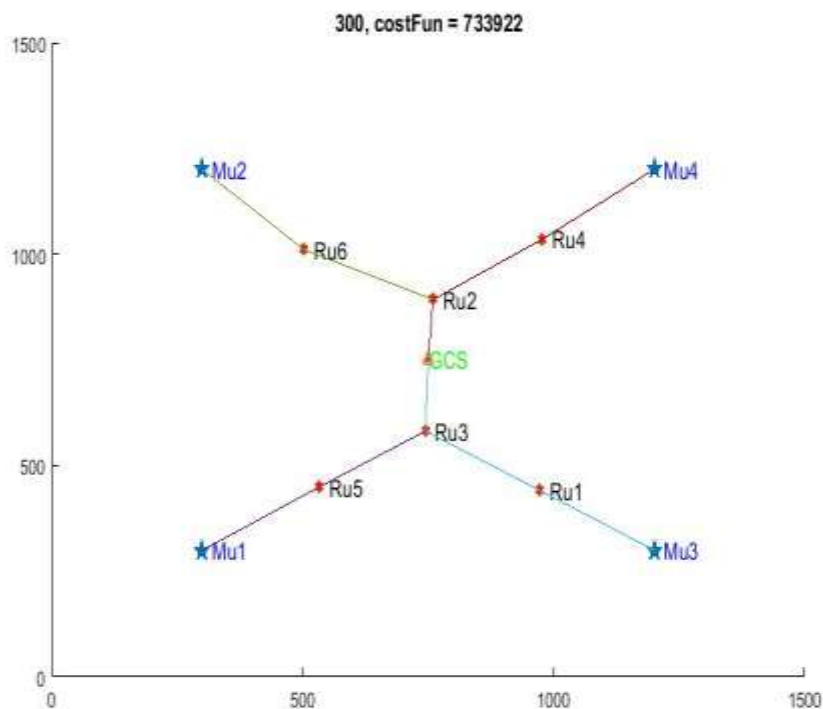
شکل ۴-۲- مقایسه الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر الگوریتم PSO با الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر روش تصادفی (RND)، با تعداد RUهای متفاوت (بلندترین طول لینک)



شکل ۴-۳- مقایسه الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر الگوریتم PSO با الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر روش تصادفی (RND)، با تعداد RUهای متفاوت (کوتاه‌ترین طول لینک)

در شکل ۴-۳ حاصل از شبیه‌سازی، کوتاه‌ترین فاصله بین پهپاد را مورد مقایسه قرار داده‌ایم و می‌توانیم مشاهده کنیم که الگوریتم مبتنی بر PSO در اکثر مواقع شبیه‌سازی با تعدادهای متفاوت از استقرار پهپادهای RU فاصله ایمنی بیشتری را نسبت به نوع مبتنی بر روش تصادفی حفظ می‌کند. به عبارت دیگر الگوریتم مبتنی بر PSO، یک توپولوژی شبکه‌های هواتور ایمن‌تری را از جهت امکان برخورد بین پهپادها، نسبت به نمونه مبتنی بر روش تصادفی ایجاد می‌کند. نتایج شبیه‌سازی فوق نشان می‌دهد که الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور مبتنی بر PSO از حیث عملکرد شبکه، ارتباطات پایان به پایان مطمئن و حفظ فاصله ایمنی، جهت جلوگیری از برخورد بین پهپادها برتر است.

در سناریوی شبیه‌سازی فوق، فاصله بین هر MU و GCS حدود ۶۴۴ متر است؛ بنابراین برای پشتیبانی از ارتباطات پایان به پایان بین هر MU و GCS، حداقل $[644/d_{cm}] - 1 = 2$ پهپاد رله برای هر مسیر مسیریابی موردنیاز است. حال شبکه‌ای را فرض کنید که ۵ پهپاد RU در آن موجود است، برای کمینه‌سازی طولانی‌ترین فاصله لینک در تمام مسیرهای مسیریابی، یک RU باید در (۱۰۰، ۷۵۰، ۷۵۰) - متناسب با موقعیت GCS با ارتفاع برابر با MUها - و سایرین در وسط هر MU و RU قرار داشته باشد؛ در این صورت، طولانی‌ترین فاصله لینک، در این حالت، ۳۱۸ متر است که هنوز هم بیشتر از مقدار d_{cm} است و بنابراین ارتباطات پایان به پایان بین گره‌های شبکه هواتور نمی‌تواند به صورت قابل اطمینان پشتیبانی شود. این در حالی است که با ۶ پهپاد RU، می‌توانیم یک توپولوژی شبکه هواتور را مانند شکل ۴-۴ ارائه دهیم که در آن طولانی‌ترین فاصله لینک از d_{cm} کمتر است؛ بنابراین ارتباطات پایان به پایان مطمئن، پشتیبانی می‌شود؛ از این رو، در سناریوی شبیه‌سازی فوق، ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور که بتواند ارتباطات پایان به پایان قابل اطمینان (بر اساس رابطه ۵-۱) بین تمام MUها و GCS با کمتر از ۶ پهپاد RU را ارائه دهد، غیرممکن است. با مشاهده در شکل ۴-۴ و نتیجه فوق درمی‌یابیم که الگوریتم مبتنی بر PSO یک توپولوژی شبکه‌های هواتور را با حداقل تعداد پهپادهای RU ایجاد می‌کند که از ارتباطات پایان به پایان مطمئن پشتیبانی می‌کند.



شکل ۴-۴- مثالی از ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور که توسط الگوریتم PSO با ۶ پهنای RU ایجاد شده است.

۴-۳- کارایی الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی شبکه‌های هواتور

برخلاف قسمت قبل که فرض ثابت بودن مکان‌های پهنادهای MU مطرح بود، در این بخش، با توجه به محیط دینامیکی که در آن موقعیت پهنادهای MU با توجه به مأموریت‌های آن‌ها متغیر است، عملکرد الگوریتم^۱ IFTM را به منظور مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌دهیم. در اجرای این الگوریتم سناریویی را در نظر می‌گیریم که در آن GCS در نقطه ثابت (۷۵۰، ۷۵۰، ۰) قرار دارد و چهار پهنای MU طبق یک مدل حرکت با سرعت ۵ متر در بازه زمانی ۱۰۰۰ ثانیه حرکت می‌کنند. نقطه شروع حرکت پهنادهای MU به ترتیب از نقاط (۱۰۰، ۳۰۰، ۳۰۰)، (۱۰۰، ۳۰۰، ۱۲۰۰)، (۱۰۰، ۱۲۰۰، ۳۰۰) و (۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۲۰۰) خواهد بود و برای مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور از ۱۰ عدد پهنای RU استفاده می‌شود.

^۱ Integrated Fanet Topology Management

ما از مدل پروازی لوی به عنوان مدل حرکت پهپادهای MU استفاده می‌کنیم [۲۸]؛ زیرا مدل پرواز لوی به خوبی توصیف‌کننده حرکت هدف‌هایی است که مأموریت‌هایی نظیر جستجوی غذا را انجام می‌دهند و بدین ترتیب حرکت‌های تصادفی در همه جهات را تجربه می‌کنند [۲۹]. مدل پرواز لوی یک نسخه از مدل‌های قدم زدن تصادفی است که در آن هر فاصله بین دونقطه از حرکت با توجه به توزیع احتمال مشخصی تعیین می‌شود.

مسیر حرکت هر پهپاد MU با استفاده از مدل پروازی لوی به شرح الگوریتم زیر تولید می‌شود:

(۱) مقدار پارامتر s که از توزیع پرواز لوی پیروی می‌کند را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$s = \frac{\eta_1}{|\eta_2|^{1/\beta}}, \quad (4-1)$$

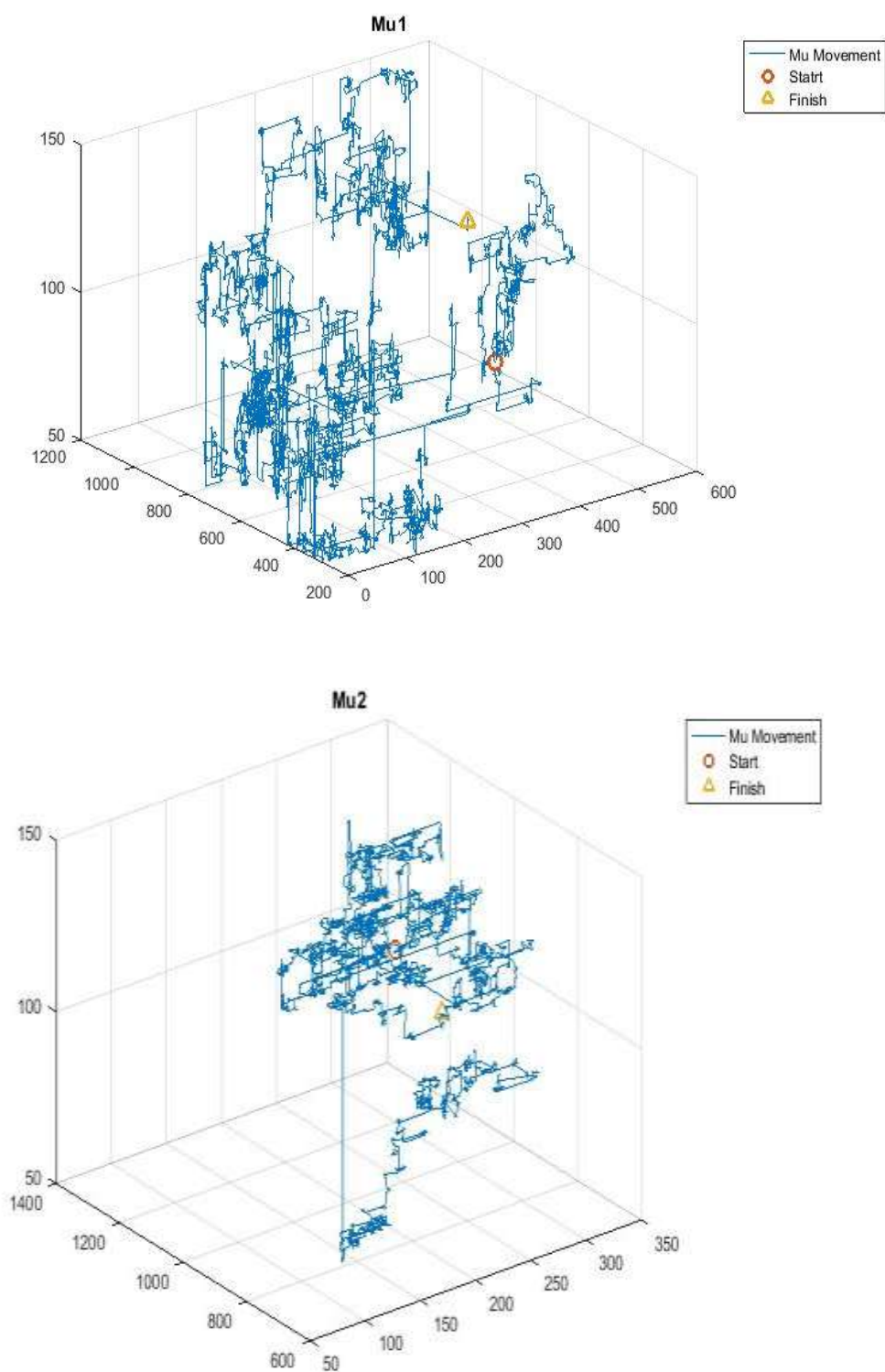
که η_1 و η_2 متغیر تصادفی توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ_1^2 و σ_2^2 هستند. میانگین و انحراف معیار توزیع مذکور به صورت زیر ارائه شده است:

