



## کنترل پوشش توزیع شده سیستم چند عامله در یک منطقه بحران زده و مکانیابی اهداف ساکن احتمالی موجود در منطقه

علی امین زاده<sup>۱</sup> و عبدالمجید خوشنود<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، آزمایشگاه پرند هادی بدون سرنشین، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

### چکیده

این مقاله به مساله جستجو و پوشش مشارکتی اختصاص دارد که در آن یک الگوریتم کنترل توزیع شده برای جستجوی خودکار قربانیان بلایای طبیعی با استفاده از سیستم چند عامله مشارکتی به کار گرفته شده است. مدیریت بحران یک مسابقه با زمان است. بنابراین پاسخ سریع به بحران می‌تواند به طور چشمگیری از میزان خسارات و آسیب‌ها بکاهد. بدیهی است که یک نقشه فراگیر از منطقه بحران زده بلافاصله پس از وقوع به تیم کنترل بحران کمک می‌کند تا عملیات مدیریت بحران را با اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری طراحی نماید. در این تحقیق یک محیط مستطیلی در نظر گرفته شده که ۴ پرند بال-ثابت با پرواز بر فراز آن علاوه بر پوشش حداکثری محیط، محل دقیق ۱۸ هدف ساکن توزیع شده را می‌یابند. بدین منظور، UAVها با همکاری یکدیگر نقشه شناخت شامل نقشه‌های احتمال حضور هدف و نامعینی را می‌سازند و براساس همین نقشه شناخت و همچنین پیش‌بینی سه حرکت بعدی خود و عامل‌های همسایه، بهترین مسیر بدون برخورد را محاسبه می‌کنند. مقایسه روش مشارکتی و غیر مشارکتی نشان می‌دهد، در روش کنترل توزیع شده مشارکتی، درصد پوشش محیط و میانگین نامعینی بسیار زودتر به حداکثر و حداقل مقدار قابل قبول خود می‌رسد.

**کلمات کلیدی:** کنترل پوشش مشارکتی؛ کنترل توزیع شده؛ درخت تصمیم‌گیری؛ مدیریت بحران؛ الگوریتم کنترلی با افق دورشونده.

## Distributed Coverage Control of a Multi Agent System in a Disaster Area and Localizing the Stationary Probable Targets in the Environment

A. Aminzadeh<sup>1</sup>, A. Khoshnood<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, UAV Lab., Aerospace. Eng., K. N. Toosi University of Technology., Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Aerospace. Eng., K. N. Toosi University of Technology., Tehran, Iran

### Abstract

This paper is dedicated to a cooperative search and coverage problem in which we applied a distributed coverage control algorithm for automated victim search using a cooperative multi-UAVs system. Disaster management is a competition with time. So, fast response to disaster can significantly decrease damages and losses. It is obvious that a comprehensive map of the affected area immediately after disaster occurred, helps disaster control unit to quickly and initially evaluate the degree of damages, amount of economic losses and casualties. Therefore, they can plan for disaster management operations with more and detailed information. We considered a rectangular surveillance region in which four fixed-wing UAVs fly over the affected area to exactly localize the 18 stationary targets randomly distributed in the environment, as well as maximizing the coverage. For this purpose, UAVs cooperatively build the cognitive maps including Target Probability Map and Uncertainty Map. Then based on cognitive map and also their prediction from three steps ahead of their own and also neighboring agents moves, UAVs decide about their optimal collision-free paths. Comparison between cooperative and non-cooperative methods indicates that in cooperative distributed scheme, coverage percentage and global average uncertainty converges to their admissible maximum and minimum value in a considerably less time, respectively.

**Keywords:** Cooperative Coverage Control; Distributed Control; Planning Tree; Disaster recovery; Receding Horizon Control Scheme.

## ۱- مقدمه

بر اساس آمار منتشر شده از سوی اداره کاهش ریسک بحران سازمان ملل متحد<sup>۱</sup> UNDRR، از سال ۱۹۹۸ تا سال ۲۰۱۷ بلایای طبیعی مرتبط با شرایط جوی و ژئوفیزیکی منجر به کشته شدن قریب به ۱/۳ میلیون نفر و جراحت، نیاز فوری به امداد و یا بی‌خانمان شدن حدود ۴/۴ میلیارد نفر شده است. در بیست سال اخیر نیز بالغ بر ۲۹۰۸ میلیارد دلار خسارت اقتصادی از سوی کشورهای مختلف گزارش شده که از این بین، بلایای طبیعی ناشی از شرایط جوی، ۷۷٪ از کل خسارات را موجب شده است. از لحاظ آماری، ۹۱٪ حوادث غیر مترقبه مربوط به بلایای طبیعی ناشی از شرایط جوی بوده که از این میان بیشترین آمار مربوط به سیل با ۴۳٪ است. اگرچه بیشترین آمار بلایای طبیعی مربوط به سیل است، اما بیشترین آمار تلفات انسانی ناشی از بلایای طبیعی مربوط به زلزله با ۵۶٪ است [۱].

در هنگام وقوع بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله، واکنش و تصمیم‌گیری سریع تیم مدیریت بحران نقش بسیار حیاتی و مهمی در کاهش تلفات و آسیب‌ها دارد. غالباً ۷۲ ساعت اولیه پس از وقوع حادثه، بسیار مهم است و عدم مدیریت صحیح در این زمان می‌تواند بر میزان خسارات و تلفات بیافزاید و شرایط را بحرانی‌تر نماید. با استفاده از UAV<sup>۲</sup> تیم مدیریت بحران برای اولین پاسخ و واکنش خود، اطلاعات دقیق‌تری از محل‌ها، افراد، ساختمان‌ها و ساختارهای آسیب‌دیده خواهد داشت و تخمین بهتری از میزان تلفات در اختیار تیم مدیریت بحران قرار خواهد گرفت که می‌تواند از آن برای اهدافی چون شناسایی و تهیه نقشه از منطقه آسیب‌دیده، شناسایی بازماندگان و هدایت آن‌ها به محلی امن، بازرسی ساختارها و زیرساخت‌ها جهت تخمین میزان خسارات و ایجاد شبکه موردی بی‌نیاز از زیرساخت<sup>۳</sup> بهره‌گیرد؛ همچنین با نظارت هوایی می‌توان راه‌های باز حمل و نقل را شناسایی کرد و مسیر بهینه را برای خودروهای امدادرسانی مانند آمبولانس طراحی نمود تا در کمترین زمان و بهترین مسیر ممکن به محل آسیب

برسند. با این وجود استفاده از سیستم چند عامله مشارکتی متشکل از چند UAV، چالش‌ها و خطراتی نظیر محدودیت در زمان و برد عملکرد بر اساس میزان مصرف انرژی، کانال‌های ارتباطی نامطمئن، احتمال ازکارافتادگی غیرمنتظره یکی از عامل‌ها (UAV)، حداکثر بار قابل حمل و مانورپذیری در شرایط سخت آب و هوایی، نیز دارد. در این مقاله به حل مسئله جستجو و پوشش مشارکتی با هدف بکارگیری توسط تیم مدیریت بحران در ماموریت‌هایی مانند جستجو و نجات، جمع‌آوری اطلاعات و ماینورینگ محیط پرداخته می‌شود.

در ادامه پتانسیل سیستم چند عامله در مدیریت بحران و همچنین ترمیم مناطق آسیب‌دیده، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

- سیستم پیش‌بینی و هشدار

پرنده بال ثابت به دلیل سرعت و مانورپذیری بیشتر، مداومت پروازی بیشتر و همچنین ارتفاع پروازی بالاتر نسبت به مولتی‌روتورها، برای اسکن کردن محیط آسیب‌دیده بسیار مناسب هستند؛ همچنین زمان بیشتری را نسبت به مولتی‌روتورها می‌توانند پرواز کنند و در نتیجه قادر هستند، در گستره وسیع‌تری پرواز کرده و یک نظارت کلی و اولیه بر محیط داشته باشند تا تغییرات عوامل فیزیکی در محیط نظیر دما، فشار، رطوبت، سرعت باد، میزان و شدت بارش و ... را ارزیابی کرده و پیش‌بینی خوبی از حوادث احتمالی داشته باشند؛ بنابراین برای اجرای ماموریت به عنوان سیستم پیش‌بینی و هشدار می‌توان از یک سیستم چند عامله مشارکتی شامل چند UAV بال ثابت استفاده کرد.

- شبکه ارتباطی اضطراری<sup>۴</sup>

یک شبکه ارتباطی قابل اطمینان و در دسترس، کلید موفقیت در بخش‌های مختلف مدیریت بحران اعم از جمع-آوری اطلاعات، امداد و نجات و ارزیابی آسیب‌ها و تلفات است. هدف از ایجاد یک شبکه ارتباطی اضطراری، فراهم آوردن امکان برقرار ارتباط برای گروه امداد و نجات، قربانیان حادثه و واحد تصمیم‌گیرنده است. در این شرایط استفاده از

<sup>۱</sup> United Nations office for Disaster Risk Reduction

<sup>۲</sup> Unmanned Aerial Vehicles

<sup>۳</sup> Ad Hoc

<sup>۴</sup> Emergency Communication Network

معمولاً از تصاویر ماهواره‌ای برای جمع‌آوری اطلاعات استفاده می‌شود که با توجه به رزولوشن بالاتر تصاویر ثبت‌شده توسط UAV، سیستم چند عامله متشکل از چند UAV می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین بهتر و یک سیستم مناسب برای مدیریت هوایی بحران در مرحله جمع‌آوری اطلاعات، لحاظ گردد. مزیت ماهواره نسبت به یک UAV محدوده وسیع‌تری است که می‌تواند تحت پوشش قرار دهد؛ بنابراین اگر از گروهی از چند UAV در قالب یک سیستم چند عامله مشارکتی استفاده شود، هم تصاویر را با رزولوشن بالاتری در اختیار واحد مدیریت بحران قرار می‌دهد و هم یک محدوده وسیع عملیاتی می‌تواند تحت پوشش قرار گیرد.

• لجستیک

یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل در مدیریت بحران به هنگام وقوع بلاای طبیعی مانند سیل و زلزله، لجستیک است. در مناطق صعب‌العبور مثل مناطق کوهستانی و یا حتی مناطق شهری که خیابان‌ها و جاده‌ها در اثر تخریب ساختمان‌ها و ریختن آوار ساختمان‌ها و درختان مسدود شده، کار برای عبور و مرور به ویژه نیروهای امدادی بسیار دشوار است. در این شرایط استفاده از سیستم چند عامله می‌تواند بسیار گره‌گشا باشد. هر عامل به تنهایی محموله مورد نظر برای یک محدوده معین را حمل می‌کند تا بدین ترتیب چند عامل با همکاری یکدیگر بتوانند حجم بزرگی از محموله را در یک منطقه وسیع، توزیع نمایند و محموله‌های مورد نیاز برای درمان و کلیه کارهای امدادی را در اختیار نیروهای امدادگر و یا حتی مواد غذایی را در اختیار افراد آسیب‌دیده قرار دهد.

