

مدل سازی مسیریابی بهینه ی ریز پرنده های خودمختار با استفاده از سیستم های استنتاج فازی و الگوریتم های تکاملی

عبدالرضا اسدی قنبری^۱، سیدعباس ساداتی نژاد^۲

۱- استادیار آکادمی هوش مصنوعی و فناوریهای نوین، تهران ۲- کارشناس ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲، انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.3.2.6>

چکیده

یک سیستم هدایت خودکار در پرنده های بدون سرنشین را می توان به دو بخش: سیستم طراحی مسیر و سیستم تعقیب مسیر تقسیم نمود. در این سیستم ها با توجه به محدودیت های زمانی و عدم قطعیت موجود در شرایط حاکم بر صحنه ی نبرد، استفاده از خبرگی فرماندهان نظامی و شبیه سازی رفتار آنها در انجام فرآیندهای طراحی و تعقیب مسیر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است؛ لذا با توجه به ویژگی سیستم های استنتاج فازی با به کارگیری آنها می توان خبرگی فرماندهان را در هدایت پرنده های بدون سرنشین اعمال نمود. در این مقاله به منظور مدل سازی فرآیند مسیریابی آفندی، ریز پرنده ها از یک سیستم استنتاج فازی ممدانی با پنج ورودی و یک خروجی برای تعیین وزن یال ها استفاده شده است. در هر مرحله از فرآیند تصمیم گیری انتخاب مسیر بهینه، نیاز به انجام محاسبات ریاضی پیچیده می تواند الگوریتم های مسیریابی ریز پرنده ها را در شرایط دنیای واقعی بلااستفاده نماید. از این رو به منظور کاهش وابستگی سیستم مسیریابی و تعقیب هدف به محاسبات ریاضی و استفاده از مزایای الگوریتم های همه زمانه برای تولید پاسخ بهینه، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی غیر مغلوب-۲ به عنوان روش حل مدل استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که ترکیب الگوریتم ژنتیک و سیستم استنتاج فازی در انجام فرآیند مسیریابی در شرایط دنیای واقعی دارای کارایی بسیار مطلوبی است و می تواند پاسخ گوی نیازهای عملیاتی فرماندهان این حوزه باشد.

کلیدواژه ها: عملیات شبکه محور، پرواز ازدحامی ریز پرنده، مسیریابی، منطق فازی.

Modeling the Optimal Routing of Autonomous Microbirds Using Fuzzy Inference Systems and Evolutionary Algorithms

A. Asadi Ghanbari*, A. Sadatinejad

Academy of Artificial Intelligence and New Technologies

(Received: 2023/09/18, Revised: 2023/09/05, Accepted: 2023/09/13, Published: 2023/12/04)

Abstract

An automatic guidance system in drones can be divided into two parts: path design and follow the path. In these systems, due to the time limitations and the uncertainty in the conditions prevailing on the battlefield, it is very important to use the expertise of the military commanders and emulate their behavior in these systems, due to the time constraints and the uncertainty in the conditions prevailing on the battlefield, it is very important to use the expertise of military commanders and simulate their behavior in the design and route tracking processes. Therefore, according to the characteristics of fuzzy inference systems, by using them, the commanders' expertise can be applied in autonomous drones. In this article, in order to model the UAVs offensive routing, a Mamdani fuzzy inference system with five inputs and one output is used to determine the edges weight. At each stage of decision-making process of choosing the optimal route, the need to perform complex mathematical calculations can make drone routing algorithms useless in real-world conditions. Therefore, in order to reduce the dependence of the routing and target tracking system on mathematical calculations and to use the advantages of anytime algorithms to produce the optimal answer, genetic algorithm and non-dominant sorting genetic algorithm-II have been used as the method of solving the model. The simulation results show that the combination of genetic algorithm and fuzzy inference system has a very favorable efficiency in performing the routing process in real world conditions and can meet the operational needs of commanders in this field.

Keywords: Network-Oriented Operations, Drone Swarming, Routing, Fuzzy Logic.

۱. مقدمه

برمی‌گردد [۷] و معمولاً مدل تخصیص منابع در قالب تئوری بازی [۸] و یا تئوری بهینه‌سازی [۹] بیان می‌شود.

اغلب کارهای پیشین به حل مسئله تخصیص منابع تسلیحاتی مانند موشک‌ها و جنگنده‌های مرسوم پرداخته‌اند، اما در حجم بالایی از کارهایی که در سال‌های اخیر انجام شده است استفاده از ریز پرنده‌ها و پهپادها به‌صورت چشم‌گیری افزایش پیدا کرده است. یک بررسی جامع از رویکردهای مختلف مدل‌سازی مسئله تخصیص ریز پرنده‌ها اخیراً توسط اسیف علی و همکاران [۱۰] و اگرال و کومار [۱۱] انجام شده است. در سال‌های اخیر هم‌زمان با پیشرفت‌های صورت‌گرفته در حوزه کنترل، سیستم‌های اندازه‌گیری و علوم رایانه‌ای، فعالیت‌های زیادی در حوزه مسیریابی بهینه‌ی ریز پرنده‌ها در بعد نظامی و غیرنظامی ارائه شده است [۱۲ و ۱۳]. روش‌های مرسوم طراحی مسیر عبارت است از: نقشه‌های راه^۷، میدان‌های پتانسیل، الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری، روش‌های بهینه‌سازی و روش‌های واکنشی و اجتناب از برخورد الهام گرفته از زیست‌شناسی [۱۴].

از جمله روش‌هایی که به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های مبتنی بر کنترل بهینه است [۱۵ و ۱۶]. روش‌های مبتنی بر کنترل بهینه قادر هستند که با تعریف یک تابع هزینه مناسب، مسیری ایمن که قیدهای دینامیکی را برآورده می‌کند، به دست دهد. بر مبنای کنترل بهینه، مسیری سه‌بعدی برای پرواز یک هلیکوپتر با سرعت ثابت را طراحی شده است [۱۷ و ۱۸]. تابع معیاری که آن‌ها استفاده کردند، ترکیبی از ارتفاع عوارض زمین‌وزمان پرواز است، به‌طوری‌که علاوه بر حداقل‌سازی زمان پرواز می‌توان به پنهان‌ترین مسیر در میان عوارض زمین دست‌یافت. در این مراجع، با استفاده از یک دستگاه مماس بر سطح عوارض زمین، معادلات سینماتیکی ساده شده‌ای از حرکت هلیکوپتر مورد استفاده قرار گرفته است. از این فرمولاسیون برای محاسبه مسیرهای بهینه پروازی بهره‌برداری شده است [۱۹ و ۲۰].