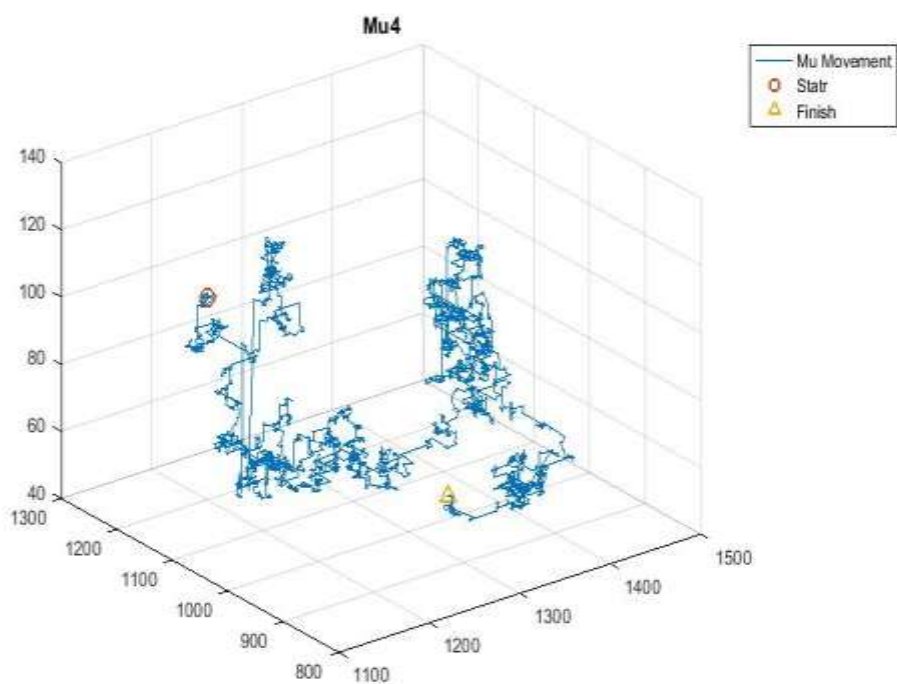
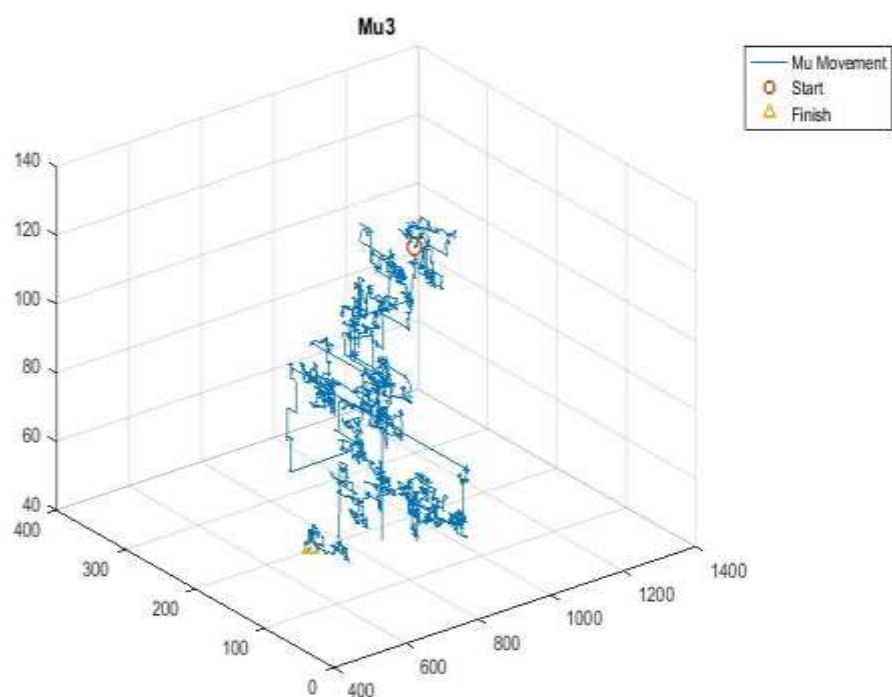
$$\sigma_1 = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \cdot \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma((1+\beta)/2) \cdot \beta \cdot 2^{(\beta-1)/2}} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \sigma_2 = 1 \quad (4-2)$$

در رابطه ۳-۷، پارامتر β ۱٫۵ و Γ تابع گاما است.

در الگوریتم مدل پروازی لوی ابتدا نقاط S با بعد $3 \times m$ را با استفاده از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ_1 مطابق رابطه بالا تولید و با استفاده از مجموع وزن‌دار این نقاط با موقعیت‌های زمان t پهپادهای MU، مکان پهپادهای MU را در زمان $t+1$ به دست می‌آوریم که در این پایان‌نامه، از شبیه‌سازی حرکات پهپاد در ۱۰۰۰ مرحله زمانی استفاده شده است. (لازم به ذکر است که m تعداد پهپادهای MU است).

یک نمونه از مسیر برای چهار پهپاد MUها توسط مدل پروازی لوی و در ۱۰۰۰ ثانیه در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.





شکل ۴-۵- نمونه مسیری طی شده برای ۱۰۰۰ مرحله زمانی چهار MU، تولیدشده بر اساس مدل پرواز لوی (دایره و مثلث به ترتیب نقاط شروع و پایان مسیر حرکت پهپاد را نشان می‌دهند و خطوط پررنگ، نشان‌دهنده مسیر حرکت هست).

در ادامه، جهت شبیه‌سازی الگوریتم IFTM از پارامترهای استفاده‌شده در الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه‌های هواتور (FTC^1) بر روی مقادیری که در ابتدای همین بخش بدان اشاره شد، استفاده می‌کنیم و پارامترهای موردنیاز در الگوریتم تنظیم توپولوژی شبکه‌های هواتور (FTA^2) به شرح زیر تنظیم‌شده است. در رابطه (۷-۳) اندازه گام γ برابر 0.05، ماکزیمم مسافت طی شده‌ی پهنادهای RU در هر مرحله زمانی ۲۰ متر است؛ یعنی $\gamma_r = 20$ برای همه $r \in \mathcal{R}$. به همین ترتیب، پارامترهای استفاده‌شده در عملیات ویرایش توپولوژی مربوط به الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی شبکه‌های هواتور ($IFTM^3$) به‌صورت زیر تنظیم‌شده‌اند.

$$\epsilon_2 = 1000, w_1 = 30, w_2 = 30, w_3 = 0.5, w_4 = 1000, w_5 = 1000, \epsilon_1 = 700 \quad (3-4)$$

بطور خلاصه مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی برای عملیات ویرایش توپولوژی و الگوریتم تنظیم توپولوژی در جداول زیر قابل‌مشاهده است.

جدول ۴-۲- پارامترهای عملیات ویرایش توپولوژی

Parameteric values of Topology Edit Operation	
Parameter	Value
sensitivity parameters (ψ_1)	0.1
sensitivity parameters (ψ_2)	0.3
weight parameter (w_i)	$w_1 = 30$ $w_2 = 30$ $w_3 = 0.5$ $w_4 = 1000$ $w_5 = 1000$
Threshold levels (ϵ_1)	700
Threshold levels (ϵ_2)	1000

¹. Fanet Topology Construction

². Fanet Topology Adjustment

³. Integrated Fanet Topology Management

جدول ۴-۳- پارامترهای الگوریتم FTA

Parameteric values of FTA Algoritm	
Parameter	Value
step size that scales the travel distance(γ)	0.05
maximum travel istances(γ_r)	20 m

پس از تعریف و تنظیم مقادیر الگوریتم مدیریت توپولوژی، به مقایسه الگوریتم مدیریت توپولوژی یکپارچه شبکه‌های هواتور (IFTM) را با سه الگوریتم دیگر می‌پردازیم. اولین مورد الگوریتمی است که در آن توپولوژی اولیه توسط الگوریتم FTC ساخته می‌شود و سپس در هر مرحله زمانی، توپولوژی شبکه، منطبق بر حرکت پهبادهای MU، توسط الگوریتم FTA تنظیم می‌شود. در این نوع از الگوریتم، مدیریت توپولوژی بدون به‌روز کردن مسیرهای مسیریابی و بازسازی توپولوژی که در اثر تخطی از محدودیت‌ها صورت می‌گیرد، انجام می‌شود؛ از این‌رو، الگوریتم IFTM ای که فاقد به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی و بازسازی توپولوژی است را $IFTM-RT^1$ می‌نامیم. دومین الگوریتم، الگوریتمی مشابه الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی شبکه‌های هواتور (IFTM) است؛ با این تفاوت که اگر در IFTM از حدود آستانه ϵ_1 و ϵ_2 تجاوز شود، بدون انجام بازسازی توپولوژی (که بر پایه الگوریتم PSO است)، فقط به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی را انجام می‌دهد؛ به این ترتیب، ما این الگوریتم را که فاقد بازسازی توپولوژی شبکه است را $IFTM-T^2$ می‌نامیم.

مقایسه الگوریتم‌های IFTM، IFTM-RT و IFTM-T نشان می‌دهد که چه میزان به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی و بازسازی توپولوژی شبکه‌های هواتور می‌تواند در عملکرد شبکه‌های هواتور مؤثر باشد. سرانجام الگوریتم آخر، الگوریتمی است که در آن مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور تنها از الگوریتم ساخت توپولوژی (FTC) که مبتنی بر PSO است، برای ساخت توپولوژی و تنظیم توپولوژی در هر مرحله زمانی از حرکت پهبادهای MU استفاده می‌کند؛ از این‌رو در این الگوریتم که مدیریت

¹. IFTM without updating Routing paths and reconstructing the Topology

². IFTM without performing Topology reconstruction

توپولوژی شبکه بر اساس مکان‌های جدید MU، تنها از الگوریتم ساخت توپولوژی مبتنی بر PSO استفاده می‌شود را الگوریتم PSO-Only می‌نامیم.

در ادامه با استفاده از مسیرهای ۴ پهنای MU که از مدل پروازی لوی بهره می‌برند و در شکل (۴-۵) نمایش داده شده است به مقایسه عملکرد الگوریتم IFTM با الگوریتم‌های IFTM-RT، IFTM-T و PSO-Only می‌پردازیم. در این مقایسه، با استفاده از ویژگی‌های تصادفی شبیه‌سازی مونت کارلو، الگوریتم‌ها را برای ۱۰ اجرا مستقل بکار می‌بندیم.

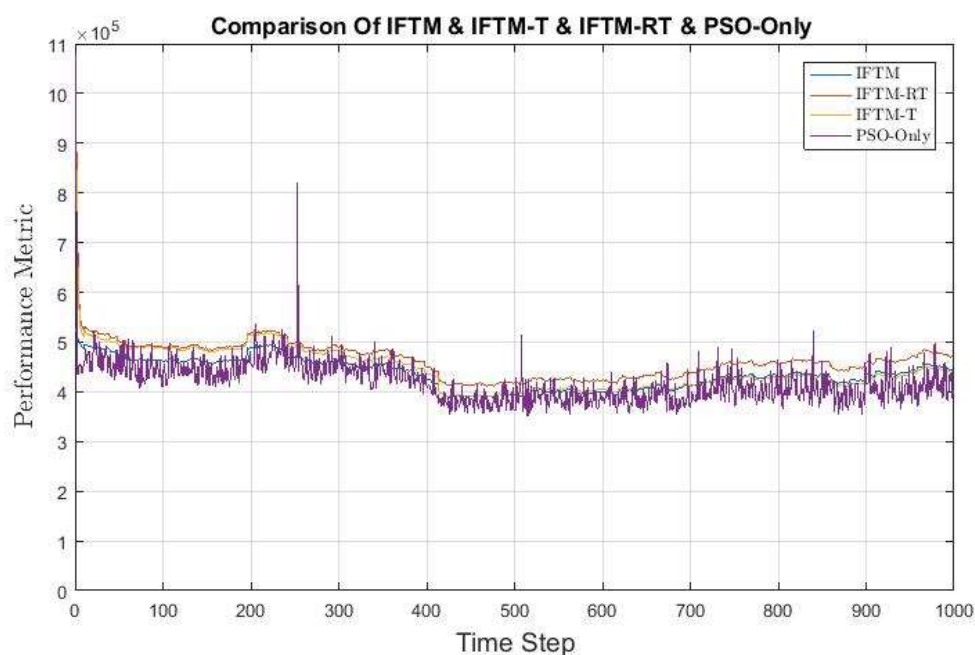
شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۱۱، نتایج شبیه‌سازی به دست آمده از مقادیر عملکرد تابع معیار تعریف شده در رابطه (۱-۹) و همچنین طولانی‌ترین فاصله لینک در مسیرهای مسیریابی و کوتاه‌ترین فاصله بین پهنادهای الگوریتم‌های فوق را نشان می‌دهد. علاوه بر نتایج شبیه‌سازی دقیقی که مبتنی بر حرکت پهنادهای MU است و در شکل‌های ۴-۶، ۴-۸ و ۴-۱۰ به نمایش درآمده است، نتایج میانگین متحرک تجمعی آن‌ها را در شکل‌های ۴-۷، ۴-۹ و ۴-۱۱ ارائه می‌دهیم که با میانگین‌گیری از همه نتایج شبیه‌سازی برای هر الگوریتم به دست می‌آید.