برای اجرای مأموریت‌هایی مثل امداد و نجات، جمع‌آوری اطلاعات و گزارش به واحد مدیریت بحران و ارزیابی آسیب، و در نهایت عملیات لجستیک، می‌توان از یک سیستم چند عامله غیرهمگن شامل<sup>2</sup> UAV، USV و کواد استفاده کرد. شکل ۱ به صورت مفهومی این سیستم یکپارچه بدون سرنشین را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در این زمینه را بیان می‌کند.

چند کوادروتور برای برقراری شبکه ارتباط اضطراری می‌تواند در امر مدیریت بحران بسیار مفید و راهگشا باشد.

• مانیتورینگ

هنگام وقوع بلاای طبیعی، داشتن اطلاعات برخط از آنچه که در صحنه بحران می‌گذرد، برای تیم مدیریت بحران بسیار راهگشا خواهد بود. به عنوان یک راهکار موثر می‌توان از تیمی مشارکتی متشکل از چند UAV بال ثابت برای مانیتورینگ محیط در حین و پس از وقوع بحران استفاده کرد تا اطلاعات به صورت برخط در اختیار مرکز کنترل و مدیریت بحران قرار گیرد. برای این کار می‌توان از سیستم غیرهمگن متشکل از بال ثابت و کوادروتور استفاده کرد. بدین شکل که چند بال ثابت بر فراز منطقه پرواز کرده و اسکن کلی نموده و نقاط بحرانی تر را کشف می‌کنند. با اولویت‌بندی انجام‌شده، مولتی‌روتورها می‌توانند به آن محدوده پرواز کرده و با توجه به امکان پرواز در یک ارتفاع ثابت، بر خلاف پرنده بال ثابت، در نزدیکی محل مورد نظر قرار گیرد و اطلاعات با جزئیات بیشتر و دقیق‌تری در اختیار تیم مدیریت بحران قرار دهد.

• جستجو و نجات<sup>1</sup>

مدیریت بحران را می‌توان یک مسابقه با زمان تعریف کرد. استفاده از سیستم چند عامله متشکل از چند UAV این امکان را به سیستم مدیریت بحران می‌دهد که در سریع‌ترین زمان ممکن کل منطقه آسیب‌دیده را اسکن نموده و با شناسایی و تخمین میزان تلفات، رسیدگی به مناطق مختلف را اولویت‌بندی کند تا مدیریت بحران به شکل بهینه و سریع انجام پذیرد. علاوه بر این، باید به گونه‌ای طراحی شود که بتواند مقدار باری که برای اجرای عملیات لازم است را با خود حمل کند. به عنوان مثال ممکن است لازم باشد، محموله‌هایی را با خود حمل کرده و در نقاط معینی برای استفاده افراد نیازمند کمک، روی زمین بیندازد.

• جمع‌آوری اطلاعات، گزارش به واحد مدیریت بحران و ارزیابی آسیب

تخمین اولیه و ارزیابی آسیب‌ها و تلفات ناشی از بلاای طبیعی برای طراحی و اجرای موفقیت‌آمیز یک عملیات امداد و نجات بسیار ضروری و اساسی است.

<sup>2</sup> Unmanned Surface Vehicles

<sup>1</sup> Search and Rescue



شکل ۱- طرح مفهومی سیستم یکپارچه بدون سرنشین برای ماموریت‌هایی نظیر امداد و نجات، جمع آوری اطلاعات و گزارش به واحد مدیریت بحران و ارزیابی آسیب، و در نهایت عملیات لجستیکی [۱]

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت بحران با استفاده از سیستم‌های چند عامله [۱]

کاربرد	نوع بحران	مرجع	سال	هدف	UAV		UGV <sup>1</sup>	USV
					Fixed wing	Rotary wing		
سیستم پیش‌بینی و هشدار	-	[۲]	۲۰۱۶	پیش‌بینی و هشدار در خصوص وقوع بلایای طبیعی با استفاده از تلفیق داده‌های یک سیستم چند عامله	●	●		
شبکه ارتباطی اضطراری	-	[۳]	۲۰۱۸	افزایش پوشش و بهبود عملکرد شبکه ارتباطی از طریق کار گروهی و مشارکتی یک سیستم چند عامله به عنوان ایستگاه پایه هوایی (ABS <sup>2</sup> )		●		
	-	[۴]	۲۰۱۸	به کارگیری یک شبکه به هم مرتبط متشکل از چند UAV به عنوان ایستگاه پایه هوایی به منظور خدمت‌رسانی مخابراتی به کاربران زمینی در یک عملیات امداد و نجات حین بحران		●		
	-	[۵]	۲۰۱۶	استفاده از یک سیستم چند عامله به عنوان ایستگاه پایه هوایی و جانمایی بهینه UAV ها در هر لحظه از اجرای ماموریت برای حداکثر ساختن پوشش	●			
	-	[۶]	۲۰۱۷	افزایش کیفیت خدمات قابل ارائه به کاربران موبایل با استفاده از حداقل تعداد UAV های ممکن در قالب یک سیستم چند عامله مشارکتی	●			

<sup>1</sup> Unmanned Ground Vehicles

<sup>2</sup> Aerial Base Station

	-	[۷]	۲۰۱۶	به کار گیری بهینه چند UAV مجهز به آنتن‌های جهتی به عنوان ایستگاه پایه هوایی بی‌سیم به منظور فراهم کردن پوشش حداکثری برای کاربران زمینی	●			
	-	[۸]	۲۰۱۶	تعیین حداقل تعداد UAV و موقعیت بهینه آنها در هر لحظه، با هدف پوشش حداکثری کاربران	●			
	-	[۹]	۲۰۱۰	ارائه مکانیسمی برای پرواز دسته جمعی چند UAV به منظور برقراری یک شبکه ارتباطی بی‌سیم	●			
	-	[۱۰]	۲۰۱۶	کمینه کردن تعداد UAV مورد نیاز برای فراهم کردن پوشش بی‌سیم برای گروهی از ایستگاه‌های زمینی	●			
	-	[۱۱]	۲۰۱۸	طراحی شبکه ارتباطی و مسیر حرکت چند UAV در قالب یک سیستم چند عامله مشارکتی	●			
	-	[۱۲]	۲۰۱۲	برقراری زیرساخت ارتباطی برای شرایط بحران با استفاده از یک سیستم چند عامله	●			
	-	[۱۳]	۲۰۱۵	تعیین موقعیت و کنترل چند UAV به منظور ایجاد یک سیستم کاملا خودکار به عنوان شبکه ارتباطی سیار، موقت و اضطراری در فاز اولیه مدیریت بحران در یک محدوده وسیع	●			
	-	[۱۴]	۲۰۱۲	به کار گیری تعداد بهینه UAV در یک شبکه ارتباطی اضطراری و حداکثر ساختن پوشش	●			
جستجو و نجات	زلزله	[۱۵]	۲۰۱۸	اسکن گوشی موبایل و یافتن اطلاعات دقیق از محل افراد احتمالی در آن اطراف به منظور جستجوی خودکار قربانیان بلایای طبیعی با استفاده از یک سیستم چند عامله مشارکتی متشکل از چند UAV غیرهمگن	●	●		
	زلزله	[۱۶]	۲۰۱۲	به کار گیری ناوگانی غیرهمگن از وسایل دریایی به منظور بازرسی از زیرساخت‌های زیرسطحی با دسترسی سخت یا محدود در عملیات پاک سازی بنادر از آوار و نجات قربانیان حادثه			●	
	سیل	[۱۷]	۲۰۱۶	ارائه مفهومی یک سیستم هوایی - سطحی برای اجرای کاملا خودکار ماموریت امداد و نجات در بحران سیل	●	●		●
	زلزله	[۱۸]	۲۰۱۶	ارائه یک سیستم چند عامله مشارکتی غیرهمگن برای اجرای موفقیت آمیز ماموریت جستجو و نجات در بحران زلزله	●	●		
	زلزله	[۱۹]	۲۰۱۶	تعیین مسیر یک تیم مشارکتی از ربات‌ها با در نظر گرفتن نامعینی در شرایط محیطی	●	●		
	زلزله و سیل	[۲۰]	۲۰۱۵	تشریح ساختار و چالش‌های تکنیکی پیاده سازی یک سامانه چند عامله مشارکتی خودکار برای اجرای ماموریت امداد و نجات به هنگام وقوع بلایای طبیعی	●	●	●	●
	-	[۲۱]	۲۰۱۶	مدل سازی سیستم چند عامله مشارکتی برای پوشش حداکثری بازماندگان سیل در ماموریت امداد و نجات	●	●		
	-	[۲۲]	۲۰۱۶	ارائه ساختار کنترلی غیر متمرکز برای ردیابی هدف و عدم برخورد با مانع در یک سیستم چند عامله مشارکتی	●	●		
	-	[۲۳]	۲۰۱۵	ارائه چارچوبی برای عملکرد مشارکتی چند UAV به منظور جستجو و ردیابی اهداف متحرک	●	●		

جمع‌آوری اطلاعات، گزارش به واحد مدیریت بحران و ارزیابی آسیب	زلزله	[۲۴]	۲۰۱۴	نشقه برداری از یک ساختمان تخریب شده در اثر وقوع زلزله با استفاده از سیستم چند عامله مشارکتی	●	●		
	زلزله	[۱۶]	۲۰۱۲	جم‌آوری نقشه‌ای از میزان تخریب ناشی از زلزله و میزان آوار در بخش‌های مختلف یک منطقه زلزله زده با استفاده از سیستم چند عامله غیرهمگن	●			●
مانیتورینگ	آتش‌سوزی	[۲۵]	۲۰۱۸	طراحی ساختار کنترلی توزیع‌شده به منظور مانیتورینگ آتش از فاصله نزدیک و ردیابی دقیق پیشانی آتش		●		
	آتش‌سوزی	[۲۶]	۲۰۱۹	استفاده از روش‌های یادگیری عمیق برای کنترل غیرمتمرکز چند UAV بال-ثابت به منظور پوشش حداکثری آتش‌سوزی در جنگل و صحرا	●			
	آتش‌سوزی	[۲۷]	۲۰۱۸	طراحی شبکه توزیع‌شده‌ای از چند UAV مشارکتی برای مانیتورینگ نحوه گسترش آتش‌سوزی		●		
	آتش‌سوزی	[۲۸]	۲۰۱۷	تخمین نرخ پیشروی آتش، تحلیل رفتار و نحوه گسترش آتش به منظور پیش‌بینی رفتار و پیشروی آتش‌سوزی با استفاده از یک سیستم چند عامله مشارکتی		●		
	آتش‌سوزی	[۲۹]	۲۰۱۹	پوشش حداکثری محیط با حداقل تعداد UAV و کمینه ساختن مصرف انرژی در عملیات مبارزه با آتش‌سوزی	●	●		
	آتش‌سوزی	[۳۰]	۲۰۱۸	تعیین مسیر ناوگانی از چند UAV مجهز به دوربین حرارتی بر فراز منطقه متاثر از آتش‌سوزی در یک ارتفاع ثابت	●			
	آتش‌سوزی	[۳۱]	۲۰۱۸	تخمین مرزهای آتش‌سوزی در حال گسترش با استفاده از سیستم چند عامله خودکار به صورت زمان-حقیقی	●			
	آتش‌سوزی	[۳۲]	۲۰۱۰	پرواز آرایش‌یافته چند UAV برای تصویربرداری از منطقه متاثر از آتش‌سوزی		●		
	آتش‌سوزی	[۳۳]	۲۰۱۱	توسعه ساختار تصمیم‌گیری توزیع شده برای سیستم چند عامله متشکل از چند UAV به منظور تشخیص و تایید آتش‌سوزی در یک منطقه و سپس نظارت و مانیتورینگ بر فراز آن		●		
	تشعشعات هسته‌ای	[۳۴]	۲۰۱۳	تشخیص میزان تشعشعات رادیواکتیوی به صورت مرتب و در یک زمان بندی مشخص با استفاده از چند UAV ارزان قیمت در قالب سیستم چند عامله مشارکتی	●			
زلزله و سیل	[۳۵]	۲۰۱۵	توصیف، طراحی و توسعه یک سیستم مانیتورینگ پیشرفته با استفاده از چند UAV	●	●			
لجستیک	-	[۳۶]	۲۰۱۸	ارائه سیستم تحویل کالا با استفاده از چند کامیون خودکار و چند UAV در قالب سیستم چند عامله مشارکتی غیرهمگن		●	●	
	زلزله	[۳۷]	۲۰۱۴	ارائه سیستم خودکار تحویل اقلام ضروری، طراحی چارچوب‌های آن برای پیاده‌سازی و ارزیابی آن	●	●	●	
	زلزله و سیل	[۲۰]	۲۰۱۵	تشریح اجزای اصلی و چالش‌های تکنیکی مورد نیاز برای پیاده‌سازی پلتفرم سیستم چند عامله مشارکتی برای اجرای مأموریت تحویل کالاهای ضروری در هنگام وقوع بلایای طبیعی نظیر زلزله و سیل	●	●		