فرمولاسیون قبلاً گزارش شده [۱۸] برای حالت انرژی ثابت توسعه داده شده است [۱۹]. برای دو حالت سرعت ثابت و سرعت متغی نیز طراحی مسیر پرواز بهینه سه‌بعدی انجام شده است [۲۰]. در حالت سرعت متغیر، با در نظر گرفتن متغیر سرعت به‌عنوان یک متغیر حالت، معادلات دینامیکی جرم نقطه‌ای در کنار روابط سینماتیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مرجع، تابع هزینه‌ای مرکب از زمان پرواز و میزان انحراف از پروفیل عوارض زمین تعریف شده است، به‌طوری‌که منجر به معادلات دیفرانسیلی برای زاویه سمت و زاویه مسیر می‌گردد. از

بسیاری از عملیات نظامی امروزی که برای دفاع از یک ناحیه راهبردی خاص، اسکورت سکوه‌های غیرنظامی، یا فراهم‌کردن پشتیبانی آتش برای نیروهای دوست انجام می‌شوند در نواحی شلوغ و پرتراکم (نواحی ساحلی مانند تنگه‌ی هرمز) اجرا می‌گردند. فاکتورهای مختلفی باعث افزایش پیچیدگی عملیات در جنگ‌های امروزی شده است که از جمله‌ی آنها می‌توان به مواردی مانند: ضرب‌آهنگ تند، چگالی بالا، عدم یکنواختی و محدودیت‌های موجود بر روی منابع اشاره کرد. به عقیده‌ی صاحب‌نظران در چنین شرایطی برتری کامل اطلاعاتی و دستیابی به همکاری قوی میان واحدهای توزیع‌شده‌ی نیرو از طریق امکانات شبکه‌محور و استفاده از سلاح‌های چابک نسل جدید مانند ریز پرنده‌ها و پهپادهای خودمختار یا نیمه‌خودمختار راه‌حل مناسبی را برای غلبه بر این مشکلات فراهم می‌کند [۱].

سیستم‌های خودمختار در حوزه هدایت پرنده‌های بدون سرنشین در حال جایگزینی با عملگر انسانی هستند [۲ و ۳]. هدایت خودکار در پرنده‌های بدون سرنشین را می‌توان به دو بخش: سیستم طراحی مسیر و سیستم تعقیب مسیر تقسیم نمود. یک سیستم مسیریابی خودکار باید با تجزیه و تحلیل دقیق منطقه عملیات، امن‌ترین مسیر ممکن را برای حرکت پرنده به‌سوی اهداف تعیین شده و انجام مأموریت محوله تعیین نماید. در این سیستم‌ها رویکردهای مختلفی برای طراحی مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴ و ۵]. معیارهای تعیین مسیر عبارت‌اند از: الف) کمینه‌شدن میزان خطرات کلی مانند ریسک شناسایی توسط دشمن؛ ب) بهینه‌گی پارامترهایی از قبیل زمان رسیدن به هدف، مصرف سوخت یا طول مسیر؛ ج) لحاظ نمودن قید عدم اصابت به عوارض و موانع و د) بهینه‌شدن قابلیت‌های دینامیک هواپیمای بدون سرنشین در طی مسیر [۶].

در فرماندهی و کنترل ریز پرنده‌ها، عملیات‌های متعدد و متنوعی باید انجام شود. مأموریت‌هایی مشتمل بر: ۱) آشکارسازی هدف^۱، ۲) ردیابی یا ردگیری هدف^۲، ۳) شناسایی هدف^۳، ۴) ارزیابی تهدید^۴، ۵) تخصیص منابع^۵ (شامل مسیریابی، تعقیب اهداف و تخصیص سلاح^۶ به آنها) وظیفه‌ی اصلی چنین سیستم‌هایی است. موضوع اصلی این مقاله، ارائه‌ی مدل مناسب برای مسیریابی ریز پرنده‌ها با تمرکز بر روی تعقیب اهداف و تخصیص منابع به آنها است. اغلب تحقیقات انجام شده بر روی مسئله تخصیص منابع ریشه در کاربردهای نظامی دارد که به دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰

¹ Target Detection

² Target Tracking

³ Target Identification

⁴ Threat Evaluation

⁵ Resource Allocation

⁶ Weapon Allocation

پیدا کند. باتوجه به محدودیت‌های زمانی و عدم قطعیت موجود در شرایط حاکم بر صحنه‌ی نبرد، این ویژگی الگوریتم‌های تکاملی در حوزه‌ی مدیریت منابع رزمی در نبردها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک با کدینگ عدد صحیح (صفر و یک) برای تعیین درخت پوشای بهینه استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک به دلیل بهره‌گیری از جستجوی موازی در مسائلی که دارای فضای جستجوی بزرگی هستند اغلب نتیجه مطلوبی را کسب می‌کند، پیاده‌سازی آن ساده است و نیازی به روال‌های پیچیده حل مسئله ندارد. علاوه بر این به‌منظور به‌کارگیری خبرگی فرماندهان در تعیین مسیر بهینه از یک سیستم استنتاج فازی ممدانی برای تعیین وزن یال‌های گراف مسیریابی استفاده شده است.

در صورت متحرک بودن اهداف در عملیات‌های ریز پرنده محور پس از رسیدن به موقعیت هدف، مسئله‌ی تعقیب هدف مطرح می‌گردد. تعقیب هدف متحرک در منطقه‌ای با تهدیدات مختلف نیازمند به مصالحه میان دو هدف مأموریت است که احتمالاً این اهداف با هم دارای تعارض هستند؛ ماندن در مجاورت هدف و کمینه‌سازی سطح تهدیدات احساس شده از سوی هدف. الزام اول توسط دایره مجاورت کمی شده، دایره‌ای که مرکز آن منطبق بر هدف است و همراه با آن حرکت می‌کند (شکل ۱). در طول مأموریت تعقیب طبق رابطه (۱) راهبرد تعقیب هدف سعی در حفظ پرنده در داخل دایره مجاورت دارد.

$$|r_{UAV} - r_t| \leq r_p \quad (1)$$

r_p شعاع دایره‌ی مجاورت و r_{UAV} و r_t به ترتیب بردار موقعیت پرنده و هدف است. شعاع دایره‌ی مجاورت (r_p) پارامتر طراحی است و میزان نزدیکی پرنده به هدف را مشخص می‌کند. در اینجا فرض شده است موقعیت هدف تا زمانی که در محدوده‌ی برد حسگرها قرار دارد، قابل اندازه‌گیری است. این قید به‌صورت رابطه‌ی (۲) بیان شده و r_s شعاع یا برد حسگر است که در شکل (۱) نیز نشان داده شده است.

$$|r_{UAV} - r_t| \leq r_s \quad (2)$$

شعاع دایره مجاورت (r_p) مشخص‌کننده میزان مصالحه میان نزدیکی به هدف و سطح تهدیدات احساس شده از سوی آن است. با تعیین شعاع مجاورت بزرگ‌تر، راهبرد تعقیب هدف منطقه وسیع‌تری را برای یافتن مسیر با سطح پایین تهدیدات جستجو می‌کند، اما هدف را با فاصله بیشتری دنبال می‌کند و نیز ریسک خارج شدن هدف از برد حسگر افزایش می‌یابد.

یادگیری تقویتی برای طراحی مسیر ریز پرنده‌ها در پروازهای ازدحامی استفاده شده است [۲۱].