همان‌طور که در شکل ۴-۶ مشاهده می‌کنید، الگوریتم IFTM عملکرد به مراتب بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد و الگوریتم IFTM-RT از سایر الگوریتم‌ها عملکرد ضعیف‌تری را از خود نشان می‌دهد. همچنین می‌توانیم این موضوع را با وضوح بیشتری با استفاده از روش MA^1 در شکل ۴-۷ نظاره‌گر باشیم. همان‌طور که در شکل ۴-۶ و ۴-۷ مشخص است، الگوریتم IFTM-T عملکرد بهتری نسبت به IFTM-RT دارد؛ زیرا شبکه هواتور می‌تواند در صورت استفاده از الگوریتم IFTM-T، مسیرهای فعلی مسیریابی را که با تغییر توپولوژی شبکه‌های هواتور متفاوت می‌شود، به مسیرهای بهینه‌تری به‌روزرسانی کند؛ با این حال، عملکرد الگوریتم IFTM-T از الگوریتم IFTM ضعیف‌تر است؛ زیرا که تنها با استفاده از به‌روزرسانی مسیرهای مسیریابی، به تغییرات توپولوژیکی شبکه پاسخ

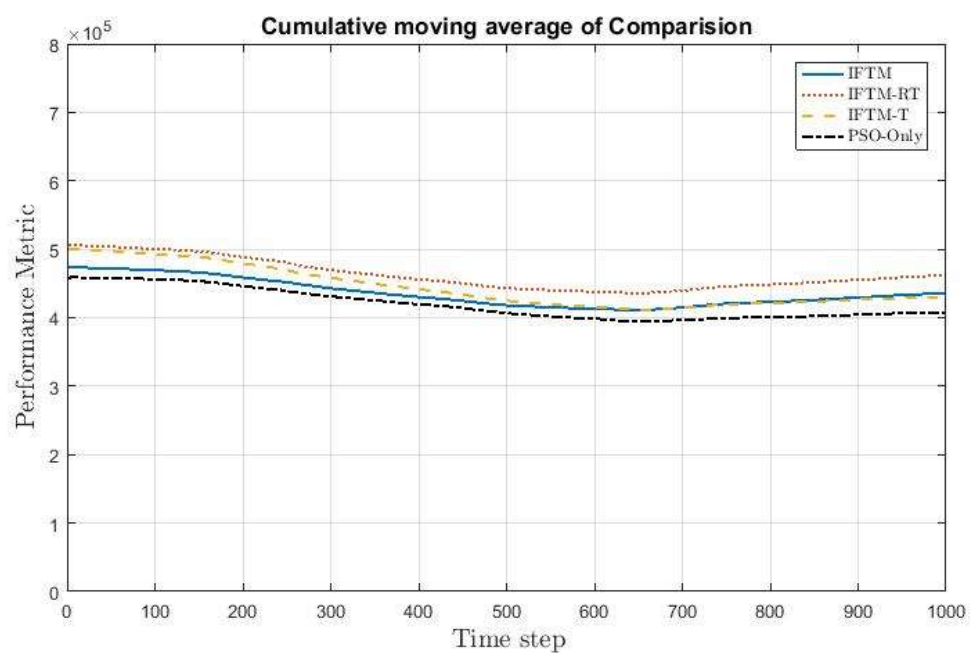
¹. Moving Average

می‌دهد، اما نمی‌تواند شرایطی را که تغییرات توپولوژی تجمیع شده شبکه‌ی هواتور بزرگ می‌شوند را مدیریت کند.

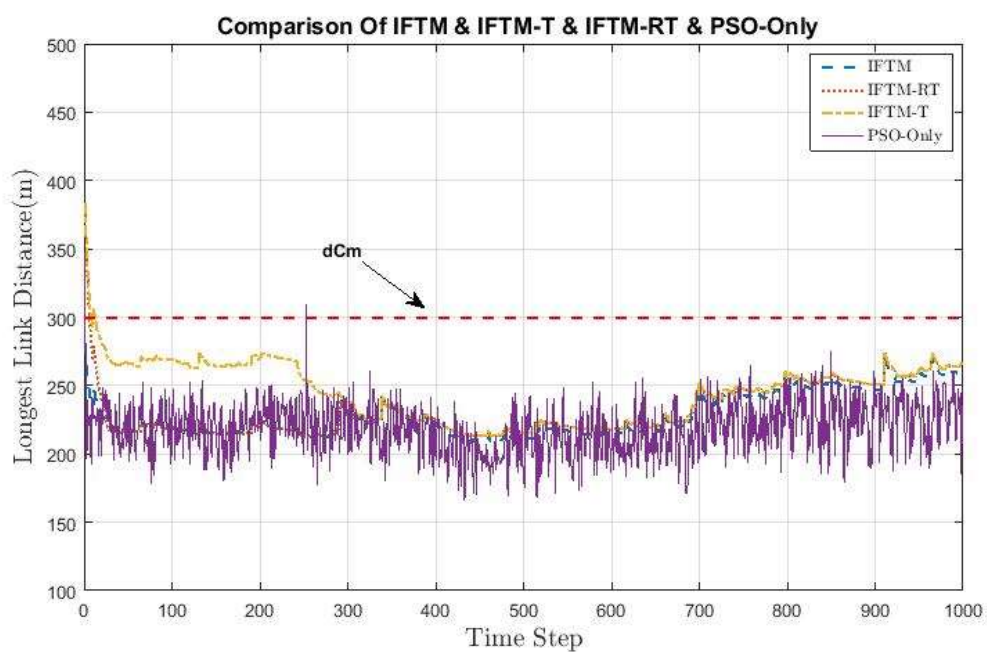
در شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹، می‌توانیم مشاهده کنیم که در الگوریتم IFTM، بیشترین فاصله لینک پهنادهای RU از فاصله dcm نسبت به سایر الگوریتم‌ها بیشتر است و همچنین در شکل‌های ۴-۱۰ و ۴-۱۱، کمترین فاصله بین پهنادها را نسبت به فاصله ایمنی dSf در قیاس با دیگر الگوریتم‌ها بیشتر حفظ کرده است. درواقع، الگوریتم‌های IFTM-RT و IFTM-T با شرایطی روبرو می‌شوند که محدودیت ارتباطات پایان به پایان در رابطه (۱-۵) و محدودیت فاصله ایمنی در رابطه (۱-۶) را نمی‌توانند برآورده کنند؛ درحالی‌که در الگوریتم IFTM سعی شده است که از محدودیت‌ها، تخطی و تجاوز نشود.



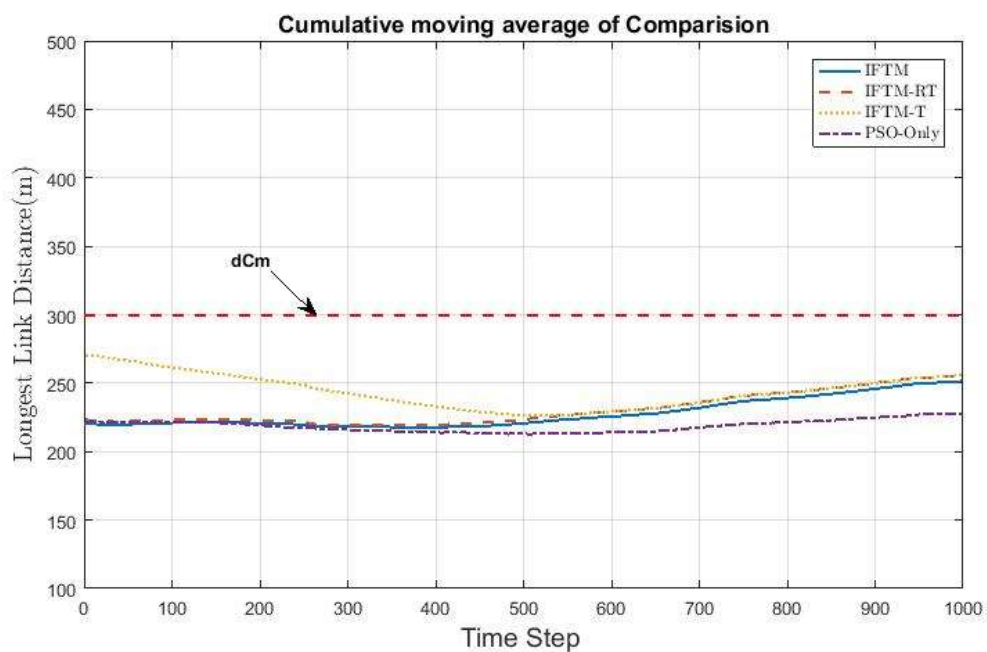
شکل ۴-۶- مقدار تابع معیار عملکرد



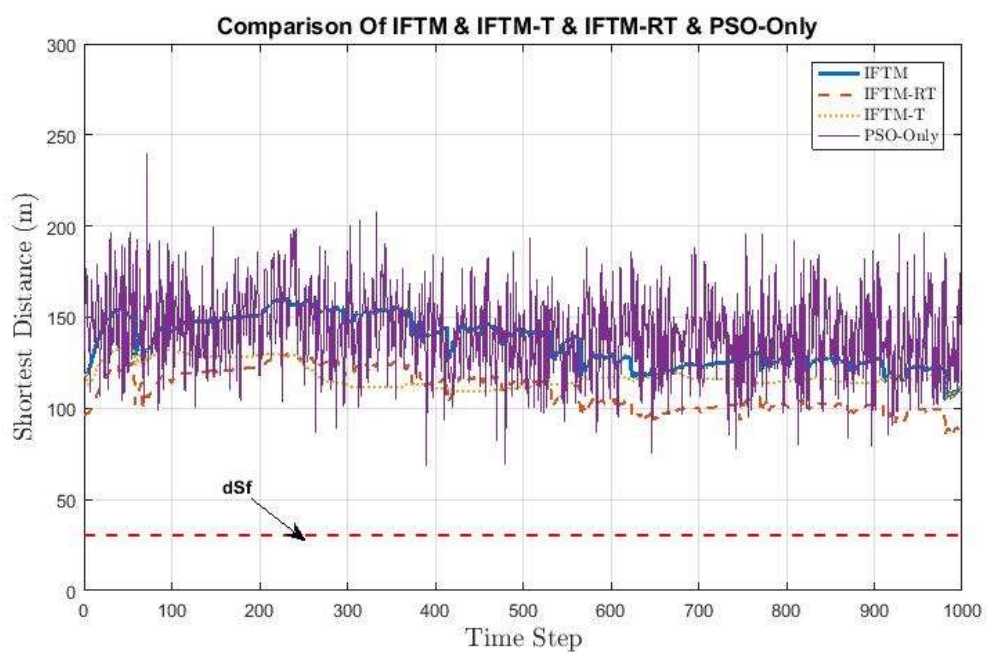
شکل ۴-۷- میانگین متحرک تجمعی مقدار تابع عملکرد معیار



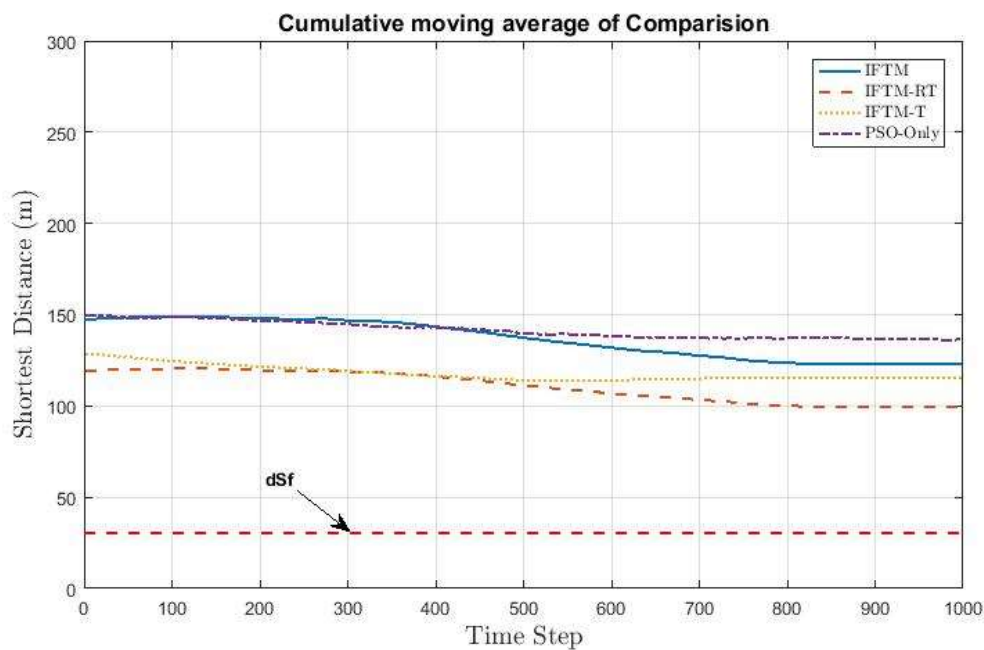
شکل ۴-۸- طولانی ترین فاصله مسیرهای مسیریابی فعال