شکل ۲- رفتار گروهی حیوانات به صورت یک سیستم چند عامله

## ۲- سیستم چند عامله

سیستم‌های چند عامله<sup>۱</sup> از تعدادی عامل خودکار تشکیل می‌شود که هر کدام قادر است با عامل‌های دیگر و همچنین با محیط پیرامون خود تعامل داشته باشد. در ۲۰ سال اخیر و با توجه به مطالعه در سیستم‌های بیولوژیکی به منظور فهم رفتار گروهی حیوانات مانند حرکت دسته‌جمعی<sup>۲</sup> پرندگان (شکل ۲-الف)، شنای دسته‌جمعی ماهی‌ها در یک جهت<sup>۳</sup> (شکل ۲-ب) و حرکت گله‌ای<sup>۴</sup> باکتری‌ها (شکل ۲-ج)، مسئله کنترل مشارکتی<sup>۵</sup> سیستم‌های چند عامله بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است؛ همچنین در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های چند عامله مشارکتی<sup>۶</sup> به عنوان شبکه‌ای از سنسورها<sup>۷</sup> گسترش یافته است که این شبکه سنسوری می‌تواند متشکل از چند وسیله هوایی بدون سرنشین (UAV)، وسیله زیرسطحی خودکار (AUV<sup>۸</sup>) و یا سیستم‌های رباتیک متحرک (MRS<sup>۹</sup>) باشد.

در اثر پیشرفت سریع تکنولوژی در عرصه الکترونیک، سنسوری و مخابراتی، امکان پرواز دسته‌جمعی چند UAV به

عنوان یک سیستم چند عامله که بدون دخالت انسان و بدون سرنشین عمل می‌کند، فراهم شده است. امروزه استفاده از UAV در مأموریت‌های نظامی مانند نظارت مرزی و جستجو، تشخیص و تخریب هدف و همچنین غیرنظامی مانند مدیریت آتش‌سوزی، مانیتورینگ ترافیک، مانیتورینگ بحران و شبکه بی‌سیم کاربرد اختصاصی<sup>۱۰</sup> رواج یافته است. اگرچه سیستم مبتنی بر یک UAV چند دهه است که در حال استفاده است، اما در برخی از کاربردها که گستره مأموریت بسیار وسیع است، استفاده از سیستم چند عامله متشکل از چند UAV که در محیط توزیع شده و با همکاری یکدیگر سعی در تحقق هدف مشترک و واحدی را دارند، بجای استفاده از UAV بزرگ، راه‌حل مؤثرتری به نظر می‌رسد. مزایای استفاده از سیستم چند عامله نسبت به استفاده از یک UAV عبارت است از مقیاس‌پذیری، قابلیت اطمینان<sup>۱۱</sup>، کاهش هزینه و افزایش سرعت در اجرای مأموریت. در بسیاری از کاربردهای نظامی و غیرنظامی برای اجرای مؤثر یک مأموریت به تیمی از عامل‌های خودکار نیاز است تا ضمن هماهنگی<sup>۱۲</sup> با یکدیگر، وظیفه مشخصی را بدون دخالت انسان با موفقیت به انجام برسانند. به عنوان مثال برای بازرسی از خطوط طولانی انتقال نفت و گاز بجای استفاده از یک پرنده بدون سرنشین می‌توان

<sup>1</sup> Multi-Agent Systems

<sup>2</sup> Flocking

<sup>3</sup> Schooling of Fishes

<sup>4</sup> Swarming

<sup>5</sup> Cooperative Control

<sup>6</sup> Cooperative Multi-Agent Systems

<sup>7</sup> Sensor Networks

<sup>8</sup> Autonomous Underwater Vehicles

<sup>9</sup> Mobile Robot Systems

<sup>10</sup> Ad-hoc Network

<sup>11</sup> Survivability

<sup>12</sup> Coordinate

در شناخت سیستم از کل محیط و پوشش حداکثری، عامل‌ها بتوانند محل دقیق اهداف احتمالی موجود در محیط را تعیین کنند [۴۰].

تعریف مسئله به این صورت است که  $N$  پرنده بدون سرنشین،  $A_i, i = 1, 2, \dots, N$ ، در یک محیط نامعین پرواز کرده و ضمن پوشش محیط و به حداقل رساندن نامعینی در شناخت محیط، به جستجوی  $M$  هدف ساکن،  $T_j, j = 1, 2, 3, \dots, M$  می‌پردازند. در یک محیط نامعین هیچ کدام از UAV ها دانشی نسبت به تعداد و محل اهداف احتمالی موجود در محیط ندارند؛ بنابراین هر کدام از عامل‌ها باید به مشاهده پیرامون خود پرداخته و به تدریج در طول مأموریت، دانش و شناخت خود از محیط را افزایش دهد تا در نتیجه نامعینی در شناخت سیستم چند عامله از محیط به حداقل برسد یا به عبارت دیگر پوشش محیط حداکثر شود و محل دقیق اهداف احتمالی موجود در محیط نیز مشخص گردد. بدین منظور نیاز است که یک نقشه احتمالاتی به نام نقشه شناخت<sup>۱</sup> ایجاد گردد که احتمال وجود هدف در هر نقطه از محیط را نشان می‌دهد. عامل‌ها با ایجاد این نقشه، در هر لحظه از اجرای مأموریت خود می‌دانند که در کدام نقاط از محیط احتمال وجود هدف بیشتر است و یا اینکه در کدام نقاط از محیط نامعینی بیشتری وجود دارد؛ بنابراین مسیر بعدی خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که به سمت نقاطی از محیط بروند که بیشترین نامعینی را داشته و احتمال وجود هدف در آن نقاط بیشتر است.

محیط نظارتی  $\Omega$ ، مستطیلی و با ابعاد  $X \times Y$  فرض شده که به طور یکنواخت و مساوی به  $c_x \times c_y$  سلول یکسان با ابعاد  $\Delta x \times \Delta y$  تقسیم شده است. سلول حاضر در ردیف  $m$  و ستون  $n$  با شناسه  $c = m + (n-1) \times c_x$  شناخته می‌شود؛ همچنین  $TE_c \in \{0, 1\}$  نشان دهنده وجود یا عدم وجود هدف در سلول  $c$  است به طوری که اگر  $TE_c = 1$  باشد، هدف در سلول  $c$  وجود دارد و اگر  $TE_c = 0$  باشد، به معنای عدم وجود هدف در سلول  $c$  است. فرض شده است که در هر سلول حداکثر یک هدف می‌تواند وجود داشته باشد و همچنین محیط بدون حضور موانع در نظر گرفته شده است.

از سیستم چند عامله مشارکتی متشکل از چند پرنده بدون سرنشین استفاده کرد. هر کدام از عامل‌ها در یک محدوده‌ای برحسب محدوده عملکردی سنسورهای نصب شده روی هر کدام از عامل‌ها و محدوده مخابراتی و ارتباطی هر یک، می‌توانند به جمع‌آوری اطلاعات از محیط پرداخته و اطلاعات خود را با دیگر عامل‌ها تبادل کنند تا یک مأموریت واحد را با همکاری یکدیگر به انجام برسانند. بدین ترتیب محدوده قابل پوشش توسط این سیستم چند عامله به مراتب از یک عامل تنها بیشتر خواهد بود.

از طرفی اگر برای اجرای مأموریت از یک UAV استفاده شود، در صورت از کار افتادن آن UAV به هر دلیلی، مأموریت ناتمام مانده و با شکست مواجه می‌شود. درحالی‌که اگر شبکه‌ای از چند UAV به کار گرفته شود، قابلیت اطمینان سیستم بالا رفته و در صورت از کار افتادن یک یا تعدادی از آن‌ها، بقیه عامل‌ها به کار خود ادامه داده و ضمن طراحی یک سامانه کنترلی می‌توان با ایجاد آرایش و ترکیب‌بندی جدید منطقه مورد نظر را تحت پوشش بهینه قرار داد؛ همچنین هزینه خریداری و نگهداری یک UAV کوچک به مراتب کمتر از یک UAV بزرگ است [۳۸]. به عنوان مثال در بازرسی از خطوط انتقال نفت و گاز اگر بنا بر استفاده از یک پرنده به تنهایی باشد، برای افزایش مداومت پروازی آن باید از موتورهای سوختی استفاده کرد. این در حالی است که با استفاده از چند پرنده بدون سرنشین با باتری الکتریکی که هر کدام در محدوده مشخصی به اجرای مأموریت بازرسی از خطوط انتقال نفت و گاز می‌پردازند، می‌توان ضمن کاهش هزینه‌ها مأموریت را با درصد اطمینان بیشتر، به صورت مؤثرتر و با موفقیت بیشتر در یک محدوده وسیع‌تر انجام داد. علاوه بر این موارد، در بسیاری از مأموریت‌ها به دلیل زمان‌بر بودن و گستردگی محدوده اجرای مأموریت، یک عامل به تنهایی از عهده کار بر نخواهد آمد. این امر ثابت شده است که با افزایش تعداد UAV در سیستم چند عامله مشارکتی، مأموریت مورد نظر با سرعت بیشتری انجام خواهد شد [۳۹].