در این مقاله با ترکیب منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی به تعیین مسیر بهینه‌ی حرکت ریز پرنده‌ها با تمرکز بر بیشینه نمودن میزان کارایی آنها پرداخته می‌شود؛ لذا در این مقاله، در بخش دوم راهبرد مسیریابی و تعقیب اهداف در عملیات ریز پرنده محور و سیستم استنتاج فازی در سیستم مسیریابی ریز پرنده‌ها تعریف شده و فرآیند مدل‌سازی تخصیص ریز پرنده تشریح می‌گردد. همچنین در این بخش روش تعیین مسیر بهینه‌ی ریز پرنده‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب-۲ ارائه شده است. در بخش سوم نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مطالب ارائه شده در بخش چهارم جمع‌بندی می‌شود.

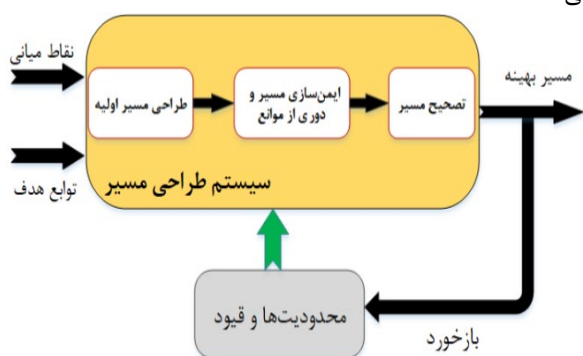
۲. روش تحقیق

در هدایت خودکار ریز پرنده‌ها، طراحی گراف مسئله و مسیریابی دو مؤلفه کلیدی هستند. گراف مسئله شامل مجموعه‌ای از گره‌ها است که باید توسط ریز پرنده‌ها مورد حمله قرار گیرند و گراف مسیریابی یا نقشه حمله، گرافی متشکل از مقاصد حمله، شامل مجموعه‌ای از گره‌ها، یال‌های و وزن‌هایی است که توسط هر ریز پرنده باید پیمایش گردد. در واقع گراف مسئله بیان‌کننده یک دستور از سطوح بالای فرماندهی برای حمله به مجموعه‌ای از اهداف بدون توجه به یال‌ها، مسیرها و هزینه‌های پیمایش آنهاست، درحالی‌که گراف مسیریابی نقشه عملیاتی برای اجرای دستور و رسیدن به اهداف مأموریت محول شده به نیرو است.

در این مقاله به‌منظور مدل‌سازی گراف مسیریابی، گراف وزن‌داری طراحی می‌شود که در آن وزن یال‌ها با استفاده از معیارهای تصمیم تعیین می‌گردد. در این گراف با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، مسیر بهینه‌ی حرکت ریز پرنده‌ها تعیین می‌شود. باتوجه به سرعت بالا و پویایی نبردهای نوین و حملات مبتنی بر ریز پرنده‌ها، الگوریتم‌های همه‌زمانه^۱ و معماری‌های بلادرنگ از مناسب‌ترین رویکردها برای مواجهه با این دسته از حملات هستند. نیاز به محاسبات ریاضی پیچیده در هر مرحله از رویارویی/تصمیم‌گیری می‌تواند الگوریتم‌های مسیریابی مرسوم را در شرایط دنیای واقعی بلااستفاده نماید. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، به‌ویژه الگوریتم‌های تکاملی در این حوزه می‌تواند پاسخ‌گوی بسیاری از نیازها باشد. الگوریتم‌های تکاملی می‌تواند با یک رویکرد همه‌زمانه اجرا شوند (بدون توجه به این‌که الگوریتم چقدر اجرا شده است، می‌تواند پاسخ را تولید نمایند) و خروجی آنها با گذر زمان بهبود

^۱ Anytime Algorithms

موقعیت دیگر را فراهم سازد. در این فرآیند ممکن است قبل از رسیدن به موقعیت نهایی، نقاط متعددی وجود داشته باشد تا ریز پرنده از آنها عبور کند. به این نقاط، نقاط میانی گفته می‌شود که از قبل بر روی نقشه و یا محیط پروازی تعیین می‌شوند. ورودی‌های سیستم طراح مسیر به مختصات نقاط میانی، موقعیت موانع، اندازه آنها و نامعینی‌ها وابسته است؛ لذا مسیرها باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های سینماتیکی و دینامیکی ریز پرنده طراحی گردند [۲۳]. شکل (۲) سیستم طراح مسیر را با در نظر گرفتن محدودیت‌ها، نقاط میانی و همچنین حلقه بازخورد از حالت‌های ریز پرنده‌ها به‌عنوان ورودی طراح مسیر نشان می‌دهد.

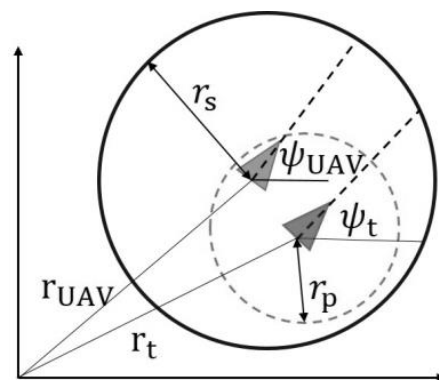


شکل ۲. طرح کلی سیستم طراحی مسیر

در این مقاله مسیر اولیه به‌صورت تصادفی تولید و در ادامه با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب-۲ مسیر بهینه طراحی می‌گردد. با استفاده از عملگرهای تولید نسل، مسیرهای جدید تولید و فرآیند ایمن‌سازی و تصحیح آنها با اعمال محدودیت‌ها در راه‌حل‌های پیشنهادی الگوریتم‌های تکاملی انجام می‌شود. با رسیدن به شرایط خاتمه الگوریتم، مسیر بهینه‌ی نهایی تعیین می‌گردد. در پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها از تعداد تکرارهای ثابت برای شرط خاتمه استفاده می‌شود. محدودیت‌ها و قیود مسیریابی در معیارهای تصمیم که برای تعیین وزن بایال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، اعمال می‌گردند. این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

- عدم الزام در تخصیص همه منابع: تخصیص هر یک از ریز پرنده‌های موجود به یک گره هدف در هر مرحله از درگیری‌ها الزامی نیست. به عبارتی یک‌ریز پرنده می‌تواند در برخی از گره‌ها هیچ اقدامی انجام ندهد و از تسلیحات خود استفاده ننماید. این محدودیت به‌صورت رابطه (۳) در معیارهای تصمیم اعمال می‌گردد.

$$\sum_{i=1}^I X_{ik}^s \leq 1, \quad \forall s, \forall i, \forall k \quad (3)$$



شکل ۱. دایره‌های مجاورت و برد حسگر [۲۶].

راهبرد تعقیب هدف دارای سه هدف اصلی است که به ترتیب اولویت عبارت‌اند از: خارج کردن پرنده از منطقه پرواز ممنوع A_r (به مناطقی که سطح تهدید آنها بسیار بالاست و پهباد نباید وارد آن شود مناطق غیرمجاز A_r گفته می‌شود)؛ حفظ یا قراردادن پرنده در دایره‌ی مجاورت؛ کمینه‌سازی سطح تهدیدات [۲۱]. برای دستیابی به این اهداف، راهبرد تعقیب هدف؛ دستورات هدایتی جهت و سرعت را برای پرنده ایجاد می‌کند. در این مقاله از میزان زاویه چرخش ریز پرنده برای حمله به هدف به‌عنوان یکی از معیارهای تصمیم‌گیری استفاده شده است (جدول ۱).