شکل ۴-۹- میانگین متحرک تجمعی طولانی ترین فاصله مسیرهای مسیریابی فعال



شکل ۴-۱۰- کوتاه ترین فاصله بین پهپاد

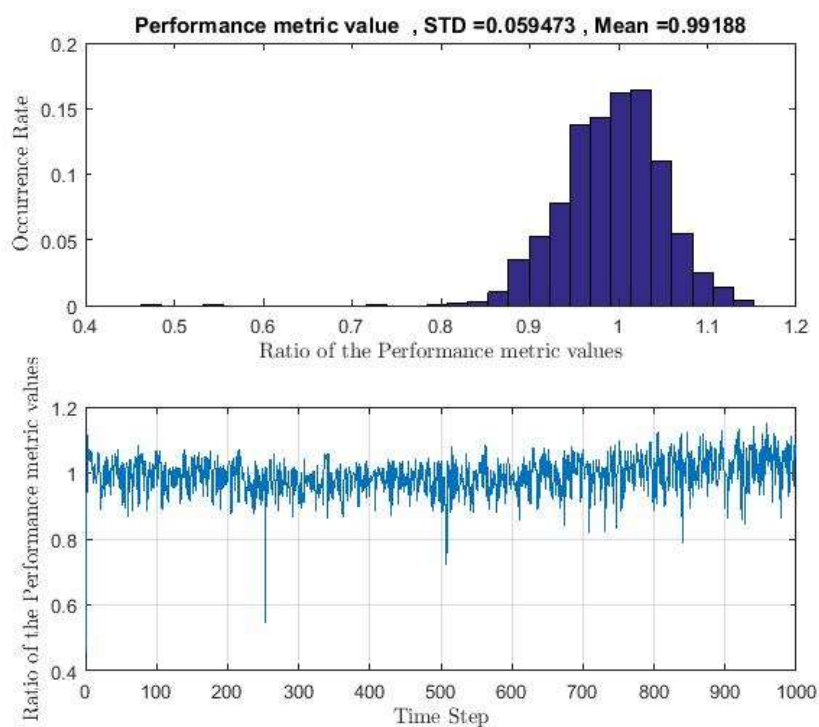


شکل ۴-۱۱- میانگین متحرک تجمعی کوتاه‌ترین فاصله بین پهپاد

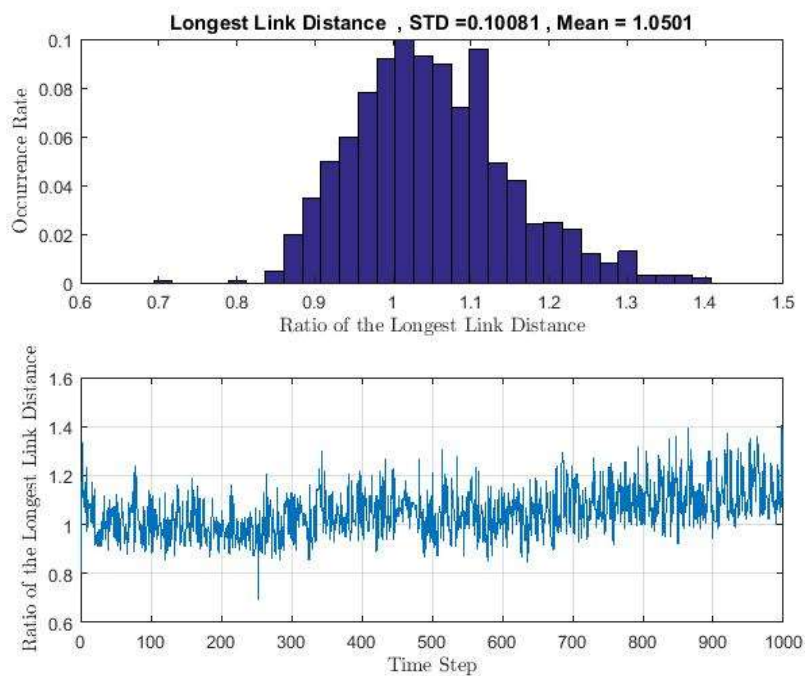
اکنون ما عملکردهای الگوریتم IFTM را با عملکرد الگوریتم PSO-Only با ۱۰ نمونه مختلف از مسیرهای حرکت پهپادهای MU مقایسه می‌کنیم. در این مقایسه نیز مکان‌های پهپادهای MU برای ۱۰۰۰ مرحله زمانی و به‌طور مستقل با مدل پرواز لوی تولید می‌شوند؛ از این‌رو، ما در کل ۱۰۰۰۰ نمونه داریم و برای هر یک از آن‌ها مقدار تابع عملکرد معیار، بیشترین فاصله لینک و کوتاه‌ترین فاصله بین پهپاد را به همراه نسبت آن‌ها برای الگوریتم PSO-Only و الگوریتم IFTM به دست می‌آوریم. همان‌طور که در شکل ۴-۱۲، ۴-۱۳ و ۴-۱۴ مشاهده می‌کنید، الگوریتم PSO-Only عملکرد بهتری را در همه موارد مقدار تابع معیار عملکرد، بیشترین فاصله لینک‌ها و کمترین فاصله بین پهپادها نتیجه می‌دهد و این موضع به علت دقت الگوریتم PSO در یافتن موقعیت‌های بهینه برای پهپادهای RU ها است، ولی همان‌طور پیش‌ازاین بدان اشاره شد، سربار محاسباتی که در هنگام استفاده از الگوریتم PSO-Only متحمل می‌شویم، بسیار بیشتر از زمانی است که صرف اجرای الگوریتم IFTM می‌شود.

در شکل ۴-۱۲ و در هر نمودار، بیشترین نسبت‌های به‌دست‌آمده در حدود یک متمرکز شده است که بیانگر آن است که الگوریتم IFTM عملکردهای مشابه الگوریتم PSO-Only را ارائه می‌دهد.

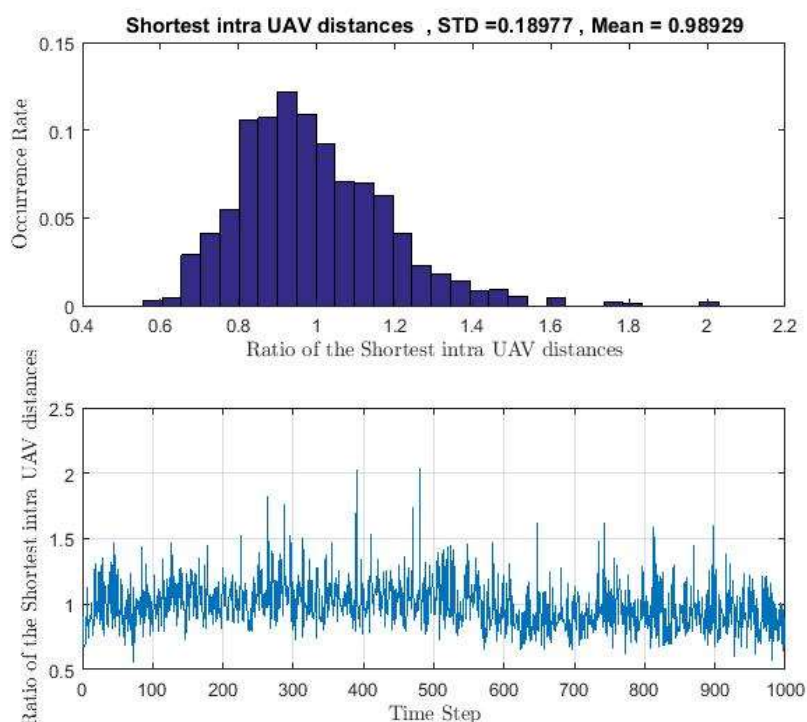
نتایج به‌دست‌آمده برای نسبت مقادیر تابع معیار عملکرد در شکل ۴-۱۲، دارای میانگینی برابر ۰/۹۹۱۸ و انحراف معیار ۰/۵۹۴ هستند و برای نسبت طولانی‌ترین فاصله لینک در شکل ۴-۱۳، میانگینی معادل ۱/۰۵۰۱ و انحراف معیاری برابر با ۰/۱۰۰۸ دارند و سرانجام برای نسبت کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها که در شکل ۴-۱۴ قابل مشاهده است، میانگینی برابر با ۰/۹۸۹۲ و انحراف معیار آن‌ها ۰/۰۵۹۴ است؛ در نتیجه، این شکل‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که نسبت هر سه مورد در بیشتر مراحل زمانی بسیار نزدیک به یک است؛ به عبارت دیگر، الگوریتم IFTM تقریباً همان عملکرد الگوریتم PSO-Only را فارغ از مسیر حرکت پهپادهای MU برای مدیریت شبکه‌های هواتور فراهم می‌کند و از این جهت که الگوریتم IFTM سربار محاسباتی و زمان اجرای بسیار پایین‌تری از الگوریتم PSO-Only دارد می‌تواند گزینه بهینه‌تری برای استفاده در شبکه‌های هواتور باشد.



شکل ۴-۱۲- عملکرد تابع معیار نرمالیزه شده IFTM با PSO-Only وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۴-۵ ذکر شده است، در نظر بگیریم.



شکل ۴-۱۳- عملکرد طولانی‌ترین فاصله لینک نرمالیزه شده IFTM با PSO-Only وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۷-۵ ذکر شده است، در نظر بگیریم.



شکل ۴-۱۴- عملکرد کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها نرمالیز شده IFTM با PSO-Only، وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۴-۵ ذکر شده است، استفاده شود.

۴-۴- الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی شبکه‌های هواتور اولویت دار

در بخش‌های پیشین اشاره کردیم که حرکت‌های پهپادهای MU با توجه به نوع مأموریت آن‌ها می‌تواند متفاوت و غیرقابل پیش‌بینی باشد و این عدم تخمین صحیح از حرکت این پهپادها، باعث عدم توانایی در کنترل حرکت آن‌ها به‌منظور بهبود عملکرد شبکه می‌شود. در این بخش ذکر این نکته حائز اهمیت است که در این تحقیق فرض برابر بودن اولویت اختصاص پهپادهای RU به همه پهپادهای MU، صرف‌نظر از نوع مأموریت آن‌ها مطرح بوده و شبکه هیچ استثنایی بین پهپادهای MU در نظر نمی‌گرفته است. با این حال می‌توان مسئله‌ای را در نظر گرفت که در آن پهپادهای MU دارای اولویت‌های متفاوتی در شبکه‌های هواتور هستند که این تغییر اولویت می‌تواند ناشی از تضمین یک مسیر مشخص انتقال دیتا از پهپاد MU به GCS باشد یا اینکه ناشی از کاهش توان مصرفی پهپادهای RU در یک مسیر خاص و یا مواردی از این قبیل باشد. در این بخش، با فرض عدم برابری اولویت

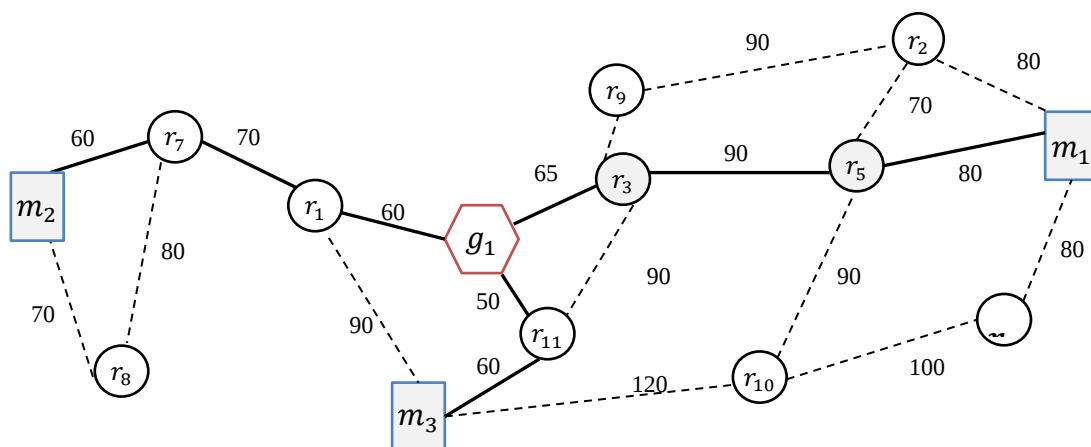
مأموریت پهبادهای MU، رفتار الگوریتم IFTM را در مدیریت شبکه‌های هواتور موردبررسی قرار می‌دهیم.

رویکردها و روش‌های متفاوتی را می‌توان در خصوص نحوه اولویت‌بندی در پهبادهای MU در نظر گرفت؛ ازجمله مدل‌سازی مسئله تعیین اولویت و یا مشخص کردن ضریب اولویت که می‌تواند به‌صورت دلخواه توسط مدیر شبکه تعیین شود یا به‌صورت پویا از خروجی یک تابع به دست آید. ما در این پایان‌نامه، از رویکرد تعریف ضریب اولویت دلخواه بهره برده‌ایم. این ضریب را در قیود تابع معیار تأثیر داده‌ایم و به شبیه‌سازی الگوریتم مدیریت توپولوژی با قیود جدید پرداخته‌ایم.

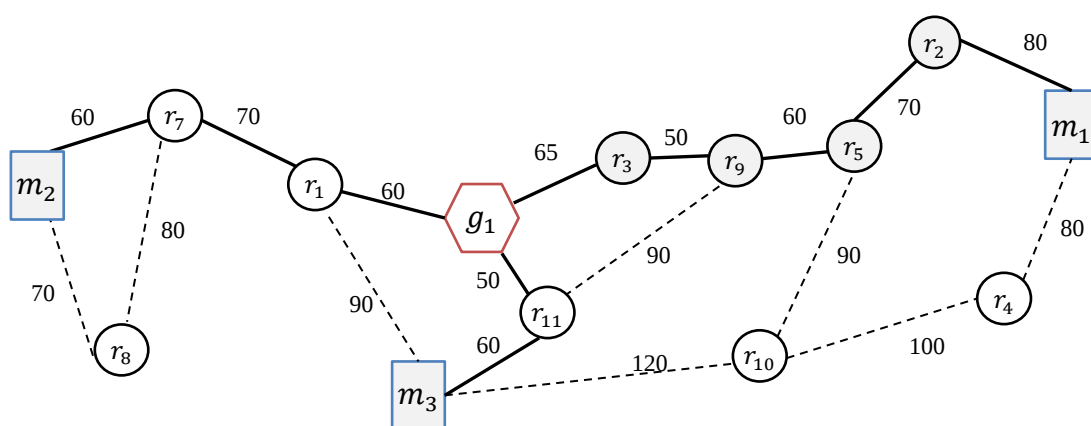
لازم به ذکر است که تغییر در قیود تابع از یک‌طرف باعث سادگی و روانی برنامه می‌شود و از سوی دیگر احتمال فراخوانی بیشتر الگوریتم PSO موجود در الگوریتم مدیریت یکپارچه توپولوژی را به همراه دارد و همچنین می‌تواند در مقدار عملکرد تابع معیار نیز مؤثر باشد.