### ۳- مسئله جستجو و پوشش مشارکتی

هدف اصلی در مسئله جستجو و پوشش مشارکتی، کنترل چند عامل به گونه‌ای است که ضمن حداقل ساختن نامعینی

<sup>1</sup> Cognitive Map

<sup>2</sup> Target Existence



که همه عامل‌ها احتمال وجود هدف در تمامی سلول‌ها را برابر ۰/۵ می‌دانند که بدان معناست که عامل‌ها در ابتدای ماموریت هیچ دانشی نسبت به محیط نداشته و اطلاعی از وجود یا عدم وجود هدف در سلول‌های محیط ندارند. در طول ماموریت، دانش عامل‌ها به مرور افزایش یافته و شناخت آنها از محیط کامل‌تر می‌شود، به طوری‌که با گذشت زمان اگر در سلولی هدف وجود داشته باشد،  $p_c(k)$  به سمت ۱ و اگر وجود نداشته باشد، به سمت ۰ میل می‌کند؛ بنابراین TPM به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$M_{i,TPM}(k) = \{p_{i,c}(k) | c \in \Omega\} \quad (2)$$

در طول ماموریت جستجو و پوشش مشارکتی، هر عامل بر اساس مشاهدات خود از سلولی که در آن قرار دارد و همچنین کلیه سلول‌هایی که در شعاع دید سنسورهای آن هستند، نقشه TPM را بر اساس اطلاعات خود می‌سازند. سپس هر عامل نیز با همسایه‌های خود تبادل اطلاعات کرده و نقشه TPM را بروز رسانی می‌کند؛ بنابراین بروز رسانی TPM شامل دو مرحله است: ۱- بر اساس اطلاعات هر عامل ۲- بر اساس اطلاعات دریافتی از عامل‌های همسایه. فرض می‌کنیم که عامل‌ها با استفاده از دوربین رو به پایین محیط را مشاهده می‌کنند. زاویه دید دوربین نیز به صورت دایره‌ای به شعاع دید  $R_s$  تعریف می‌شود؛ بنابراین سلول‌های تحت پوشش عامل  $A_i$  در لحظه  $k$  با رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$\mathbb{C}_{i,k} = \{c \in \Omega : \|\alpha_c - \alpha_i(k)\| \leq R_s\} \quad (3)$$

علاوه بر این،  $Z_{i,c,k} \in \{0,1\}$  بیانگر اطلاعات عامل  $i$  از سلول  $c$  در لحظه  $k$  است. اگر  $Z_{i,c,k} = 1$  به معنای آن است که عامل  $i$  هدفی را در سلول  $c$  شناسایی کرده و معتقد به وجود هدف در آن سلول است. از طرفی  $Z_{i,c,k} = 0$  بدین معناست که عامل  $i$  معتقد است، در لحظه  $k$  در سلول  $c$  هدفی ندیده است. عملکرد سنسور در شبیه سازی با دو پارامتر احتمال تشخیص  $p_d$  و احتمال خطای  $p_f$  تعریف می‌شود:

$$P(Z_{i,c,k} = 1 | \zeta_c = 1) = p_d \text{ \& } P(Z_{i,c,k} = 1 | \zeta_c = 0) = p_f$$

احتمال تشخیص  $p_d$  و احتمال خطای  $p_f$  برای همه عامل‌ها و در همه سلول‌ها ثابت و معلوم فرض شده‌اند. عامل‌ها بر اساس اطلاعات خودشان، احتمال وجود هدف در سلول  $c$  در لحظه  $k$  را طبق تئوری بیزین از رابطه (۴) بروز رسانی می‌کنند:

برای ساده‌سازی مدل دینامیک UAV فرض کردیم که هر کدام از عامل‌ها در ارتفاع ثابت و با سرعت ثابتی پرواز کنند. با فرض  $x_i(k) = [\alpha_i(k), \psi_i(k)]^T$  به عنوان متغیرهای حالت عامل  $A_i$  در لحظه  $k$ ،  $\alpha_i(k) = [x_i(k), y_i(k)]$  مؤلفه-های  $x$  و  $y$  موقعیت و  $\psi_i(k)$  نیز زاویه هدینگ عامل  $A_i$  در صفحه افقی  $x$ - $y$  در لحظه  $k$  است. روابط سینماتیکی عامل  $A_i$  به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + v_c \cdot \Delta t \cdot \cos \psi_i(k) \\ y_i(k+1) &= y_i(k) + v_c \cdot \Delta t \cdot \sin \psi_i(k) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $v_c$  و  $\Delta t$  به ترتیب سرعت و گام زمانی هستند. به منظور ساده سازی، فرض شده که عامل‌ها مجهز به کنترلی هستند که ارتفاع و سرعت پروازی آنها را ثابت نگه می‌دارد؛ بنابراین کنترلر طراحی شده برای هر عامل فقط باید بتواند ورودی کنترلی  $\psi_i(k)$  را به گونه ای تولید کند که مسیر بهینه تولید شده منجر به کاهش نامیعی و افزایش احتمال وجود هدف منجر شود. با در نظر گرفتن محدودیت دینامیکی عامل‌ها، تغییر در زاویه هدینگ هر عامل در یک بازه مشخص و محدود  $\Delta \psi_i(k) \in [-\Delta \psi_{max}, +\Delta \psi_{min}]$  فرض شده است. با توجه به رابطه (۱) و بسته به زاویه هدینگ فعلی عامل، ۸ جهت کلی برای هر عامل می‌تواند رخ دهد: (شمال، شمال شرق، شرق، جنوب شرق، جنوب، جنوب غرب، غرب و شمال غرب). با فرض  $\Delta \psi_{max} = 45^\circ$  هر عامل در هر لحظه تنها ۳ انتخاب برای زاویه هدینگ بعدی خود دارد: مستقیم رو به جلو، چرخش به چپ و چرخش به راست.

### ۳-۱- نقشه شناخت

در این پژوهش برای تهیه نقشه شناخت از دو نقشه  $TPM^1$  و  $UM^2$  استفاده شده است که به ترتیب نقشه احتمال وجود هدف و نقشه نامیعی هستند. ابتدا طبق مرجع [۴۱] نقشه TPM ساخته می‌شود و سپس بر اساس آن نقشه UM تهیه می‌شود.

### ۳-۱-۱- نقشه احتمال وجود هدف، TPM

احتمال وجود هدف در سلول  $c$  در لحظه  $k$  با  $p_c(k) \in [0,1]$  تعریف می‌شود. برای ساخت نقشه TPM ابتدا فرض می‌شود

<sup>1</sup> Target Probability Map

<sup>2</sup> Uncertainty Map



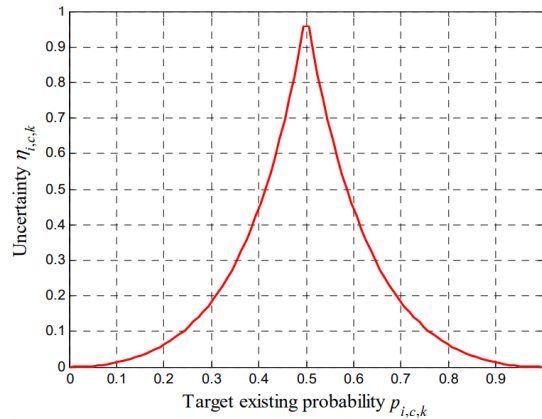
بهینه (۹)، مسیر بهینه خود را تولید می‌کند. به منظور تضمین دقت تخمین و کاهش حجم محاسباتی معمولاً افق پیش‌بین را کوتاه‌تر در نظر می‌گیرند. شکل ۴ نمای کلی روش بهینه‌سازی توزیع‌شده با افق دور شونده برای کنترل پوشش و جستجوی مشارکتی یک سیستم چند عامله را نشان می‌دهد.

فرایند تصمیم‌گیری در مورد مسیری که عامل  $i$  باید در لحظه  $k$  طی کند تا بدون برخورد با سایر عامل‌ها در نهایت با همکاری دیگر عامل‌ها پوشش را حداکثر و نامعینی شناخت سیستم از محیط را حداقل سازد، در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، این فرایند سه مرحله دارد: (۱) پیش‌بینی<sup>۳</sup>، (۲) تصمیم‌گیری<sup>۴</sup>، (۳) اقدام<sup>۵</sup>.

در لحظه  $k$  عامل  $i$  با استفاده از سنسورهای خود، از موقعیت و مسیر خود در لحظه  $k$  (متغیر حالت) مطلع می‌شود. اگر محیط را به سلول‌های کوچک تقسیم کنیم، هر عامل ۳ انتخاب برای نقطه بعدی خود دارد (مستقیم برود، به چپ بپیچد و یا به راست برود)؛ بنابراین با استفاده از روش تصمیم‌گیری درختی (شکل ۶) هر عامل می‌تواند موقعیت خود در  $T$  لحظه بعد را پیش‌بینی کند. خروجی این قسمت برابر است با:

$$\bar{P}_i(k) = \{\bar{P}_i(k+1|k), \dots, \bar{P}_i(k+q|k), \dots, \bar{P}_i(k+T|k)\}$$

که  $\bar{P}_i(k+q|k)$  بیانگر مجموعه‌ای از سلول‌های قابل دسترسی است که عامل  $i$  در لحظه  $k$ ، برای لحظه  $k+q$  خود پیش‌بینی می‌کند؛ همچنین عامل‌های همسایه داده‌های خود را با عامل  $i$  به اشتراک می‌گذارند و عامل  $i$  با دریافت موقعیت عامل‌های دیگر و بر اساس مدل دینامیک آن‌ها، موقعیت  $T$  لحظه بعد آن‌ها را نیز پیش‌بینی کرده و بر اساس پیش‌بینی خود از موقعیت خودش و عامل‌های دیگر، مسیر بهینه را به گونه‌ای تولید می‌کند که بدون برخورد با عامل‌های دیگر بتواند با همکاری عامل‌ها پوشش را حداکثر و نامعینی را حداقل کند. خروجی این مرحله، ورودی کنترلی بهینه  $(U^*(k))$  و  $P_i^*(k)$  است. این مقادیر وارد تابع تبدیل سیستم دینامیک عامل شده و مرحله اقدام، اجرایی می‌شود که



شکل ۳- رابطه بین  $p_{i,c,k}$  و  $\eta_{i,c,k}$  [۴۱]

$J_i$  بهره در مرحله زمانی  $k$  (تابع هزینه)، مدل دینامیک UAV و  $\Xi$  و  $\Theta$  به ترتیب متغیرهای حالت شدنی<sup>۱</sup> و ورودی-های کنترلی قابل قبول<sup>۲</sup> هستند.

همچنین ورودی کنترلی عامل  $i$  برای لحظه  $k+1$  تا  $k+T$  برابر  $\bar{u}_i(k) = \{u_i(k+1|k), \dots, u_i(k+T|k)\}$  است که این ورودی‌های کنترلی در زمان  $k$ ، برای افق زمانی  $k+1$  تا  $k+T$  تعیین می‌شوند و  $T$  بیانگر افق پیش‌بین است.