جدول ۱. نمادها و نشانه‌گذاری‌های استفاده شده در تعریف معیارهای تصمیم

مجموعه‌ها:
T_i : مجموعه‌ی اهداف مهاجم شناسایی شده $i=1,2,\dots,I$
W_k : مجموعه‌ی ریزپرنده‌هایی که در اختیار نیروهای خودی قرار دارد $k=1,2,\dots,K$
S : مجموعه مراحل روبروئی ریز پرنده. $s=1,2,\dots,S$
پارامترها:
P_{ik} : احتمال کشتندگی؛ یعنی احتمال این‌که ریز پرنده آفندی $w_k \in W$ هدف دشمن $T_i \in T$ را نابود کند.
π_{ij} : احتمال این‌که دشمن $T_i \in T$ ریز پرنده خودی $A_j \in A$ را نابود کند (کشتندگی دشمن $T_i \in T$).
V_{ij} : مقدار تهدید زوج گره دشمن-دارایی ریز پرنده خودی (T_i, A_j) .
ω_j : ارزش محافظت از دارایی ریز پرنده خودی $A_j \in A$.
C_{ik} : میزان هزینه استفاده از منابع، هنگام تخصیص ریز پرنده $w_k \in W$ به هدف دشمن $T_i \in T$.
متغیرها:
$X_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{اگر ریز پرنده‌ی } w_k \in W \text{ به دشمن } T_i \text{ تخصیص داده شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

۲-۱. مدل‌سازی گراف مسئله و مسیریابی نقشه عملیات ریز پرنده‌ها

در مسیریابی ریز پرنده‌ها هدف اولیه در طراحی مسیر فراهم کردن ساختار پویایی است که امکان حرکت یا پرواز از یک موقعیت به

هدف زیر به‌عنوان یک معیار تصمیم برای به‌کارگیری اثربخش‌تر ریزپرنده‌های پدافندی/آفندی پیشنهاد شده است:

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I X_{ik} C_{ik} \quad (7)$$

• کمینه‌سازی ریسک تخصیص ریز پرنده

ریسک همیشه یک معیار مهم در تصمیم‌گیری است. در مسئله‌ی تخصیص ریز پرنده، ریسک ممکن است وابسته به تخصیص نامناسب (نا به‌جا) ریز پرنده‌ها به اهداف دشمن باشد. این نامناسب بودن به دلیل نوع ریز پرنده‌ها و اولویتی است که باتوجه به آن تخصیص سلاح صورت می‌گیرد؛ بنابراین در فرآیند تخصیص ریز پرنده، سه نوع ریسک می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود [24]:

ریسک اتمام ریز پرنده: این نوع ریسک وابسته به اتمام ریزپرنده‌های موجود است؛ به‌عبارتی ریسک این‌که ریزپرنده‌ای برای تخصیص به دشمن باقی نمانده باشد.

ریسک اولویت یا ریسک عدم تخصیص: ریزپرنده‌ای که در فرآیند تعقیب هدف در مسیر رسیدن به گره موردنظر یک یال خاص (مسیر رسیدن به یک گره خاص) را انتخاب می‌کند ممکن است به‌کارگیری آن در یالی دیگر (برای مقابله با ریزپرنده یا دشمن دیگری در مرحله‌ی جاری یا استفاده از آن در مراحل بعدی) مناسب‌تر از یال انتخاب شده‌ی کنونی باشد.

ریسک کشف یا ریسک تخصیص: این ریسک اشاره به شناسایی و ردگیری ریز پرنده توسط سیستم راداری دشمن دارد. در واقع این ریسک برعکس ریسک نوع دوم است، ریسک نوع دوم به ریسک عدم تخصیص ریز پرنده به یک یا چند هدف دشمن (انتخاب یال) و ریسک نوع سوم به ریسک احتمال شناسایی ریز پرنده توسط دشمن در صورت انتخاب یک یال خاص اشاره دارد.

در این مقاله نوع دوم ریسک موردتوجه قرار گرفته و برای هر گره از معیار ریسک عدم انتخاب استفاده شده است. این تابع ریسک با استفاده از میزان کشندگی هر گره دشمنی که به هر دلیلی (مانند استفاده شدن سلاح‌ها در مراحل قبل، سیاست رویارویی و مقدار ارزش محافظت دارایی‌های پدافندی) ریز پرنده خودی نمی‌تواند یال منتهی به آنها را انتخاب کند محاسبه می‌گردد. در این حالت چون در هر گره، ریز پرنده می‌تواند به یکی از یال‌های موجود تخصیص داده شود، این ریسک معادل عدم تخصیص این ریز پرنده به سایر یال‌ها در همان گره است. در واقع انتخاب هر یال توسط ریز پرنده شامل یک مقدار ریسک است که معادل انتخاب این یال توسط ریز پرنده و عدم انتخاب سایر یال‌های متصل به آن گره است؛ بنابراین اگر در گره‌ای فقط یک یال موجود باشد؛ چون ریز پرنده انتخاب دیگر ندارد ریسکی را نیز متحمل نمی‌گردد. این تابع ریسک به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

• تخصیص کامل: مطابق معادله (4) در طی مراحل درگیری با تهدیدات، تخصیص کسری ریزپرنده‌ها به اهداف مهاجم امکان‌پذیر نیست.

$$X_{ik}^s \in \{0,1\}, \forall s, \forall i, \forall k \quad (4)$$

۲-۲. معیارهای تصمیم در تعیین وزن یال‌ها

در این مقاله برای شبیه‌سازی سناریوهای واقعی‌تر، پنج معیار تصمیم برای تعیین وزن یال‌های گراف مسیریابی مسئله استفاده می‌شوند. این معیارها که عبارتند از [24]: مجموع مقادیر تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن، هزینه استفاده از ریز پرنده‌ها، ریسک تخصیص ریزپرنده‌ها، فاصله پیموده شده تا گره هدف و میزان زاویه چرخش ریز پرنده برای حمله به هدف. نمادها و نشانه‌گذاری‌هایی که در مدل‌سازی این معیارهای تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، در جدول (1) ارائه شده است.