در شبیه‌سازی الگوریتم اصلاحی IFTM که آن‌ها با $IFTM-P^1$ نام‌گذاری می‌کنیم، اختصاص اولویت بالاتر به پهباد MU_1 را در الگوریتم استفاده کرده‌ایم. در شکل ۴-۱۵ نمونه‌ای از تغییر اولویت در گره‌های MU شبکه هواتور را مشاهده می‌کنید. شکل ۴-۱۵ قسمت (a) شبکه را بدون استفاده اولویت مأموریت پهبادها نشان می‌دهد و در قسمت (b)، شبکه در حالت استفاده از اولویت مأموریت پهباد m_1 نمایش داده شده است.

¹. IFTM with Priority



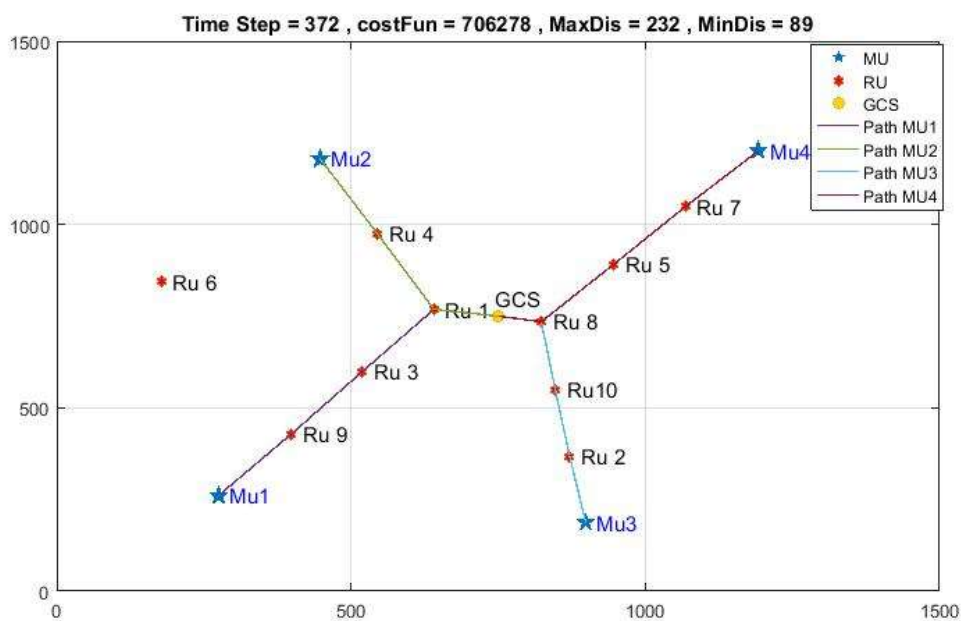
(a) توپولوژی شبکه در زمان استفاده از الگوریتم IFTM



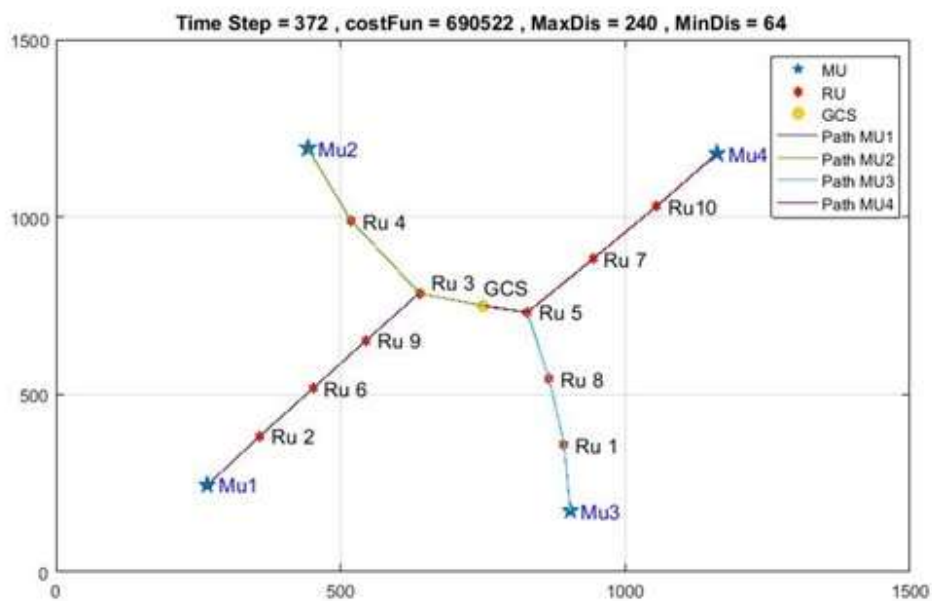
(b) توپولوژی شبکه در زمان استفاده از الگوریتم IFTM-P

شکل ۴-۱۵- مقایسه تعداد پهنادهای مسیر m_1 برای دو الگوریتم IFTM و IFTM-P

نتیجه شبیه‌سازی استفاده از الگوریتم IFTM و IFTM-P برای پهناد m_1 در شکل‌های ۴-۱۶ و ۴-۱۷ که در یک زمان مشخص هستند را می‌توان مشاهده کرد که تعداد بیشتری از پهنادهای RU به مسیر پهناد MU_1 به GCS اختصاص پیدا کرده است.

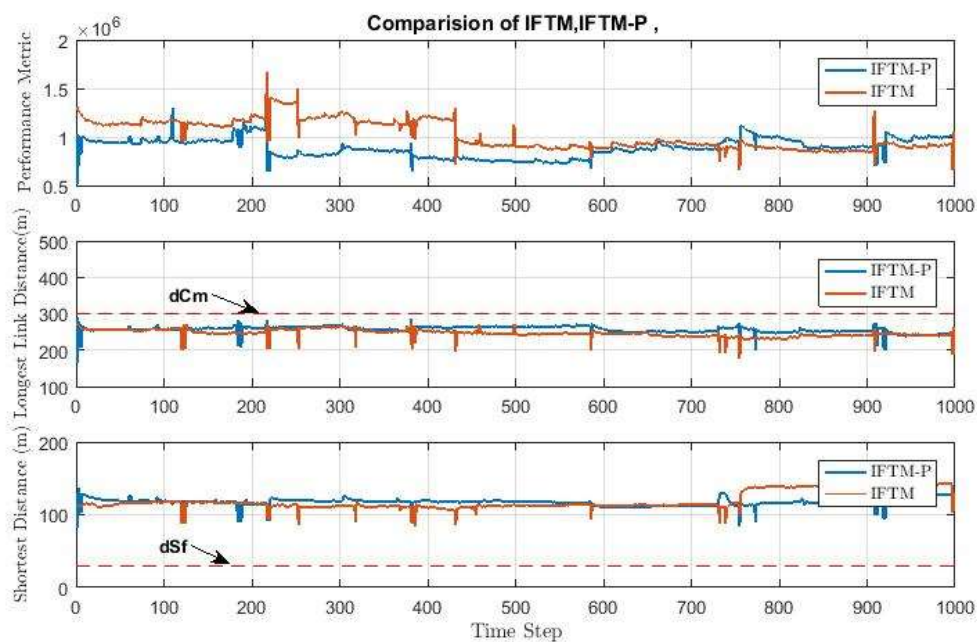


شکل ۴-۱۶- شبیه سازی تعداد پهپادهای مسیر MU1 برای الگوریتم IFTM در زمان $t=372$

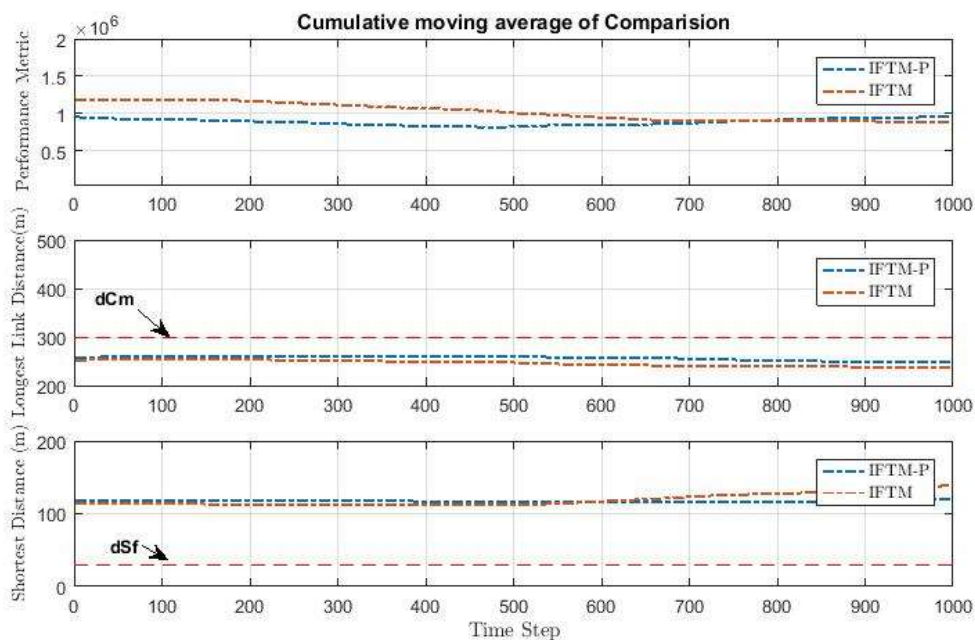


شکل ۴-۱۷- شبیه سازی تعداد پهپادهای مسیر MU1 برای الگوریتم IFTM-P در زمان $t=372$

در ادامه، عملکردهای الگوریتم IFTM را با عملکرد الگوریتم IFTM-P و با ۱۰ نمونه مختلف از مسیرهای حرکت پهپادهای MU مقایسه می‌کنیم. هر کدام از این نمونه‌ها دارای ۱۰۰۰ مرحله زمانی است و هر نمونه به‌طور مستقل با مدل پرواز لوی تولید می‌شوند؛ از این‌رو، ما در کل ۱۰۰۰۰ نمونه داریم و برای هر یک از آن‌ها مقدار تابع معیار عملکرد، بیشترین فاصله لینک و کوتاه‌ترین فاصله بین پهپاد را به همراه نسبت آن‌ها در الگوریتم IFTM-P و الگوریتم IFTM به دست می‌آوریم.



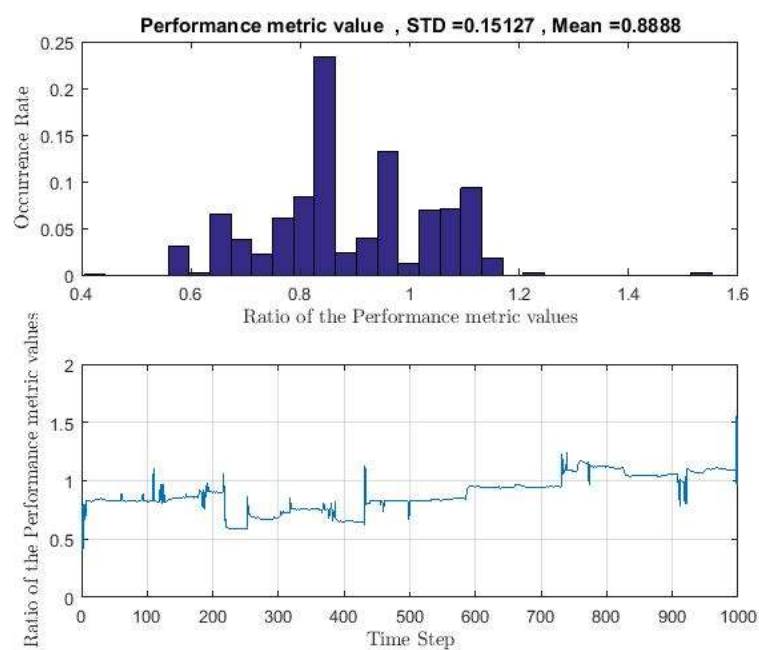
(a) مقدار تابع عملکرد، طولانی‌ترین فاصله مسیرهای مسیریابی فعال و کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها



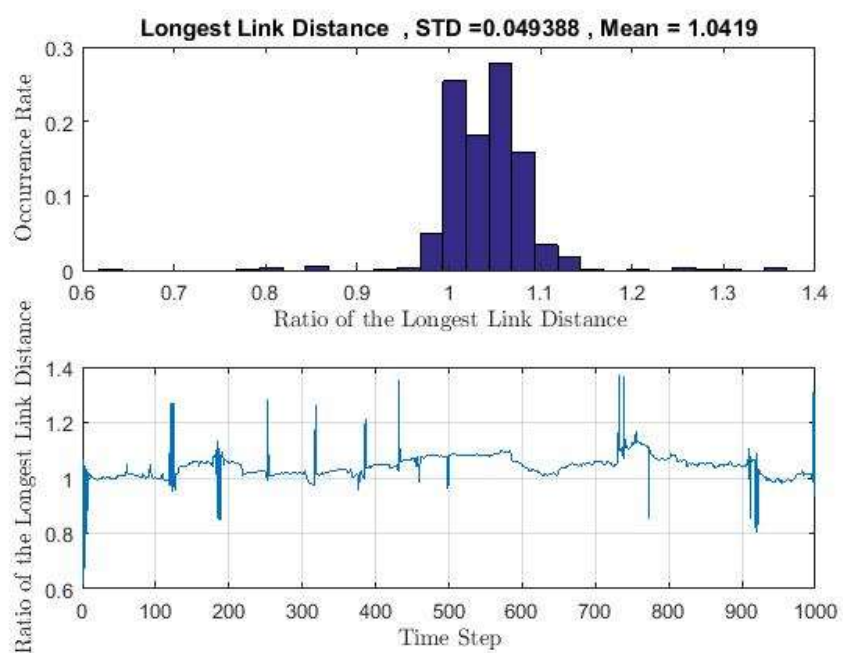
(b) میانگین تجمعی مقدار تابع عملکرد، طولانی‌ترین فاصله مسیرهای مسیریابی فعال، کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها

شکل ۴-۱۸- مقایسه دو الگوریتم IFTM-P و IFTM

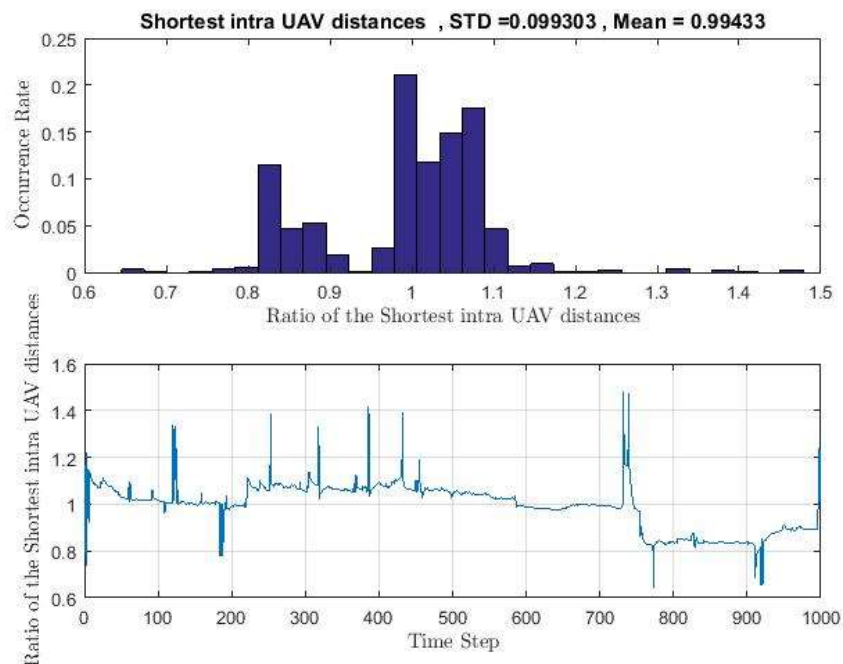
در شکل ۴-۱۹ نیز به‌مانند مقایسه‌هایی که در بخش گذشته انجام شده بود، در هر نمودار، بیشترین نسبت‌های به‌دست‌آمده در محدوده یک متمرکز شده است و بیانگر آن است که الگوریتم IFTM-P در اکثر مراحل زمانی عملکردهای مشابه الگوریتم IFTM را ارائه می‌دهد. بدین ترتیب، نسبت مقادیر تابع معیار عملکرد به‌دست‌آمده در قسمت a شکل ۴-۱۹، دارای میانگینی برابر ۰/۸۸۸ و انحراف معیار ۰/۱۵۱۲ هستند. برای نسبت طولانی‌ترین فاصله لینک در قسمت b شکل ۴-۱۹، میانگین آن‌ها معادل ۱/۰۴۱۹ و انحراف معیاری برابر با ۰/۰۴۹۳ دارند و در پایان، برای نسبت کوتاه‌ترین فاصله بین پهپاد در قسمت c شکل ۴-۱۹، میانگینی برابر با ۰/۹۹۴۳ و انحراف معیار آن‌ها ۰/۰۹۹۳ می‌باشد.



(a) مقدار تابع عملکرد



(b) طولانی ترین فاصله لینک



(c) کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها

شکل ۴-۱۹- عملکرد الگوریتم IFTM نرمالایز شده با الگوریتم IFTM-P. وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۴-۵ ذکر شده است، در نظر بگیریم.

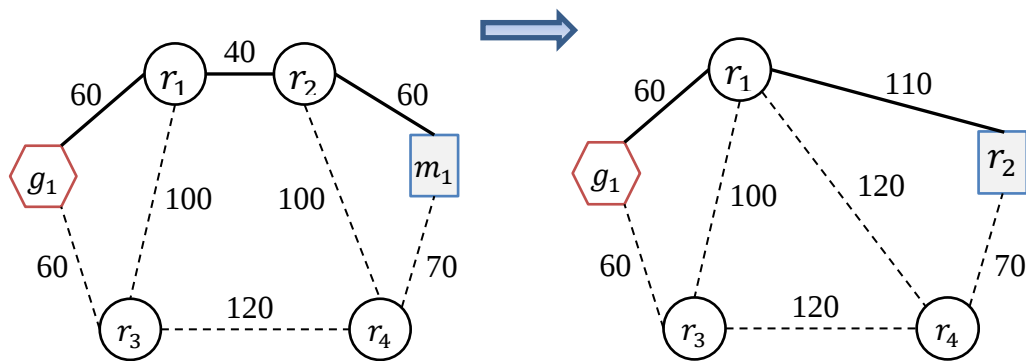
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم اصلاحی IFTM-P عملکرد راضی‌کننده‌ای را در جهت برآورده کردن ویژگی اختصاص اولویت در شبکه‌های هواتور و بدون ایجاد تغییرات زیاد در مقدار تابع معیار عملکرد، طولانی‌ترین فاصله لینک و کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها ایجاد می‌کند.

۴-۵- بررسی رفتار الگوریتم IFTM در هنگام اختلال در عملکرد پهنادهای MU

یکی از چالش‌های شبکه بی‌سیم پهنادی بررسی رفتار شبکه در برابر عوامل محیطی، همچون طوفان، گردوغبار، باران‌های شدید و غیره می‌باشد از سوی دیگر، می‌توان عواملی همانند کاهش توان باتری پهنادهای، برخورد به موانع و خرابی‌های سخت‌افزاری را نیز به موارد بالا افزود. در بخش پایانی این تحقیق، الگوریتم IFTM را تغییر داده و حذف یکی از پهنادهای MU در یک مرحله زمانی مشخص را شبیه‌سازی کرده‌ایم و به بررسی رفتار الگوریتم IFTM تغییر یافته^۱ (IFTM-R) با این پدیده پرداخته‌ایم. نگرشی که ما در این الگوریتم در مواجهه با این پدیده در نظر گرفته‌ایم سوئیچ وظیفه و فعالیت^۲ نزدیک‌ترین پهناد RU که وظیفه رله کردن و انتقال دیتا را از MU به GCS بر عهده دارد به پهناد MU ای که به دلایلی حذف شده است. بدین ترتیب پهناد RU از الگوی حرکت MU حذف شده پیروی می‌کند و در نتیجه می‌توان از ادامه مأموریت آن توسط این پهناد RU اطمینان حاصل کرد. شکل زیر فرآیند این شبیه‌سازی را به تصویر درآورده است. همان‌طور که در شکل ۴-۲۰ مشاهده می‌شود پهناد m_1 در زمان $t=t_0$ حذف شده و نزدیک‌ترین پهناد به آن جایگزین پهناد m_1 شده است. در شکل ۴-۱۲ به اجرای الگوریتم اصلاحی IFTM-R با استفاده از سناریوی بخش ابتدایی این فصل پرداخته‌ایم با این تفاوت که این سناریو را با در نظر گرفتن حذف پهناد m_3 شبیه‌سازی کرده‌ایم.

^۱ Integrated Topology Management In Fanet-With Removed Mu

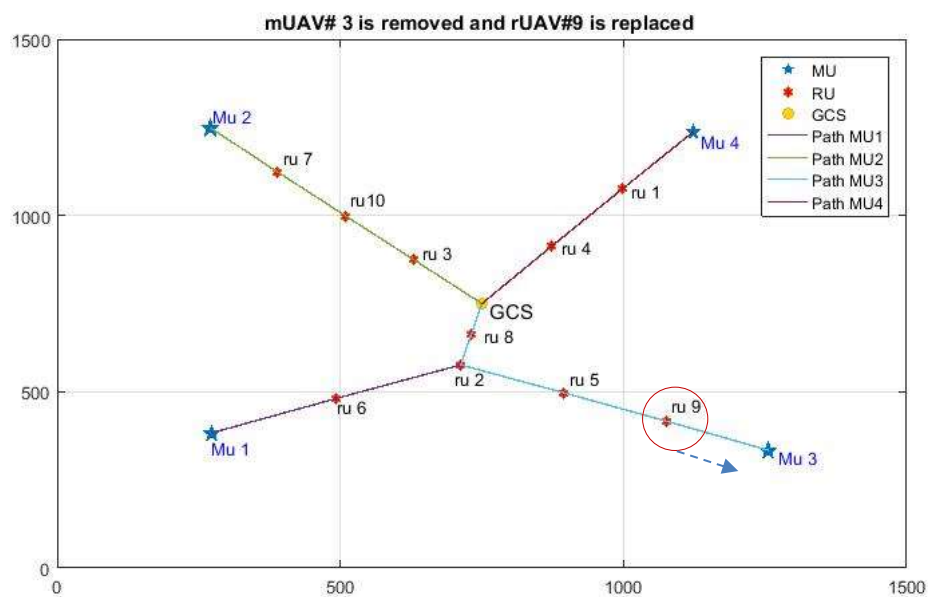
^۲ Task



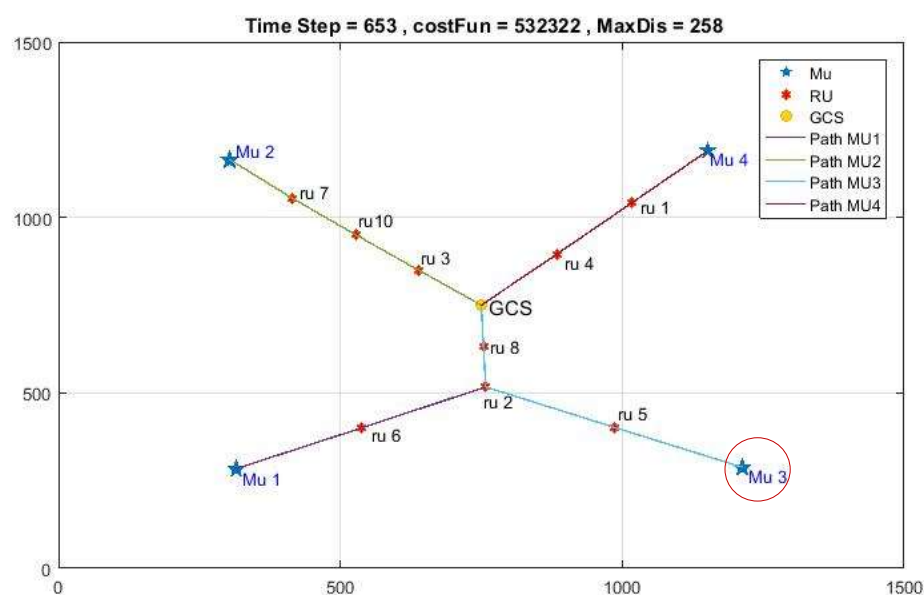
شکل ۴-۲۰- حذف یک پهنپاد MU و جایگزینی آن با نزدیک‌ترین پهنپاد Ru در زمان $t = t_0$

انتظار می‌رود با حذف یک پهنپاد Ru از فرآیند مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور، عملکرد تابع معیار، طولانی‌ترین فاصله لینک و کوتاه‌ترین فاصله بین پهنپادها تغییر کند که ما در مقایسه الگوریتم IFTM و الگوریتم IFTM-R، این تغییرات را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

در این بخش نیز ما عملکردهای الگوریتم IFTM را با عملکرد الگوریتم IFTM-R و با ۱۰ نمونه مختلف از مسیرهای حرکت پهنپادهای MU مورد بررسی قرار داده‌ایم. هریک از این نمونه‌ها دارای ۱۰۰۰ مرحله زمانی است و هر نمونه به‌طور مستقل با مدل پرواز لوی تولید می‌شود؛ بنابراین، در مجموع ۱۰۰۰۰ نمونه داریم و برای هر یک از آنها مقدار تابع معیار عملکرد، بیشترین فاصله لینک و کوتاه‌ترین فاصله بین پهنپاد را به همراه نسبت آنها در الگوریتم IFTM-R و الگوریتم IFTM به دست می‌آوریم.