پیش‌بینی متغیر حالت در افق زمانی  $k+1$  تا  $k+T$  نیز برابر  $\bar{X}_i(k) = \{x_i(k+1|k), \dots, x_i(k+T|k)\}$  است که به عنوان مسیر برنامه‌ریزی شده برای عامل  $i$  تعریف می‌شود؛ همچنین  $\bar{X}_{-i}(k) = \{x_j | j \in N_i\}$  بیانگر متغیرهای حالت عامل‌های همسایه در لحظه  $k$  است که در اختیار عامل  $i$  قرار می‌دهند. به طور کلی اگر در یک سیستم چند عامله، عامل  $i$  بخواهد بدون برخورد با عامل‌های دیگر مسیر بهینه خود،  $\bar{X}_i^*(k) = \{x_i^*(k+1|k), \dots, x_i^*(k+T|k)\}$  را تولید کند باید از متغیرهای حالت همسایه‌های خود، در یک افق زمانی، پیش‌بینی داشته باشد:

$$\bar{X}_{-i}(k+q|k) = \{x_j(k+1|k), \dots, x_j(k+q|k), \dots, x_i(k+1|k), \dots, x_j(k+T|k) | j \in N_i(k), q = 1, 2, \dots, T\}$$

هر عامل  $i$  تنها متغیرهای حالت همسایه‌های خود در لحظه  $k$  را دریافت می‌کند و بر اساس مدل دینامیک UAV، مسیر آن‌ها در  $T$  لحظه بعد را پیش‌بینی می‌نماید. با تخمین موقعیت عامل‌های همسایه تا  $T$  لحظه بعد، با حل مسئله

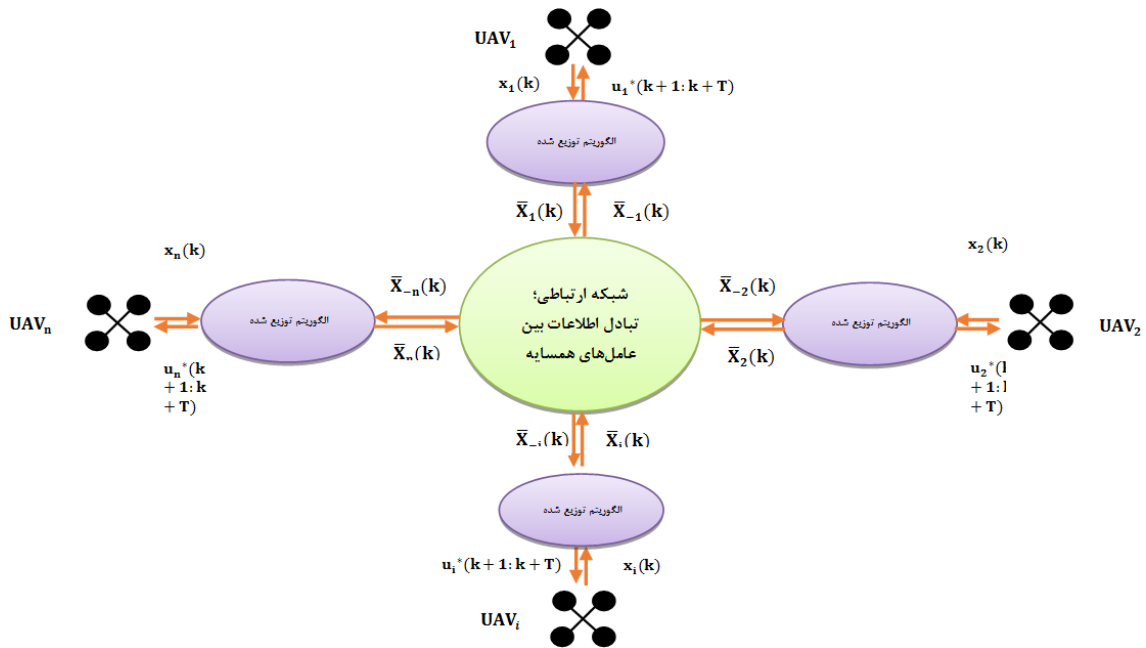
<sup>3</sup> Prediction

<sup>4</sup> Decision

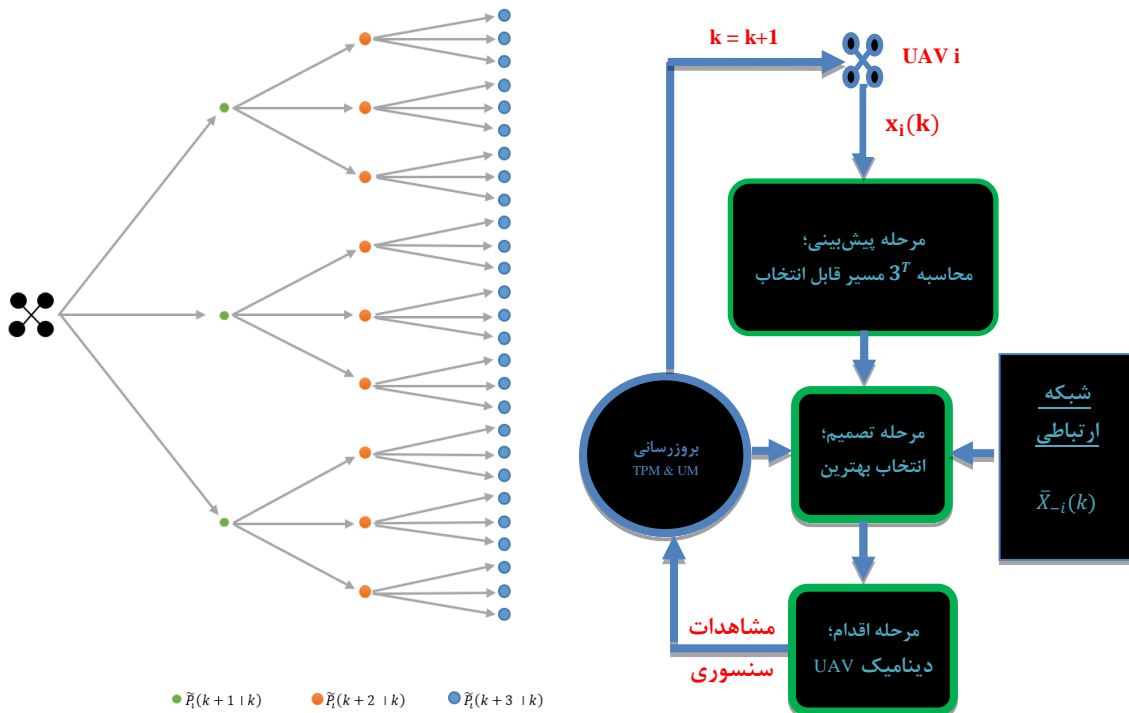
<sup>5</sup> Acting

<sup>1</sup> Feasible

<sup>2</sup> Admissible

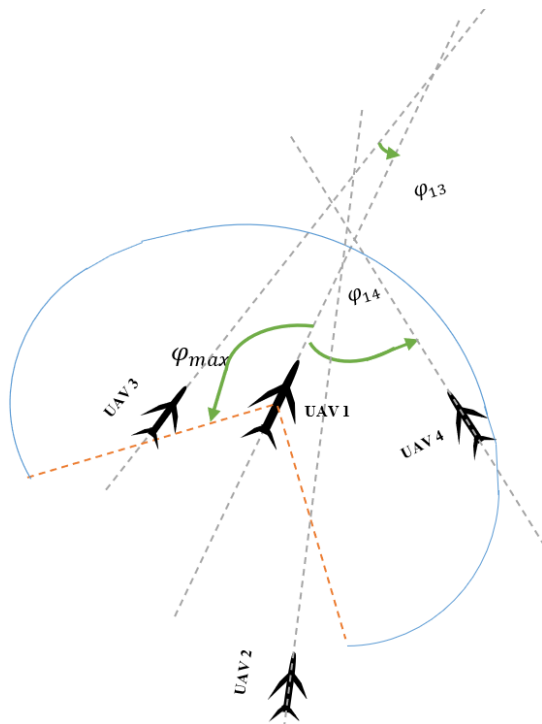


شکل ۴- نمای کلی روش بهینه‌سازی توزیع شده با افق دور شونده برای کنترل پوشش و جستجوی مشارکتی یک سیستم چند عامله



شکل ۶- روش تصمیم‌گیری درختی برای پیش‌بینی مسیره‌های ممکن برای عامل  $i$

شکل ۵- فرایند تصمیم‌گیری هر عامل، در یک سیستم چند عامله، برای تولید مسیر بهینه و بدون برخورد



شکل ۷- شماتیک شرایطی که تحت آن، نیروی مجازی غیرصفر بین عامل‌ها تولید می‌شود

این، زاویه بین موقعیت  $A_i$  و  $A_j$  نباید از محدوده  $-\varphi_{max}$  تا  $+\varphi_{max}$  فراتر باشد که در واقع از اعمال نیروی عامل  $j$  بر عامل  $i$  در حالتی که جلوتر از آن قرار گرفته، جلوگیری می‌کند. در این حالت بدیهی است که باید نیروی از  $i$  بر  $j$  وارد گردد. در مثال شکل ۷ برخلاف  $UAV_2$ ، عامل‌های  $A_3$  و  $A_4$  در محدوده‌های لایه‌ای شده قرار دارند و شرط اول را ارضا می‌کنند.

۲- اختلاف بین زاویه عامل‌های  $i$  و  $j$  در بازه  $[-\gamma, \gamma]$  یا  $[180 - \gamma, 180 + \gamma]$  باشد که  $\gamma$  ماکزیمم زاویه مجاز است. این شرط بیانگر آن است که عامل  $j$  باید تقریباً هم راستا با عامل  $i$  باشد تا بتواند نیروی غیر صفری بر آن وارد کند. با توجه به شکل ۱۰ تنها عامل  $A_2$  و  $A_3$  اختلاف زاویه کمی با عامل  $A_1$  دارند. بنابراین تنها عامل  $A_3$  علاوه بر شرط اول، شرط دوم را نیز ارضا کرده و نیروی مجازی غیر صفر بر عامل  $A_1$  وارد می‌کند که این نیرو باید در تابع هزینه مینیمم شود تا عامل  $A_1$  مطمئن باشد که مسیر انتخابی‌اش برخوردی با عامل  $A_3$  ندارد. نیروی مجازی که عامل  $j$  بر عامل  $i$  وارد می‌کند از رابطه زیر قابل محاسبه است (شکل ۸):

خروجی آن مسیر جدیدی است که عامل طی کرده است. این مقادیر توسط سنسورها اندازه‌گیری شده و وارد بلوک نقشه شناخت می‌شود تا نقشه شناخت هر عامل از محیط، به هنگام شود. با به اشتراک گذاشتن اطلاعات توسط عامل‌ها، نقشه شناخت کل سیستم از محیط نیز به هنگام خواهد شد. مقادیر جدید به عنوان موقعیت فعلی عامل در نظر گرفته شده و حلقه تکرار می‌شود.

#### ۴-۱- تابع هزینه چند هدفه برای مسئله جستجو و پوشش مشارکتی

برای مسئله جستجو و پوشش مشارکتی در این تحقیق دو هدف برای تابع هزینه در نظر گرفته شده است. هدف اول ( $J_1$ ) کشف محیط، پوشش حداکثری محیط و یافتن محل اهداف احتمالی موجود در محیط است و هدف دوم ( $J_2$ ) عدم برخورد عامل‌ها با یکدیگر است.