• کمینه‌سازی مجموع تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن

مسئله‌ی تخصیص ریز پرنده می‌تواند به‌عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مطرح گردد که نیروهای خودی قصد دارند ریز پرنده‌هایی را به‌منظور کمینه‌سازی احتمال بقای اهداف دشمن (تهدید ایجاد شده به‌وسیله ریز پرنده‌های مهاجم یا سایر سیستم‌های عملیاتی دشمن) تخصیص دهند. در متون حوزه‌ی فرماندهی و کنترل و تخصیص منابع تسلیحاتی روش‌های مختلفی برای محاسبه مقدار بقای دشمن پیشنهاد شده است [24]. در این مقاله مقدار هدف یا بقای دشمن به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^J V_j \omega_j}{\sum_{j=1}^J \omega_j}, \quad i=1,2,\dots,I \quad (5)$$

اگر یک سناریوی پدافندی شامل K ریزپرنده‌ی پدافندی و I ریزپرنده‌ی مهاجم باشد، معیار تصمیم برای محاسبه‌ی جمع احتمال بقای اهداف دشمن می‌تواند به‌صورت زیر فرموله گردد:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^I V_i \prod_{k=1}^K (1 - P_{ik})^{X_{ik}} \quad (6)$$

در معادله (6) فرض شده است که تمامی ریز پرنده‌ها/گره‌های دشمن موجود در سناریو برای ریزپرنده‌ی خودی تهدید ایجاد می‌کنند.

• کمینه‌سازی هزینه استفاده از ریز پرنده

حفظ منابع عملیاتی (ریز پرنده‌ها) به دو دلیل از اهمیت بالایی برخوردار است، به‌منظور استفاده از آنها در حملات احتمالی آتی و همچنین قیمت بالای این دسته از منابع [9]، در این مقاله تابع

هدف با $\Psi_{H-Change}$ نشان داده می‌شود. این معیار تصمیم که مجموع تمامی تغییرات در جهت ریز پرنده در تمامی گره‌های موجود در مسیر است به صورت زیر فرموله می‌گردد:

$$\min f_5 = \sum_{i=1}^I \Psi_{(H-Change)}(i) \quad (10)$$

۳-۲. مدل‌سازی چندمعیاری وزن یال‌ها در گراف مسیریابی ریز پرنده‌ها

باتوجه به تعداد مراحل درگیری/گره‌های هدف و معیارهای موفقیت در عملیات برای مدل‌سازی واقع‌گرایانه مسئله تخصیص ریز پرنده باید آن را به صورت چندمرحله‌ای و چندمعیاره مدل نمود [۹]. در مدل‌سازی انجام شده در این مقاله، درگیری‌ها به صورت چندمرحله‌ای بوده و در گره‌های مختلف انجام می‌گیرد؛ بنابراین، از نقطه نظر چندهدفه بودن و به منظور اتخاذ تصمیمات اثربخش باتوجه به اهداف در نظر گرفته شده یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن میزان ارجحیت هر یک از اهداف به صورت زیر طراحی می‌گردد:

$$\max U = \sum_{s=1}^S F(\gamma_l^s, f_l^s) \quad l=1, \dots, L \quad (11)$$

در این مدل، f نشان‌دهنده تابع هدف، l شماره معیار تصمیم، S مرحله، γ میزان ارجحیت (وزن) تابع هدف مورد نظر و F تابع کارایی است. در هر مرحله، F ترکیبی از مقادیر بهینه‌ی توابع f_1, f_2, f_3, f_4 and f_5 به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \min_{X_{ik} \in \{0,1\}} & f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 \\ \text{s.t. } & f_1 = \sum_{i=1}^I V_i \prod_{k=1}^K (1 - P_{ik})^{X_{ik}} \\ & f_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I C_{ik} X_{ik} \end{aligned} \quad (12)$$

$$f_3 = \sum_{j=1}^J \omega_j \cdot \left\{ \sum_{i=1}^I \pi_i \cdot \prod_{k=1}^K (1 - X_{ik}) \right\}$$

$$f_4 = \sum_{i=1}^I Dist$$

$$f_5 = \sum_{i=1}^I \Psi_{(H-Change)}(i)$$

به شرط اینکه:

$$\sum_{i=1}^I X_{ik}^s \leq 1, \quad \forall s=1, 2, \dots, S, \quad \forall k=1, 2, \dots, K \quad (13)$$

$$X_{ik}^s \in \{0, 1\}, \quad \forall s=1, 2, \dots, S, \quad \forall i=1, 2, \dots, I, \quad \forall k=1, 2, \dots, K \quad (14)$$

$$\min f_3 = \sum_{j=1}^J \omega_j \cdot \left\{ \sum_{i=1}^I \pi_i \cdot \prod_{k=1}^K (1 - X_{ik}) \right\} \quad (8)$$

• کوتاه‌ترین فاصله مکانی/زمان تا گره هدف

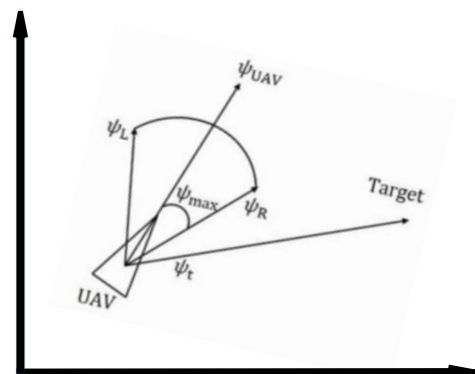
فاصله‌ای که باید ریز پرنده طی کند تا گره هدف در تیررس آن قرار گیرد و به آن حمله نماید به عنوان کوتاه‌ترین فاصله مکانی است. هدف، انتخاب کوتاه‌ترین یال/مسیر برای رسیدن به گره دشمن است.

$$\min f_4 = \sum_{i=1}^I Dist(i) \quad (9)$$

که $Dist(i)$ طول یالی در مسیر حرکت ریز پرنده است که به گره i ختم می‌شود.

• کمینه‌سازی زاویه چرخش ریز پرنده برای حمله به هدف

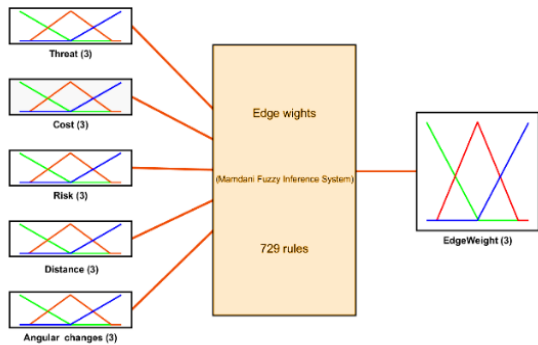
راهبرد تعقیب هدف هنگام محاسبه‌ی دستورات هدایتی باید قیود دینامیکی پرنده را نیز در نظر داشته باشد. قید تغییر جهت^۱ HC یکی از اصلی‌ترین قیود دینامیکی پرنده است. پرنده نمی‌تواند جهت خود را به یکباره تغییر دهد. سرعت تغییر جهت باتوجه به دینامیک پرنده محدود می‌شود. این قید با تعریف زاویه Ψ_{max} مدل شده و برابر با بیشترین تغییر زاویه ممکن برای جهت پرنده در هر بازه شبیه‌سازی است. Ψ_{max} بدون توجه به سرعت پرنده ثابت فرض شده است. مخروط قید جهت براساس این زاویه به صورت محدوده‌ی زاویه‌های تغییر جهت مجاز تعریف شده است که با پرنده جابه‌جا می‌شود (شکل ۲). این مخروط توسط Ψ_L و Ψ_R مرزبندی شده که به ترتیب عبارت از بیشترین زاویه مجاز و چرخش به چپ و راست است. در شکل (۳)، Ψ_{UAV} و Ψ_t به ترتیب زاویه‌ی ریز پرنده و هدف نسبت به افق است.