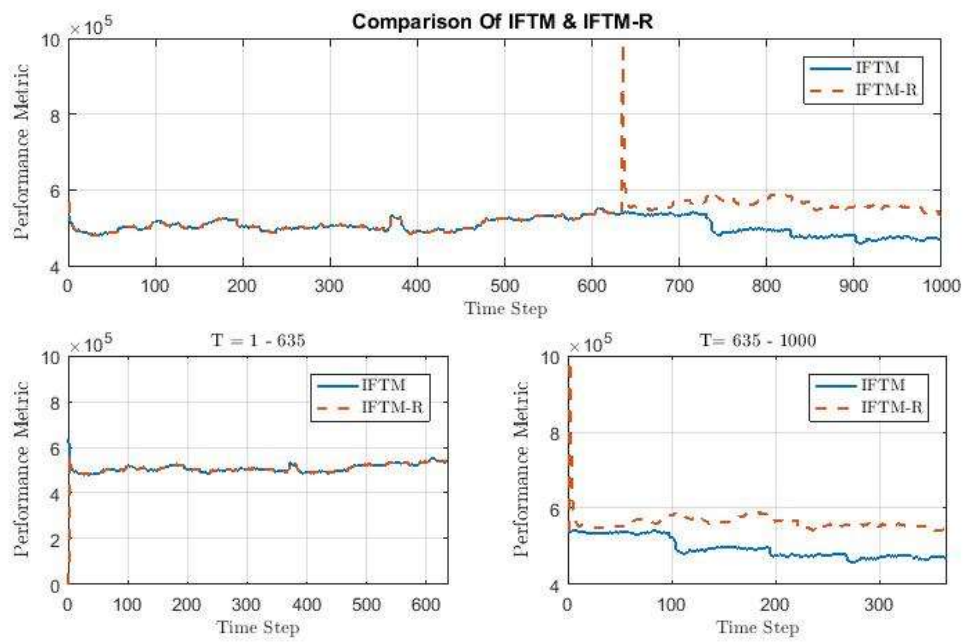


(a) پیش از حذف شدن پهپاد MU و جایگزینی آن با پهپاد RU

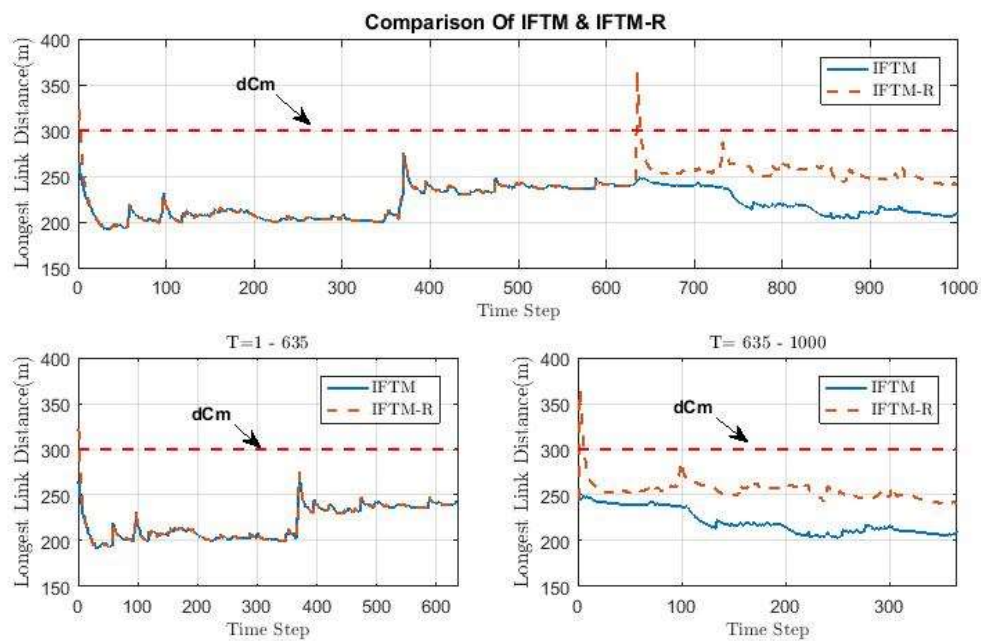


(b) پس از حذف شدن پهپاد MU3 و جایگزینی آن با پهپاد RU

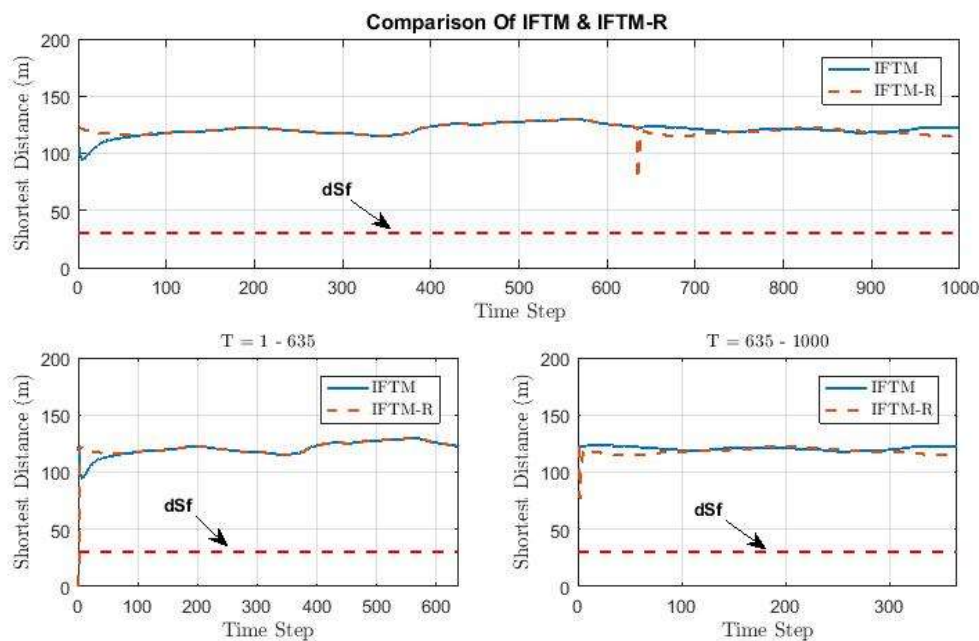
شکل ۴-۲۱- شبیه سازی حذف یک پهپاد MU و جایگزینی آن با نزدیک ترین پهپاد Ru در زمان $T =$



(a) مقدار تابع عملکرد



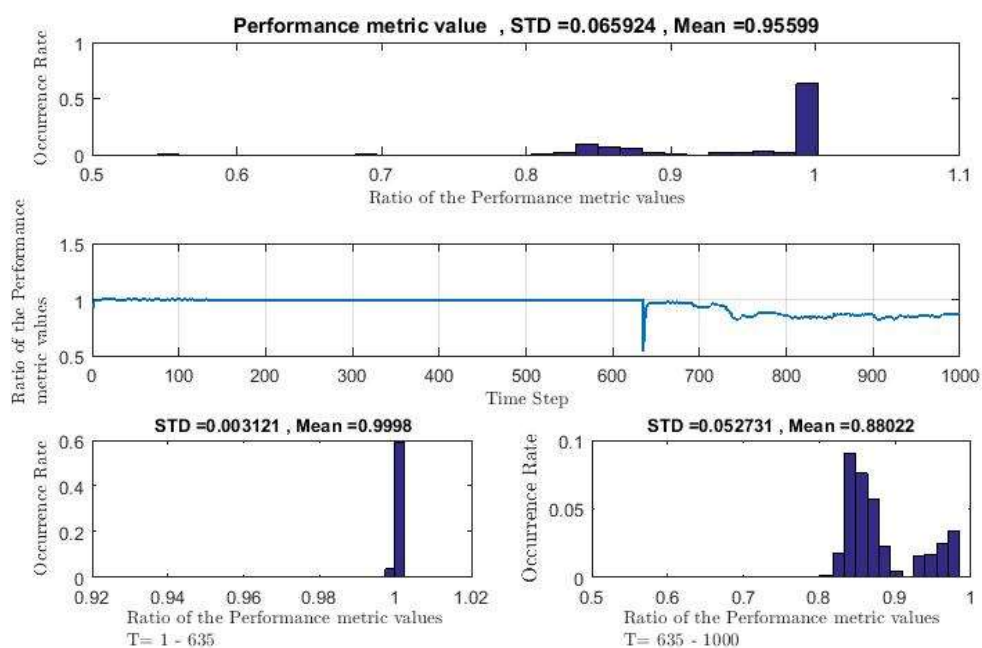
(b) طولانی ترین فاصله مسیرهای مسیریابی فعال



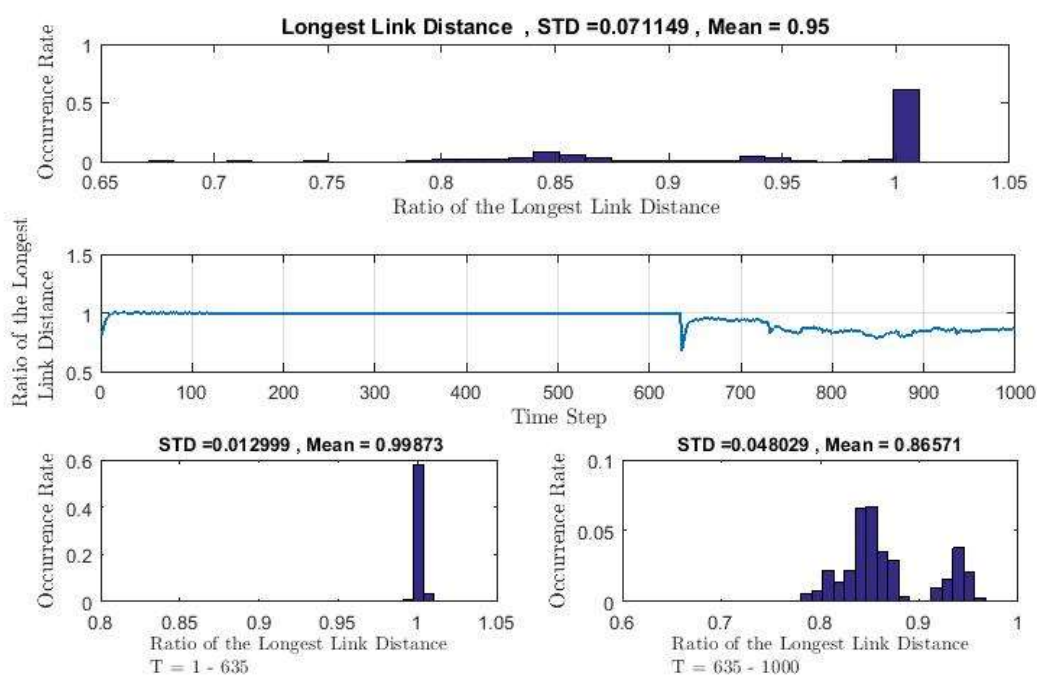
(c) کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها

شکل ۴-۲۲- مقایسه دو الگوریتم IFTM و IFTM-R. مقدار تابع عملکرد، طولانی‌ترین فاصله مسیریابی فعال، کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها

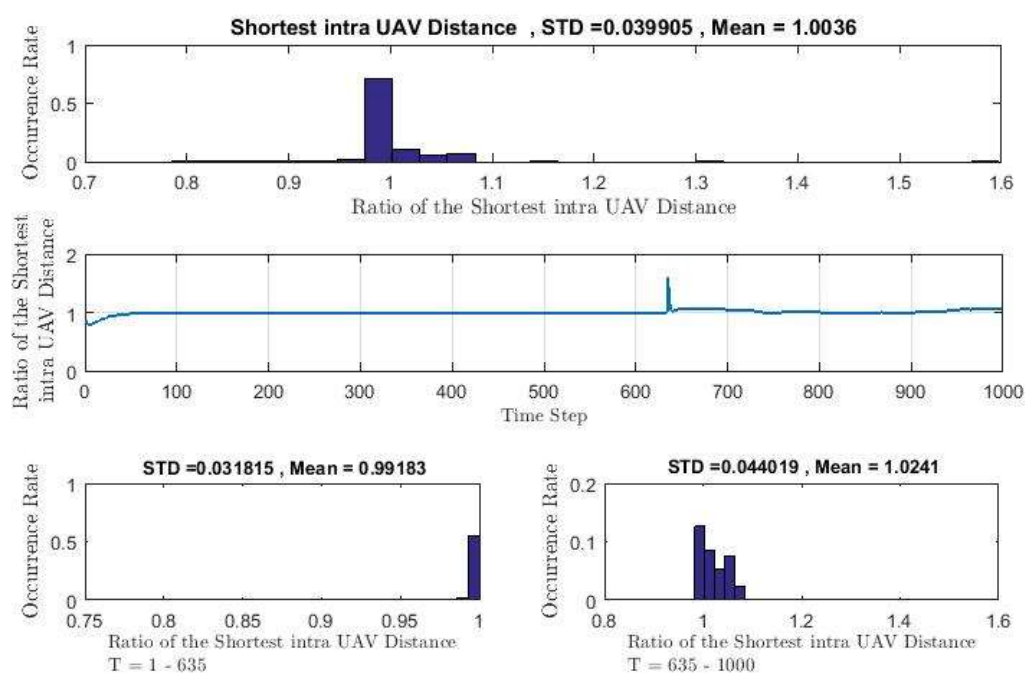
در شکل ۴-۲۳ نیز به‌مانند مقایسه‌هایی که در بخش گذشته انجام‌شده بود، در هر نمودار، بیشترین نسبت‌های به‌دست‌آمده در محدوده یک متمرکز شده است که بیانگر آن است که الگوریتم IFTM-R در اکثر مراحل زمانی عملکردهای مشابه الگوریتم IFTM را ارائه می‌دهد. بدین ترتیب، نسبت مقادیر تابع معیار عملکرد به‌دست‌آمده در قسمت (a) شکل ۴-۲۳، دارای میانگینی برابر ۰/۹۵۵۹ و انحراف معیار ۰/۰۶۵۹ هستند. برای نسبت طولانی‌ترین فاصله لینک در شکل ۴-۲۳ قسمت (b)، میانگین آن‌ها معادل ۰/۹۵ و انحراف معیاری برابر با ۰/۰۷۱۱ به‌دست‌آمده است و نسبت کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها در قسمت (c) از شکل ۴-۲۳، دارای میانگینی برابر با ۱/۰۰۳۶ و انحراف معیار آن‌ها ۰/۰۳۹۹ است.