پوشش حداکثری و نامعینی حداقلی در شناخت سیستم چند عامله از محیط، هدف اصلی مسئله جستجو و پوشش مشارکتی است؛ بنابراین هر عامل باید در هر لحظه از بین  $3^T$  مسیر کاندید، مسیری را انتخاب کند که بیشترین کاهش در نامعینی را به دنبال داشته باشد. برای  $l$  امین مسیر از بین مسیره‌های کاندید، تابع هزینه  $J_1$  به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$J_A(i, l, k) = \sum_{q=1}^T \sum_{c \in C_i(p_i^l(k+q|k))} \eta_{i,c,k} \quad (10)$$

که در آن  $C_i(c)$  بیانگر تمام سلول‌های تحت پوشش عامل  $A_i$  در طول مسیر  $p_i^l(k)$  است.

همچنین به منظور تضمین عدم برخورد بین عامل‌ها تابع هزینه  $J_2$  تعریف می‌شود. بدین منظور از مفهوم نیروی مجازی ارائه شده در مرجع [۴۲] استفاده شده است. در این مفهوم، برای هر عاملی مسیر سایر عامل‌ها به عنوان مانع نرم در نظر گرفته می‌شود که باید از آنها اجتناب کند. عامل  $A_j$  نیروی مجازی  $F_{j \rightarrow i}$  را بر عامل  $A_i$  وارد می‌کند اگر هر دو شرط زیر برقرار باشد:

۱- موقعیت عامل  $A_j$  در لحظه  $k+q$  داخل قطاعی از دایره به شعاع  $d_{max}$  و زاویه  $\pm \varphi_{max}$  از موقعیت عامل  $A_i$  باشد (شکل ۷).

براساس این شرط، عامل  $A_j$  باید به اندازه کافی به عامل  $A_i$  نزدیک باشد تا بتواند نیروی مجازی اعمال کند. علاوه بر

$$F_{ij}(k) = \begin{cases} K_1 e^{-\xi \rho_{ij} \bar{\rho}_{ij}} & \text{if both conditions 1 and 2 satisfied} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$K_1$  و  $\xi$  ثابت‌های طراحی هستند که هر دو مقادیر مثبت دارند.  $\rho_{ij}$  نیز کوتاهترین فاصله عامل  $i$  از مسیر عامل  $j$  است.  $\bar{\rho}_{ij}$  بیانگر جهت اعمال نیروی عامل  $j$  بر عامل  $i$  است. کل نیروی مجازی وارد شده بر عامل  $i$  از سوی عامل‌هایی که هر دو شرط ۱ و ۲ را ارضا می‌کنند، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_i = \sum_{j \neq i} F_{j \rightarrow i}$$

بنابراین تابع هزینه عدم برخورد برای نقطه  $p_i^l(k+q|k)$  از مسیر ۱ ام و همچنین کل مسیر ۱ به شرح زیر است:

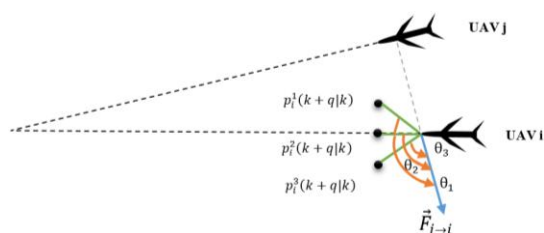
$$J(i, l, k) = \sum_{q=1}^T J(i, p_i^l(k+q), k) \quad (12)$$

که در آن،  $J(i, p_i^l(k+q), k)$  نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$J(i, p_i^l(k+q), k) = e^{|F_i(k)| \cdot \cos\left(\frac{\theta(p_i^l(k+q), k)}{2}\right)} \quad (13)$$

در حالیکه  $\theta(p_i^l(k+q), k) \in [0, \pi]$  زاویه بین بردار نیروی  $F_i$  و جهت حرکت عامل  $A_i$  در نقطه  $p_i^l(k+q|k)$  است.

شکل ۹ تا شکل ۱۱ مسیر UAV ها، نقشه نامعینی UM و نقشه احتمال وجود هدف TPM را به ترتیب در زمان‌های ۶۳/۴، ۲۵۳/۶ و ۶۳۳/۹ ثانیه نشان می‌دهد.



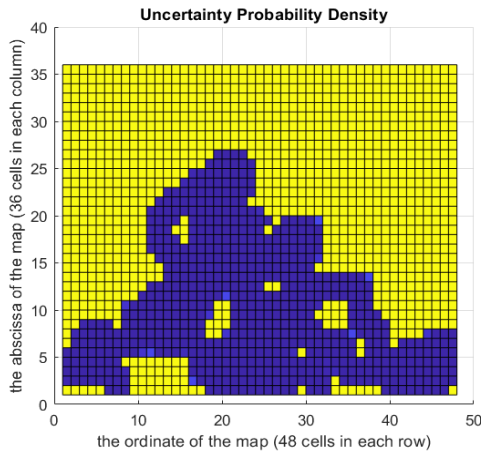
شکل ۸- اجتناب از برخورد به روش نیروی مجازی

## ۵- شبیه سازی و تحلیل نتایج

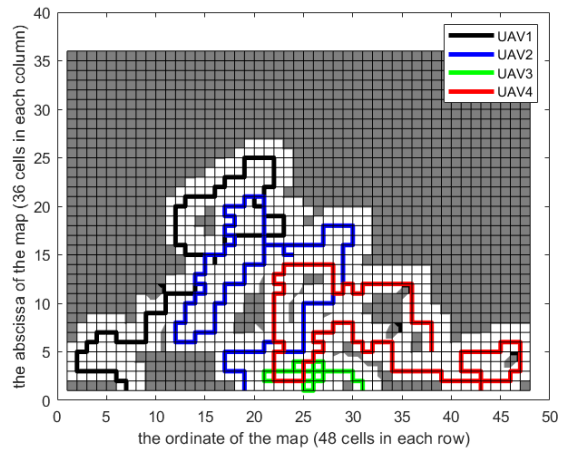
برای شبیه‌سازی سناریویی در نظر گرفته شده که طبق آن، در منطقه سیل زده یک محیط مستطیلی به ابعاد  $480 m \times 360 m$  به  $1728$  سلول یکسان با ابعاد

جدول ۲- موقعیت ۱۸ هدف موجود در منطقه بحرانی ۲ که باید توسط ۴ کوادکوپتر کشف شوند

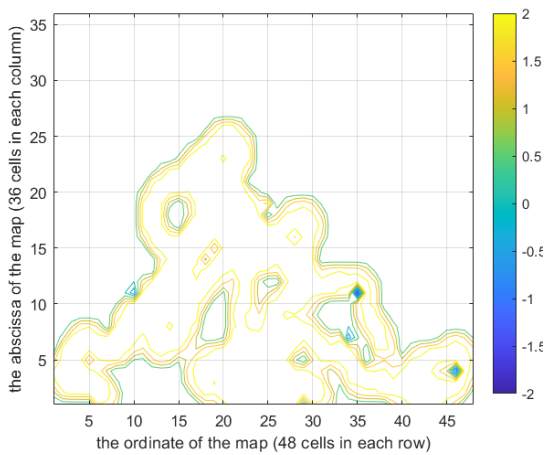
Targets	Cell number	Center coordinate	Targets	Cell number	Center coordinate	Targets	Cell number	Center coordinate
T <sub>1</sub>	1460	(-40, 125)	T <sub>7</sub>	190	(215, -35)	T <sub>13</sub>	1145	(45, 5)
T <sub>2</sub>	490	(-145, -75)	T <sub>8</sub>	675	(105, 75)	T <sub>14</sub>	1470	(55, 125)
T <sub>3</sub>	815	(225, -15)	T <sub>9</sub>	1235	(-25, 85)	T <sub>15</sub>	1405	(-115, 115)
T <sub>4</sub>	730	(-145, -25)	T <sub>10</sub>	1270	(195, 95)	T <sub>16</sub>	1515	(25, 135)
T <sub>5</sub>	515	(105, -75)	T <sub>11</sub>	1340	(5, 75)	T <sub>17</sub>	1580	(195, 145)
T <sub>6</sub>	322	(95, -115)	T <sub>12</sub>	1225	(165, 55)	T <sub>18</sub>	1623	(145, 155)



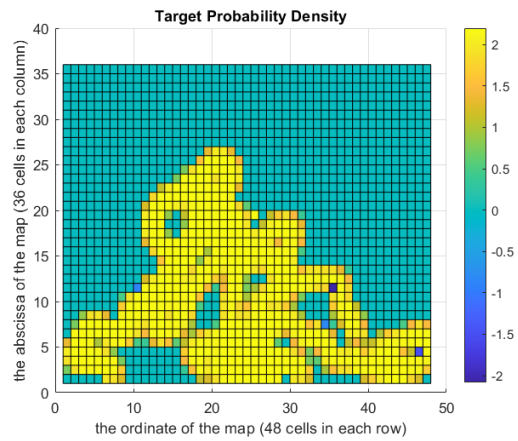
ب) نقشه نامعینی UM در لحظه  $t=64/3$  s مقدار ۰ و ۱ برای نامعینی به ترتیب به معنای شناخت و عدم شناخت UAV نسبت به سلول است.



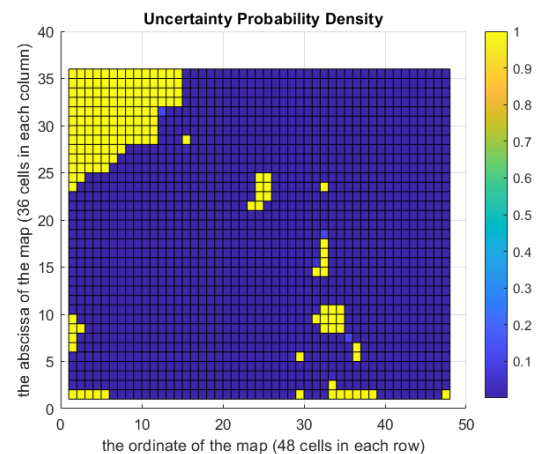
الف) مسیر و سلول‌های تحت پوشش UAV ها در لحظه  $t=64/3$  s



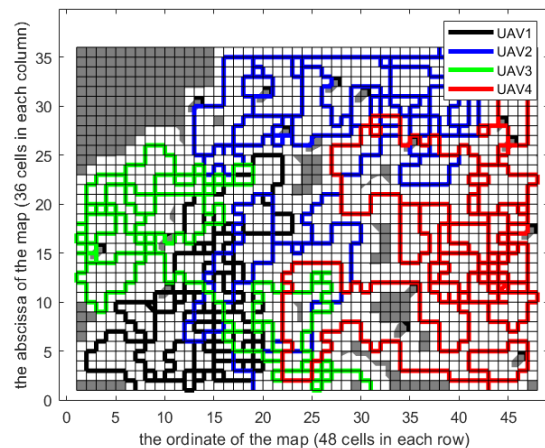
ج) نقشه TPM در لحظه  $t=64/3$  s : هدف ۱ با احتمال بالای ۰.۸۸ و هدف ۲ با احتمال بالای ۰.۸۵ کشف و محل دقیق آنها مشخص شده است. مقدار احتمال در نقشه TPM به سمت  $-2/1972$  و  $2/1972$  به ترتیب بیانگر وجود و عدم وجود هدف در سلول است.