شکل ۳. مخروط جستجوی جهت و سمت هدف [۲۶].

در این مقاله یکی از معیارهای تصمیم انتخاب مسیری است که در رسیدن به گره‌های هدف موجود در آن، ریز پرنده برای حمله به هر یک از آنها نیازمند به کم‌ترین تغییر زاویه ممکن در جهت خود است. زاویه موردنیاز برای تغییر در جهت ریز پرنده در هر گره

¹ Heading Constraint

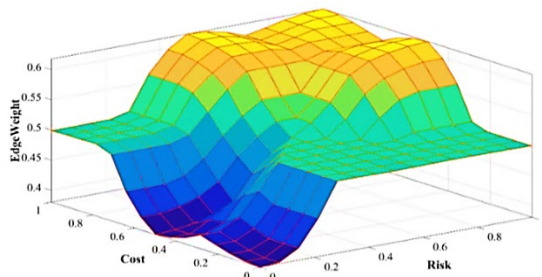


شکل ۴. توابع عضویت برای متغیر خروجی (وزن یال‌ها) [۳].
قواعد استنتاج فازی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است شامل گزاره‌های شرطی مانند موارد زیر است:

If (Threat is Low) and (Cost is Low) and (Risk is Low) and (Distance is Low) and (Angular_Changes is Low) then (EdgeWeight is Low) (1)
If (Threat is Low) and (Cost is Low) and (Risk is Low) and (Distance is Low) and (Angular_Change is Low) then (EdgeWeight is High) (0)

در این گزاره‌ها عدد داخل پرانتز نشان‌دهنده وزن قانون موردنظر است. باتوجه به پارامترهای مورد استفاده در فرآیند ارزیابی تهدید و توابع عضویتی که برای هر کدام از این پارامترهای ورودی تعریف شده است، در موتور استنتاج فازی از ۷۲۹ قانون استفاده شده است. برخی از این قوانین دارای وزن صفر هستند؛ این قوانین در شرایط واقعی امکان‌پذیر نیستند. در شکل (۵) سطح تغییرات مقادیر خروجی سیستم استنتاج فازی (وزن یال‌ها) نسبت به تغییرات دو پارامترهای ورودی (تهدید، هزینه) باتوجه به قوانین فازی طراحی شده در موتور استنتاج فازی به صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است. باتوجه به تعداد ۵ ورودی و یک خروجی سیستم تعداد ۱۰ سطح سه‌بعدی برای میزان تغییرات وزن یال‌ها (خروجی سیستم فازی) نسبت به ۲ ورودی سیستم وجود دارد. این مقدار برابر با ترکیب ۲ از ۵ بوده به صورت معادله (۱۵) محاسبه می‌گردد:

$$C(5,2) = \frac{5!}{(5-2)! \cdot 2!} = 10 \quad (15)$$



شکل ۵. سطح تغییرات مقادیر خروجی سیستم استنتاج فازی (وزن یال‌ها) نسبت به تغییرات دو پارامتر ورودی تهدید و هزینه.

باتوجه به معادله (۱۲) وزن هر یال در گراف مسیریابی ریز پرنده به صورت بردار $(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5)$ است که f_1, f_2, f_3, f_4 و f_5 به ترتیب عبارتند از: تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن، مجموع هزینه‌های استفاده از ریز پرنده، مجموع ریسک تخصیص ریز پرنده، کم‌ترین مسافت پیموده شده تا هدف و میزان زاویه چرخش ریز پرنده برای حمله به هدف. در این توابع هدف، متغیر تصمیم بوده که مقادیر مختلف $f_i, i=1,2,3,4,5$ و خروجی نهائی مسئله تخصیص ریز پرنده را تعیین می‌کند. در شرایط واقعی مقادیر $\gamma_1^s, \dots, \gamma_l^s$ و تابع F به وسیله تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌گردد.

در این مقاله فرض می‌شود که $L=5$ ، S برابر با تعداد گره‌ها در گراف مسیریابی ریز پرنده است و به منظور الحاق توابع هدف وزن‌های آنها در تابع کارائی یکسان ($\gamma=1$) در نظر گرفته می‌شود. معادله (۱۳) به این معنی است که در مدل ارائه شده، تخصیص هر یک از ریزپرنده‌های موجود به یک ریزپرنده‌ی مهاجم در هر مرحله از درگیری‌ها الزامی نیست. به عبارتی یک ریز پرنده می‌تواند در برخی از گره‌ها هیچ اقدامی انجام ندهد و از تسلیحات خود استفاده ننماید و معادله (۱۴) نشان می‌دهد که در طی مراحل درگیری با تهدیدات، تخصیص کسری ریزپرنده‌ها به اهداف مهاجم امکان‌پذیر نیست.

۴-۲. تعیین وزن یال‌ها در گراف مسیریابی با استفاده از سیستم استنتاج فازی

تعیین وزن یال‌ها و مدل‌سازی گراف مسیریابی ریز پرنده به صورت بهینه وابستگی بسیار زیادی به شرایط محیطی و قابلیت‌های ریز پرنده‌ای که باید گراف/یال را پیمایش نماید دارد. به عبارتی وزن یال‌ها قطعی نبوده و دارای مقادیر فازی می‌باشند. از این رو به‌کارگیری سیستم‌های فازی به دلیل این‌که از خبرگی، شرایط محیطی و قابلیت‌های مجری در قالب توابع عضویت استفاده می‌کنند، رویکرد مناسبی برای تعیین وزن یال‌ها است [۲۲].

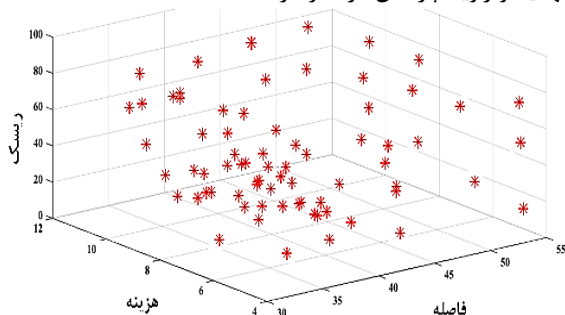
در سیستم فازی استفاده شده در این مقاله برای هر پارامتر ورودی سه تابع عضویت تعریف شده است. این توابع عضویت هر نقطه را در فضای ورودی به یک مقدار عضویت در بازه $[0,1]$ نگاشت می‌کنند. این توابع عضویت بر اساس دانش افراد خبره این حوزه طراحی شده است. معماری سیستم استنتاج ممدانی^۱ طراحی شده برای تعیین خروجی (وزن یال‌ها) در شکل (۴) نمایش داده شده است.