(a) مقدار تابع عملکرد



(b) طولانی ترین فاصله لینک



(c) کوتاه‌ترین فاصله بین پهپادها

شکل ۴-۲۳- عملکرد الگوریتم IFTM نرمالایز شده با الگوریتم IFTM-R. وقتی، نمونه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۴-۵ ذکر شده است، در نظر بگیریم.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه، ما یک مسئله مدیریت توپولوژی را در شبکه های هواتور مورد مطالعه قرار داده ایم که هدف آن به حداکثر رساندن عملکرد شبکه از طریق استقرار و حرکت پهپادهای RU منطبق با حرکت های غیرقابل پیش بینی پهپادهای MU است. هنگام تعریف مسئله مدیریت توپولوژی شبکه های هواتور، وابستگی بین عملکرد توپولوژی شبکه و پروتکل مسیریابی، محدودیت ارتباطی پایان به پایان برای پشتیبانی از ارتباطات موقت قابل اعتماد در نظر گرفته ایم و همچنین محدودیت ایمنی برای حفظ فاصله ایمنی بین پهپادها را مدل سازی کرده ایم. در بخش ابتدایی شبیه سازی، ابتدا الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه های هواتور مبتنی بر الگوریتم PSO را ایجاد کردیم که موقعیت پهپادهای RU را بر اساس مکان پهپادهای MU و همچنین پروتکل مسیریابی مورد استفاده در شبکه بهینه می کند و سپس الگوریتمی برای تنظیم توپولوژی شبکه های هواتور با سربار محاسباتی پایین به وجود آوردیم که می تواند موقعیت پهپادهای RU را با تغییرات مکان پهپادهای MU سازگار و تنظیم کند. سرانجام، با تعریف فاصله ویرایش توپولوژی، که تغییرات توپولوژی و میزان تخطی از محدودیت ها را اندازه گیری می کند، الگوریتم مدیریت یکپارچه شبکه هواتور را توسعه دادیم، به طوری که الگوریتم های ساخت و تنظیم توپولوژی شبکه های هواتور را با در نظر گرفتن حدود آستانه، به روزرسانی مسیرهای مسیریابی و فرآیند بازسازی توپولوژی ادغام می کند. از نتایج شبیه سازی، نشان داده ایم که الگوریتم ساخت توپولوژی شبکه های هواتور مبتنی بر PSO در همه جنبه های مورد نظر از روش مبتنی بر الگوریتم تصادفی، بهتر عمل می کند؛ مانند عملکرد شبکه، طولانی ترین پیوند فاصله و کوتاه ترین فاصله بین پهپاد. علاوه بر این، اثربخشی در نظر گرفتن به روزرسانی مسیرهای مسیریابی و بازسازی توپولوژی را در الگوریتم $IFTM$ برای مدیریت توپولوژی شبکه های هواتور را در شرایط متفاوت مورد بررسی قرار دادیم. ما همچنین نشان داده ایم که الگوریتم $IFTM$ عملکرد قابل قبولی را در مدیریت توپولوژی شبکه، نسبت به الگوریتم PSO -Only دارد با این تفاوت که زمان اجرای بسیار کمتری را نسبت به الگوریتم PSO -Only احتیاج دارد و این ویژگی برای نوسانات سریع توپولوژی و مکرر در شبکه های هواتور نکته بسیار مهمی محسوب می شود. سرانجام در بخش های انتهایی این پایان نامه، الگوریتم مبتنی بر

اولویت‌بندی و الگوریتم سوئیچ فعالیت پهنادهای MU را در زمان خرابی و رویدادهای طبیعی، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادیم. با بررسی و مقایسه آن‌ها با الگوریتم اصلی مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور، نتایج مطلوبی برای استفاده از این قابلیت الگوریتم مدیریت توپولوژی در شبکه‌های هواتور را به همراه داشت.

۵-۲- پیشنهادها

همان‌طور که در بخش مدل‌سازی مسئله مدیریت توپولوژی شبکه‌های هواتور بدان اشاره شد تابع معیار عملکرد می‌تواند از روش‌های گوناگونی مدل شود. یکی از مواردی که می‌تواند در تحقیق‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد، استفاده از مدل سیستم با چند تابع عملکرد به منظور به حداکثر رساندن عملکرد شبکه است که می‌تواند در قالب بهینه‌سازی‌های چندهدفه مورد مطالعه قرار گیرد.

همچنین در مدل‌سازی و شبیه‌سازی انجام گرفته در این پایان‌نامه، تخصیص گره کنترل‌کننده در شبکه در نظر گرفته نشده است و گره‌های شبکه از مکان‌های فعلی همسایه‌های خود در زمان شبیه‌سازی، بدون استفاده از تبادل پیام‌های مورد نیاز مطلع هستند. در نتیجه، استفاده از این الگوریتم به تنهایی در سناریوی واقعی، منتج به عملکرد مؤثر و کارای شبکه نخواهد شد. بنابراین، نیاز استفاده از یک پروتکل ارتباطی که بتواند رفتار پهنادها را هماهنگ کند به خوبی احساس می‌شود که در نتیجه آن، مزایای شبکه‌های هواتور را به حداکثر برسد. در این زمینه، شبکه‌های مبتنی بر نرم افزار (SDN) یک رویکرد امیدوارکننده برای وظیفه کنترل شبکه‌های هواتور است، زیرا مدیریت کامل شبکه را با جداسازی لایه کنترل و لایه دیتا انجام می‌دهد.

منابع

1. O'Donnell, S. (2017). A short history of unmanned aerial vehicles. *Media Centre Blog*, Jun, 16.
2. Hallion, R. (2003). *Taking flight: inventing the aerial age, from antiquity through the First World War*. Oxford University Press.
3. Layman, R. D. (1996). *Naval Aviation in the First World War: Its Impact and Influence*. Bloomsbury Academic.
4. Ford, J. (2018). The History Of Drones (Drone History Timeline From 1849 To 2019). Retrieved February, 22, 2019.
5. Challita, U., Ferdowsi, A., Chen, M., & Saad, W. (2019). Machine learning for wireless connectivity and security of cellular-connected UAVs. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 28-35.
6. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36-42.
7. Orsino, A., Ometov, A., Fodor, G., Moltchanov, D., Militano, L., Andreev, S., ... & Koucheryavy, Y. (2017). Effects of heterogeneous mobility on D2D-and drone-assisted mission-critical MTC in 5G. *IEEE Communications Magazine*, 55(2), 79-87.
8. Nam, Y. H., Ng, B. L., Sayana, K., Li, Y., Zhang, J., Kim, Y., & Lee, J. (2013). Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology. *IEEE Communications Magazine*, 51(6), 172-179.
9. 3GPP TR 36.897. (2015). Study on Elevation Beamforming/Full-Dimension (FD) MIMO for LTE.
10. Lee, W., Lee, S. R., Kong, H. B., & Lee, I. (2013, December). 3D beamforming designs for single user MISO systems. In *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 3914-3919). IEEE.
11. Nam, Y. H., Rahman, M. S., Li, Y., Xu, G., Onggosanusi, E., Zhang, J., & Seol, J. Y. (2015, February). Full dimension MIMO for LTE-Advanced and 5G. In *2015 Information Theory and Applications Workshop (ITA)* (pp. 143-148). IEEE.
12. Shafi, M., Zhang, M., Smith, P. J., Moustakas, A. L., & Molisch, A. F. (2006, June). The impact of elevation angle on MIMO capacity. In *2006 IEEE International Conference on Communications* (Vol. 9, pp. 4155-4160). IEEE.

13. Cheng, X., Yu, B., Yang, L., Zhang, J., Liu, G., Wu, Y., & Wan, L. (2014). Communicating in the real world: 3D MIMO. *IEEE wireless communications*, 21(4), 136-144.
14. Li, Y., Ji, X., Liang, D., & Li, Y. (2013). Dynamic beamforming for three-dimensional MIMO technique in LTE-advanced networks. *International journal of antennas and propagation*, 2013.
15. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.
16. Dawy, Z., Saad, W., Ghosh, A., Andrews, J. G., & Yaacoub, E. (2016). Toward massive machine type cellular communications. *IEEE Wireless Communications*, 24(1), 120-128.
17. Lien, S. Y., Chen, K. C., & Lin, Y. (2011). Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications. *IEEE Communications Magazine*, 49(4), 66-74.
18. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, 1(1), 22-32.
19. Chakareski, J. (2017, May). Aerial UAV-IoT sensing for ubiquitous immersive communication and virtual human teleportation. In *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)* (pp. 718-723). IEEE.
20. Chen, M., Saad, W., & Yin, C. (2019). Echo-liquid state deep learning for 360° content transmission and caching in wireless VR networks with cellular-connected UAVs. *IEEE Transactions on Communications*, 67(9), 6386-6400.
21. Bhushan, N., Li, J., Malladi, D., Gilmore, R., Brenner, D., Damnjanovic, A., ... & Geirhofer, S. (2014). Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 82-89.
22. Han, Z., Swindlehurst, A. L., & Liu, K. R. (2009). Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(7), 3533-3546.
23. Kim, S., Oh, H., Suk, J., & Tsourdos, A. (2014). Coordinated trajectory planning for efficient communication relay using multiple UAVs. *Control Engineering Practice*, 29, 42-49.

24. Ladosz, P., Oh, H., & Chen, W. H. (2016, June). Optimal positioning of communication relay unmanned aerial vehicles in urban environments. In *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1140-1147). IEEE.
25. Dengiz, O., Konak, A., & Smith, A. E. (2011). Connectivity management in mobile ad hoc networks using particle swarm optimization. *Ad hoc networks*, 9(7), 1312-1326.
26. Magán-Carrión, R., Camacho, J., Garcia-Teodoro, P., Flushing, E. F., & Di Caro, G. A. (2017). A Dynamical Relay node placement solution for MANETs. *Computer Communications*, 114, 36-50.
27. Sanfeliu, A., & Fu, K. S. (1983). A distance measure between attributed relational graphs for pattern recognition. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3), 353-362.
28. R. Metzler, A. V. Chechkin, V. Y. Gonchar, and J. Klafter, (2007). Some fundamental aspects of lévy flights. *Chaos, Solitons & Fractals*, 34(1), 129–142.
29. G. M. Viswanathan., V. Afanasyev., S. V. Buldyrev., E. J. Murphy., P. A. Prince, and H. E. Stanley.(1996). Lévy flight search patterns of wandering albatrosses. (*Nature*.381) (pp. 413–415).

Abstract

The flying ad hoc networks (FANETs) are composed of unmanned aerial vehicles (UAVs), which are proposed as a promising technology in future network systems due to the diversity and adaptivity of uavs. Rapid and frequent topological change is one of the most distinctive features of FANET networks, which is caused by their high speed and mobility; therefore, managing adaptive topology with drone movements and finding their optimal locations is one of the most important issues in FANET networks. Finding the optimal location of uavs has attracted much attention among researchers to solve the node placement problem of these complex networks. In the past decades, due to the complexity and difficulty of the relay node placement problem, many researchers just tried to solve this problem in purely static networks without considering topological changes such as wireless sensor networks. In this thesis, the issue of topology management of FANET networks is investigated based on their topology changes, in which the location and movement of uavs are optimized to heighten the network performance.

The routing protocol is considered as an arbitrary function during problem modeling; because the network performance is completely related to the utilized routing protocol. Two algorithms were developed in this research. The first algorithm was developed to construct the topology of FANET networks by using the primary problem information and based on particle swarm optimization (PSO) algorithm. The second algorithm was developed to adjust the network topology, which gradually adjusts the movements of uavs using the gradient descent algorithm. Finally, by defining the topology edit distance that measures the degree of topology changes of ad-hoc networks, an integrated topology management algorithm was developed by considering both algorithms for constructing and adjusting the topology in FANET networks. The simulation results indicated that the integrated topology management algorithm can show proper performance with a low computational load, which is considered as one of the most important aspects of topology management algorithms in rapidly changing topology in FANET networks.

Keywords: Flying ad hoc networks (FANETs), Gradient descent, Particle swarm optimization (PSO), Relay placement, Topology management, Unmanned aerial vehicles (UAVs), Uavs placement, Uav mobility.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotics Engineering
M.Sc. Thesis in Communication Systems Engineering

Integrated Topology Management in FANETs

By: Hasan Mirzaei

Supervisor:
Dr. Omid Reza Maarouzi

September 2021