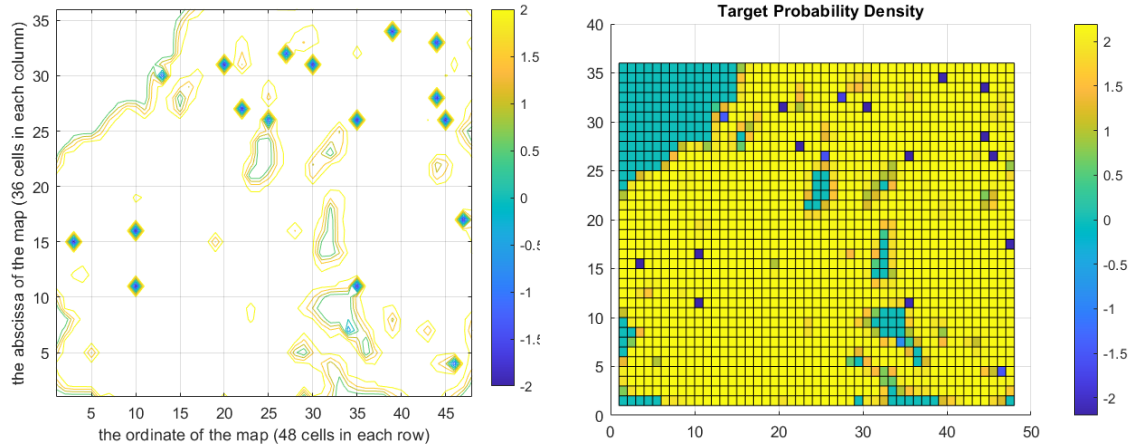
شکل ۹- نقشه شناخت و مسیر عامل‌ها در لحظه  $t=63/4$  s



ب) نقشه نامعینی UM در لحظه  $t=253/6$  s مقدار ۰ و ۱ برای نامعینی به ترتیب به معنای شناخت و عدم شناخت UAV نسبت به سلول است.

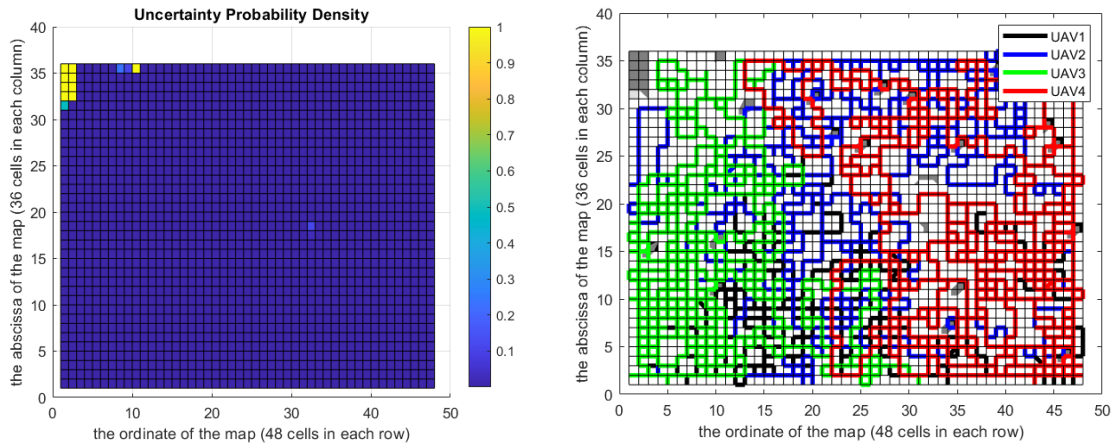


الف) مسیر و سلول‌های تحت پوشش UAV ها در لحظه  $t=253/6$  s



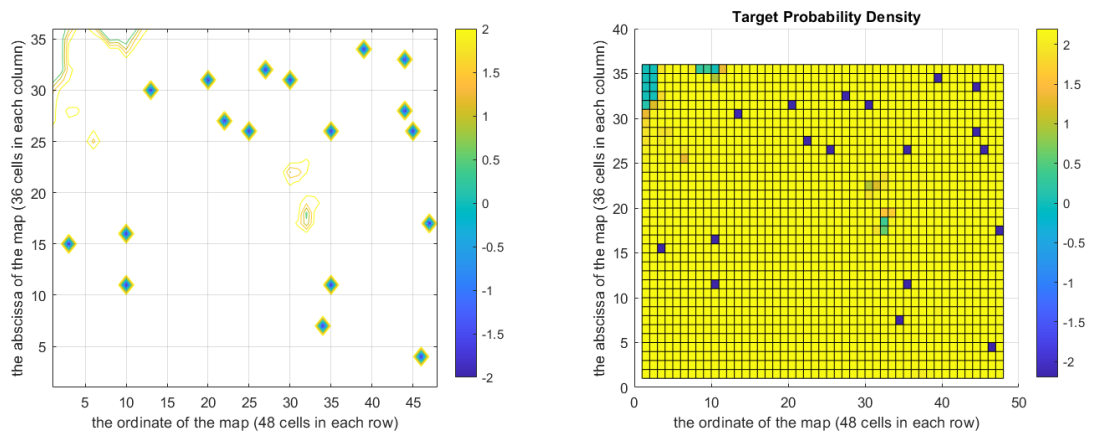
ج) نقشه TPM در لحظه  $t = 253.6$  s : هدف با احتمال بالای ۰.۸۸، ۱، هدف با احتمال بالای ۰.۸۵ و ۳ هدف با احتمال بالای ۰.۸۰ کشف و محل دقیق آنها مشخص شده است. مقدار احتمال در نقشه TPM به سمت  $-2/1972$  و  $2/1972$  به ترتیب بیانگر وجود و عدم وجود هدف در سلول است.

شکل ۱۰- نقشه شناخت و مسیر عامل‌ها در لحظه  $t = 253.6$  s



ب) نقشه نامعینی UM در لحظه  $t = 633.9$  s : مقدار ۰ و ۱ برای نامعینی به ترتیب به معنای شناخت و عدم شناخت UAV نسبت به سلول است.

الف) مسیر و سلول‌های تحت پوشش UAV ها در لحظه  $t = 633.9$  s



ج) نقشه TPM در لحظه  $t = 633.9$  s : ۱۸ هدف با احتمال بالای ۰.۸۸ کشف و محل دقیق آنها مشخص شده است. مقدار احتمال در نقشه TPM به سمت  $-2/1972$  و  $2/1972$  به ترتیب بیانگر وجود و عدم وجود هدف در سلول است.

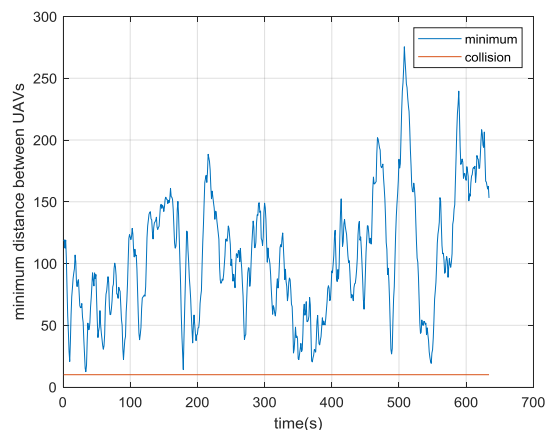
شکل ۱۱- نقشه شناخت و مسیر عامل‌ها در لحظه  $t = 633.9$  s



همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، حداقل فاصله بین عامل‌ها همواره بیشتر از ۱۰ m است که بدان معناست هیچ گاه دو عامل در یک سلول قرار نگرفته‌اند و عدم برخورد بین عامل‌ها قطعاً تضمین شده است.

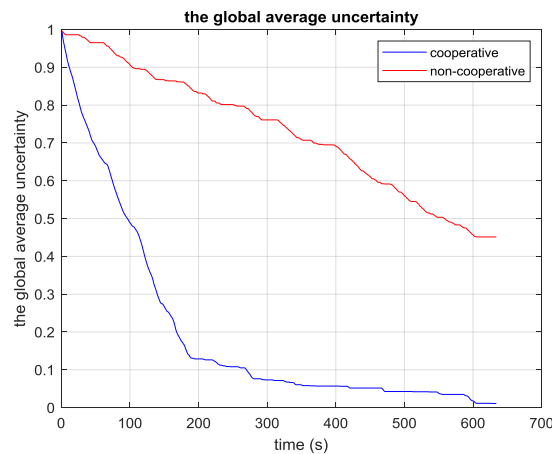
### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک الگوریتم کنترل توزیع‌شده با افق دورشونده برای یک تیم مشارکتی متشکل از چند UAV بال-ثابت اعمال شد تا با همکاری یکدیگر به اجرای ماموریت جستجو و پوشش مشارکتی بپردازند. توسعه استفاده از سیستم چند عامله مشارکتی به کاربردهای مدیریت بحران از مهم‌ترین ایده‌های مقاله حاضر است. سناریوی مطرح شده در این تحقیق قابلیت پیاده سازی روی سیستم چند عامله و بکارگیری آن توسط تیم مدیریت بحران برای ماموریت‌هایی مانند مانیتورینگ، جستجو و نجات، جمع‌آوری اطلاعات و همچنین عملیات لجستیکی را دارد. نوآوری دیگر این تحقیق، دسته‌بندی مطالعات انجام شده در زمینه کاربردهای مختلف سیستم چند عامله در مدیریت بحران بر اساس نوع بحران، نوع وسیله بدون سرنشین و کاربرد است. بدین منظور مقالات مرتبط با کاربردهای مختلف اعم از سیستم پیش‌بینی و هشدار، شبکه ارتباطی اضطراری، جستجو و نجات، جمع‌آوری اطلاعات و ارسال برخط گزارش به واحد کنترل بحران، ارزیابی آسیب زیرساخت‌ها، مانیتورینگ و در نهایت عملیات لجستیکی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نوآوری

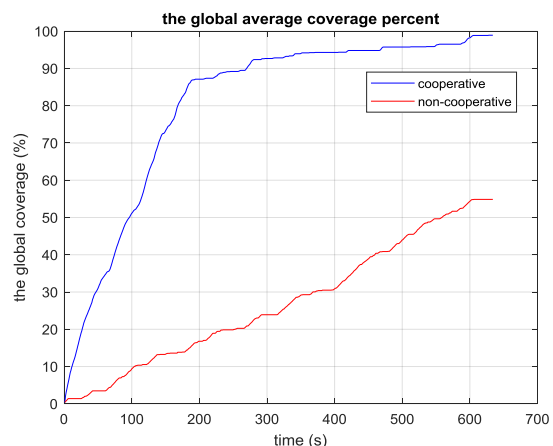


شکل ۱۴- عدم برخورد بین عامل‌ها در طول اجرای عملیات جستجو پوشش مشارکتی توسط چهار UAV بال-ثابت

روند کاهش میانگین نامعینی محیط برای دو روش جستجو و پوشش مشارکتی و غیر مشارکتی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در بخش ۳-۱ توضیح داده شد، در روش بروز رسانی مشارکتی نقشه TPM، عامل‌های همسایه با یکدیگر تبادل اطلاعات کرده و ضمن اشتراک نقشه‌های شناختی یکدیگر از محیط، با تلفیق اطلاعات یکدیگر به یک نقشه شناخت واحد می‌رسند. شکل ۱۳ نیز درصد پوشش محیط توسط سیستم چند عامله را نمایش می‌دهد. همانطور که از مشاهده شکل‌های ۱۲ و ۱۳ پیداست، در روش مشارکتی نامعینی و پوشش محیط بسیار زودتر به حداقل و حداکثر میزان مطلوب و مورد نظر می‌رسند.