^۱ Mamdani Fuzzy Inference System

در شکل (۶)، فرض شده است که تعداد گره‌های هدف ۹ گره است. میزان برازش^۲ راه‌حل پیشنهادی توسط هر کروموزوم به‌وسیله جمع وزن‌دار مقادیر توابع هدف (معیارهای تصمیم) که قبلاً نرمالیزه شده‌اند محاسبه می‌گردد. در شکل (۶) تعداد مراحل درگیری برابر با تعداد گره‌های موجود در گراف مسئله است؛ به‌عبارتی $S=9$ است.

• مسیریابی بهینه‌ی ریز پرنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب

در اینجا هر راه‌حل پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب دارای پنج مقدار برازش است. این امر باعث می‌شود که به‌جای یک نقطه بهینه‌ی واحد مجموعه‌ای از نقاط بهینه در قالب جبهه پارتو تولید گردند. در جبهه پرتو هر نقطه بیان‌کننده یک مسیر بهینه است. این مسیر دارای یک بردار وزن بهینه با پنج درایه است که هر درایه مجموع تمامی مقادیر مرتبط با آن در یال‌های تعیین‌کننده مسیر است. در شکل (۷) مثالی از جبهه بهینه‌ی پارتو خروجی الگوریتم‌های NSGA-II زمانی که معیارهای ریسک، هزینه و فاصله به‌عنوان وزن یال‌های گراف مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرند، ترسیم شده است. از آنجاکه در صفحه بیش از سه بعد قابل نمایش ناست، در این شکل به‌منظور فراهم‌شدن قابلیت نمایش جبهه پارتو دو معیار تهدید و زاویه چرخش در نظر گرفته نشده‌اند.



شکل ۷. جبهه بهینه‌ی پارتو خروجی الگوریتم‌های NSGA-II با استفاده از معیارهای ریسک، هزینه و فاصله به‌عنوان وزن یال‌ها. در این شرایط و بعد از ترسیم جبهه پارتو به‌وسیله الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب، مدیران بهترین گزینه‌ها را انتخاب نموده (باتوجه به معیارهای کارائی) و در مورد چگونگی انتخاب مسیر تصمیم‌گیری می‌کنند. در این مقاله الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب با کدینگ عدد صحیح، برش تک‌نقطه‌ای^۳ جهش رشته‌بیتی^۴ برای حل مسئله تخصیص منابع استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه کارا است که پیچیدگی

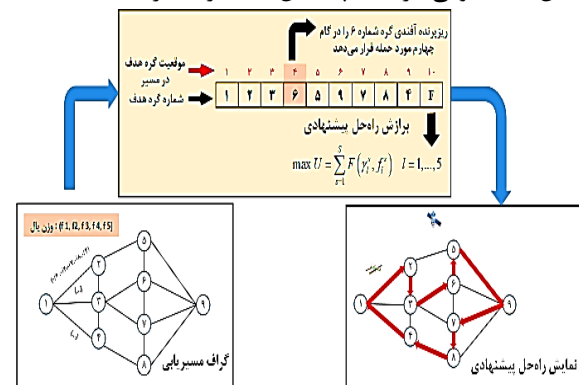
پس از ترسیم گراف وزن‌دار مسیریابی ریز پرنده، یافتن بهترین روش اجرای دستور یا تعیین درخت پوشای کمینه یا تور همیلتونی در طی فرآیند حل مدل تعیین می‌گردد. در ادامه روش یافتن درخت پوشای کمینه با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲. مسیریابی ریز پرنده با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی

در اینجا مسئله‌ی موردنظر، از ریز پرنده (مجموعه‌ای از ریز پرنده‌ها) و مجموعه‌ای از شهرها (مکان‌ها) تشکیل شده است. این ریز پرنده اجازه دارد از هر شهر تنها یک‌بار عبور کند. فاصله میان شهرها یا هزینه عبور از شهرها داده شده است و هدف پیداکردن درخت پوشای کمینه^۱ است. چنین راه‌حلی، عملی (انجام‌پذیر) است اگر بتواند مجموعه محدودیت‌های موجود را ارضاء نماید. در این مقاله به‌منظور ساده‌سازی، فرض می‌شود که تخصیص کسری ریز پرنده امکان‌پذیر نیست و هر ریز پرنده در هر مرحله از رویارویی می‌تواند حداکثر به یک هدف دشمن تخصیص داده شود (یک یال را انتخاب کند) درحالی‌که از سایر محدودیت‌های مسئله چشم‌پوشی شده است.

• مسیریابی بهینه‌ی ریز پرنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در این مقاله، برای تعیین درخت پوشای کمینه از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود که طول هر کروموزوم (d) برابر با تعداد گره‌های هدف در مسیر است و عدد داخل هر ژن بیانگر شماره یا برچسب گره هدفی است که در مرحله‌ای از درگیری معادل با شماره آن ژن در کروموزوم توسط ریز پرنده آفندی مورد حمله قرار می‌گیرد. شکل (۶) یک کروموزوم را نشان می‌دهد که هر یک از اعداد درون ژن‌های آن نشان‌دهنده یک گره در مسیر است. ترتیب ژن‌ها نشان‌دهنده توالی گره‌های پیمایش شده در مسیر است.



شکل ۶. یک کروموزوم که نشان دهنده‌ی یک مسیر قابل پیمایش توسط ریز پرنده است.

^۲ Fitness Function

^۳ Single-Point Crossover

^۴ Bit String Mutation

^۱ Minimum Spanning Tree (MST)

تمرکز این مقاله بر روی مقایسهٔ پیاده‌سازی‌های مختلف از روش‌های مسیریابی نیست و جنبه‌های مبنایی‌تر مانند مدل‌سازی گراف مسئله و مسیریابی ریز پرنده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب به‌عنوان کاربردی از الگوریتم‌های همه‌زمانه برای انجام فرآیند مسیریابی بهینه استفاده شد. همچنین دو حالت از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی مسیریابی ریز پرنده‌ها استفاده گردید؛ زمانی که وزن یال‌ها با استفاده از جمع وزن‌دار معیارهای تصمیم به یک واحد تبدیل گردید و زمانی که از سیستم استنتاج فازی برای تعیین وزن یال‌ها استفاده شد. پیاده‌سازی گراف مسیریابی با وزن‌های فازی از یک سیستم استنتاج فازی مددانی با پنج ورودی برای تعیین وزن یال‌ها استفاده شده است.