شکل ۱۲- مقایسه روند کاهش نامعینی در دو روش مشارکتی و غیرمشارکتی



شکل ۱۳- مقایسه روند افزایش درصد پوشش در دو روش مشارکتی و غیرمشارکتی

- [2] Rosalie M, Danoy G, Bouvry P, Chaumette S (2016) UAV multilevel swarms for situation management. Proceedings of the 2nd Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use 49-52 .
- [3] Liu CH, Chen Z, Tang J, Xu J, Piao C (2018) Energy-efficient UAV control for effective and fair communication coverage: A deep reinforcement learning approach. IEEE J Sel Area Comm 36(9): 2059-2070.
- [4] Zhao H, Wang H, Wu W, Wei J (2018) Deployment algorithms for UAV airborne networks toward on-demand coverage. IEEE J Sel Area Comm 36(9): 2015-2031.
- [5] Bor-Yaliniz RI, El-Keyi A, Yanikomeroglu H (2016) Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks. IEEE international conference on communications (ICC): 1-5 .
- [6] Chen M, Mozaffari M, Saad W, Yin C, Debbah M, Hong CS (2017) Caching in the sky: Proactive deployment of cache-enabled unmanned aerial vehicles for optimized quality-of-experience. IEEE J Sel Area Comm 35(5): 1046-1061.
- [7] Mozaffari M, Saad W, Bennis M, Debbah M (2016) Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage. IEEE Commun Lett 20(8): 1647-1650.
- [8] Kalantari E, Yanikomeroglu H, Yongacoglu A (2016) On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks. IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall): 1-6 .
- [9] Sivakumar A, Tan CKY (2010) UAV swarm coordination using cooperative control for establishing a wireless communications backbone. Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems 3: 1157-1164 .
- [10] Lyu J, Zeng Y, Zhang R, Lim TJ (2016) Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations. IEEE Commun Lett 21(3): 604-607.
- [11] Wu Q, Zeng Y, Zhang R (2018) Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks. IEEE T Wirel Commun 17(3): 2109-2121.
- [12] Tuna G, Mumcu TV, Gulez K (2012) Design strategies of unmanned aerial vehicle-aided communication for disaster recovery. High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies 115-119 .
- [13] Bupe P, Haddad R, Rios-Gutierrez F (2015) Relief and emergency communication network based on an autonomous decentralized UAV clustering network. SoutheastCon 2015 1-8.

دیگر این مقاله توسعه الگوریتم کنترل توزیع شده با افق دور شونده بر روی یک سیستم چند عامله مشارکتی برای پوشش محیط بحران زده و جستجوی قربانیان یا بازماندگان حادثه است. هر کدام از UAV ها با عامل‌های همسایه خود در ارتباط بوده و اطلاعات خود از محیط را با یکدیگر به اشتراک می‌گذارند تا با همکاری یکدیگر نقشه شناخت واحد و جامعی از کل محیط بسازند. این نقشه شناخت شامل نقشه احتمال وجود هدف (TPM) و نقشه نامعینی (UM) است که هر عامل بر اساس نقشه بروز شده و پیش‌بینی گام‌های بعدی خود و همچنین عامل‌های همسایه، به صورت کاملا مستقل برای حرکت بعدی خود تصمیم‌گیری می‌کند. تصمیم‌گیری عامل-ها به گونه‌ای است که در نهایت در یک مسیر بدون برخورد در کمترین زمان، بیشترین پوشش محیط حاصل شده و ضمن مکانیابی اهداف احتمالی موجود در محیط، نامعینی محیط به حداقل برسد. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم مشارکتی، روند کاهش نامعینی در شناخت سیستم چند عامله از محیط و درصد پوشش محیط برای دور روش مشارکتی و غیرمشارکتی مقایسه شده که نتایج حکایت از تاثیر بسیار زیاد روش مشارکتی بر سرعت اجرای ماموریت دارد.

در تحقیق‌های بعدی می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی مونت-کارلو تاثیر عوامل مختلفی اعم از تعداد عامل‌ها، شعاع مشاهده سنسورها، شعاع ارتباطی بین عامل‌ها و ... را روی عملکرد الگوریتم، مورد ارزیابی قرار داد؛ همچنین می‌توان از سیستم چند عامله غیرهمگن استفاده کرد و در سناریوی سیل از ترکیب USV و UAV و در سناریوی زلزله از ترکیب UAV و UGV استفاده کرد؛ همچنین برای تیم UAV ها نیز می‌توان از انواع بال-ثابت و مولتی‌روتورها استفاده کرد. از طرفی دیگر، با توجه به احتمال سقوط یا از کار افتادگی عامل‌ها می‌توان بازآرایی خودکار عامل‌ها و طراحی کنترلر تحمل‌پذیر عیب را نیز موضوع تحقیق‌های بعدی قرار داد.

## ۷- مراجع

- [1] Aminzadeh A, Khoshnood A (2021) A review on natural disaster management with the aid of a multi agent system comprising unmanned vehicles. The 19th International Conference of Iranian Aerospace Society, Tehran, Iran, 2021.

- monitoring. *Optim Control Appl Methods* 39(4): 1530-1548.
- [28] Lin Z (2017) Multiple UAV cooperation for wildfire monitoring. Ph.D. Thesis, University of Toronto, Canada.
- [29] Afghah F, Razi A, Chakareski J, Ashdown J (2019) Wildfire Monitoring in Remote Areas using Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*: 835-840 .
- [30] Bailon-Ruiz R, Lacroix S, Bit-Monnot A (2018) Planning to monitor wildfires with a fleet of UAVs. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*: 4729-4734.
- [31] Rabinovich S, Curry RE, Elkaim GH (2018) Toward dynamic monitoring and suppressing uncertainty in wildfire by multiple unmanned air vehicle system. *J Robotic Syst* 2018(4): 1-12
- [32] Quaritsch M, Kruggl K, Wischounig-Struel D, Bhattacharya S, Shah M, Rinner B (2010) Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications. *Elektrotech Inf* 127(3): 56-63.
- [33] Maza I, Caballero F, Capitán J, Martínez-de-Dios JR, Ollero A (2011) Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. *J Intell Robot Syst* 61(1-4): 563-585.
- [34] Han J, Xu Y, Di L, Chen Y (2013) Low-cost multi-UAV technologies for contour mapping of nuclear radiation field. *J Intell Robot Syst* 70(1-4): 401-410.
- [35] Farfaglia S (2015) The use of UAV to monitor and manage the territory: perspectives from the SMAT project. *Eng Geol Soc* 691-695.
- [36] Carlsson JG, Song S (2018) Coordinated logistics with a truck and a drone. *Manage Sci* 64(9): 4052-4069.
- [37] Mosterman PJ, Sanabria DE, Bilgin E, Zhang K, Zander J (2014) A heterogeneous fleet of vehicles for automated humanitarian missions. *Comput Sci Eng* 16(3): 90-95.
- [38] Chao H, Cao Y, Chen Y (2007) Autopilots for small fixed-wing unmanned air vehicles: A survey. *International Conference on Mechatronics and Automation* 3144-3149 .
- [39] Yanmaz E, Costanzo C, Bettstetter C, Elmenreich W (2010) A discrete stochastic process for coverage analysis of autonomous UAV networks. *IEEE Globe Work* 1777-1782 .
- [40] Li J, Chen J, Wang P, Li C (2018) Sensor-oriented path planning for multiregion surveillance with a single lightweight UAV. *SAR* 18(2): 548, 2018.
- [14] Dalmasso I, Galletti I, Giuliano R, Mazzenga F (2012) WiMAX networks for emergency management based on UAVs. *IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL)* 1-6.
- [15] Beck Z, Teacy WL, Rogers A, Jennings NR (2018) Collaborative online planning for automated victim search in disaster response. *Robot Auton Syst* 100: 251-266.
- [16] Murphy RR (2012) Marine heterogeneous multirobot systems at the great Eastern Japan Tsunami recovery. *J Field Robot* 29(5): 819-831.
- [17] Zhang J, Xiong J, Zhang G, Gu F, He Y (2016) Flooding disaster oriented USV & UAV system development & demonstration. *Oceans 2016-Shanghai* 1-4.
- [18] Beck Z, Teacy W, Jennings N, Rogers A (2016) Online planning for collaborative search and rescue by heterogeneous robot teams. *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems*.
- [19] Beck Z (2016) Collaborative search and rescue by autonomous robots. University of Southampton.
- [20] Gutiérrez MA, Nair S, Banchs RE, Enriquez LF, Niculescu AI, Vijayalingam A (2015) Multi-robot collaborative platforms for humanitarian relief actions. *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*: 1-6 .
- [21] Sánchez-García J, García-Campos JM, Toral S, Reina D, Barrero F (2016) An intelligent strategy for tactical movements of UAVs in disaster scenarios. *Int J Distrib Sens N* 12(3).
- [22] Kim Y, Bang H (2016) Decentralized control of multiple unmanned aircraft for target tracking and obstacle avoidance. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*: 327-331.
- [23] Moon S, Yang K, Gan SK, Shim DH (2015) Decentralized information-theoretic task assignment for searching and tracking of moving targets. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*: 1031-1036.
- [24] Michael N (2014) Collaborative mapping of an earthquake damaged building via ground and aerial robots. *Springer Trac Adv RO* 33-47.
- [25] Pham HX, La HM, Feil-Seifer D, Deans MC (2018) A distributed control framework of multiple unmanned aerial vehicles for dynamic wildfire tracking. *IEEE Trans Syst Man Cybern: Syst*.
- [26] Julian KD, Kochenderfer MJ (2019) Distributed wildfire surveillance with autonomous aircraft using deep reinforcement learning. *J Guid Control Dynam* 42(8): 1768-1778.
- [27] Lin Z, Liu HH (2018) Topology-based distributed optimization for multi-UAV cooperative wildfire

[42] Yang Y (2005) Cooperative search by uninhabited air vehicles in dynamic environment. University of Cincinnati.

[41] Liu Z, Gao X, Fu X (2018) A cooperative search and coverage algorithm with controllable revisit and connectivity maintenance for multiple unmanned aerial vehicles. Sensors 18(5): 1472.