جدول ۲. پارامترهای تعیین گراف مسیریابی مساله

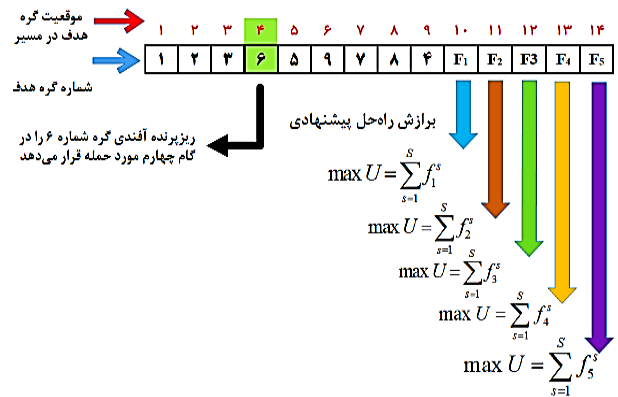
مقیاس	بازه تغییرات	پارامترهای ورودی
کیلومتر	[۱۰، ۵۰]	فاصلهٔ میان‌گره‌ها (طول یال‌ها)
درجه	[۰، ۶۰]	زاویهٔ مجاز و چرخش به چپ و راست
-	[۰، ۱]	ارزش ریز پرنده
-	[۰، ۱]	قدرت کشندگی گرهٔ هدف

جدول ۳. متوسط زمان اجرا الگوریتم‌های GA، NSGA-II و GA+Fuzzy

سناریو #	پارامترهای سناریو			متوسط زمان اجرا (ثانیه)	
	گره #	یال #	NSGA-II	GA	GA+Fuzzy
1.	10	45	45.6	41.0	41.5
2.	15	105	50.3	45.3	46.8
3.	20	190	121.8	109.6	112.8
4.	25	300	180.9	162.9	164.6
5.	30	435	210.7	189.6	191.7
6.	35	595	340.2	305.2	309.6
7.	40	780	557.60	501.8	507.4
8.	45	990	899.98	811.0	819.0
9.	50	1225	1055.01	948.5	962.1
10.	55	1485	1289.79	1160.8	1173.7
11.	60	1770	1400.36	1261.3	1274.3

نتایج اجرای سناریوهای مختلف با استفاده از مقادیر متفاوت پارامترهای تعیین‌کنندهٔ گراف مسئله که شامل تعداد گره‌ها و یال‌های متصل‌کنندهٔ آنها است در جدول (۳) نشان داده شده است. این نتایج نشان‌دهندهٔ مقادیر متوسط^۱ زمان اجرا الگوریتم‌ها در ۱۰۰ اجرای مستقل است. در این سناریو فرض شده است که گراف مسئله کامل است. برای اجرای کدهای MATLAB و محاسبهٔ زمان واقعی محاسبات از یک رایانه با مشخصه‌های پردازندهٔ هفت هسته‌ای ۴ گیگاهرتز، ۱۶ گیگابایت رم و دارای سیستم‌عامل ویندوز ۱۰ استفاده شد. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، الگوریتم GA در فرآیند مسیریابی دارای

محاسباتی آنها $O(M.N^2)$ است که M تعداد توابع هدف و N اندازه‌ی جمعیت است [۲۵].



شکل ۸. یک کروموزوم از جمعیت الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب.

• مسیریابی بهینه‌ی ریز پرنده با استفاده از وزن‌های فازی

در این حالت درحالی‌که سیستم استنتاج فازی برای تعیین وزن یال‌های گراف مسیریابی استفاده می‌شود، مجموع مقادیر تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن، هزینهٔ استفاده از ریز پرنده‌ها، ریسک تخصیص ریز پرنده‌ها، کوتاه‌ترین فاصله تا گرهٔ هدف و کمینه‌سازی زاویهٔ چرخش ریز پرنده به‌عنوان پارامترهای ورودی سیستم فازی برای وزن‌دهی یال‌ها مورد استفاده قرار خواهند گرفت و خروجی سیستم استنتاج فازی مددانی به‌عنوان وزن یال‌ها استفاده می‌گردد. در این شرایط نیز مانند شکل‌های (۶) و (۷)، یک کروموزوم نشان‌دهندهٔ یک راه‌حل مسئله و هر یک از ژن‌های آن نشان‌دهندهٔ یک گره در مسیر است. با این تفاوت که در این حالت تابع برازش هر راه‌حل مسئله به‌صورت معادلهٔ (۱۶) محاسبه می‌گردد.

$$\max U = \sum_{s=1}^S EdgeWeight^s \quad (16)$$

در معادلهٔ فوق $EdgeWeight^s$ وزن یال پیموده شده در مرحلهٔ s است که خروجی سیستم استنتاج فازی است.

۳. نتایج و بحث

در این بخش، به‌منظور آزمایش مدل ارائه شده، سناریویی در نظر گرفته شده است که در آن مجموعه‌ای از ریز پرنده‌ها قصد دارند در طی سلسله مأموریت‌هایی در مجموعه‌ای از شهرها (مکان‌ها) عملیات آفندی انجام دهند. پارامترهای مورد استفاده در تعیین وزن یال‌های گراف مسیریابی مسئله در جدول (۲) و پارامترهای تعیین‌کنندهٔ گراف مسئله شامل تعداد گره‌ها و یال‌ها در جدول (۳) نمایش داده شده است.

¹ Mean

جبهه پارتو ایجاد می‌کند. با افزایش تعداد معیارهای تصمیم در مدل، ریز پرنده باید تصمیم نهائی را از میان گزینه‌های بیشتری (ناحیه امکان‌پذیر) انتخاب کند. این مسئله شرایط تصمیم‌گیری را پیچیده‌تر می‌کند. در چنین شرایطی اگر سیستم کاملاً خودمختار نباشد فرماندهان بهترین گزینه‌ها را انتخاب کرده (باتوجه به معیارهایی که در ذهن دارند) و در مورد چگونگی تخصیص سلاح‌ها تصمیم‌گیری می‌کنند. از این رو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب در روش حل مدل و یافتن جواب بهینه، استفاده از خبرگی فرماندهان را به آخرین مرحله ماکول می‌کند. در صورت خودمختاری کامل ریز پرنده در گام نهایی می‌توان با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری مانند Topsis و OWA برای تلفیق نتایج استفاده نمود.

۴. نتیجه‌گیری

پیش‌نیاز مسیریابی بهینه، مدل‌سازی دقیق صحنه‌ی نبرد است. در این مقاله تلاش شد یک رویکرد واقع‌گرایانه برای مدل‌سازی مسئله‌ی مسیریابی آفندی ریز پرنده‌ها ارائه شود؛ بنابراین، در این مدل وزن یال‌ها با استفاده از یک سیستم استنتاج فازی ممدانی پنج معیار تعیین گردید. کمینه‌سازی تهدید ایجاد شده توسط اهداف دشمن، کمینه‌سازی هزینه‌های تسلیحاتی و کمینه‌سازی ریسک تخصیص ریز پرنده، کمینه‌سازی فاصله مکانی/زمانی تا گره هدف و کمینه‌سازی زاویه چرخش ریز پرنده برای حمله به هدف در هر مرحله از رویارویی‌ها به‌عنوان معیارهای تعیین وزن یال‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد پاسخ‌های تولید شده توسط NSGA-II در مقایسه با GA دارای تنوع بهتری است، در حالی که GA سریع‌تر است. ما معتقد هستیم که استفاده از سیستم استنتاج فازی و ترکیب آن با GA برای کاربردهای عملی این حوزه مناسب است. قطعاً در مواردی که با محدودیت‌های شدید زمانی روبه‌رو می‌باشیم، GA می‌تواند انتخاب ارجح باشد. در صورتی که NSGA-II برای آموزش سیستم‌های خودمختار و یا تعیین راه‌حل‌هایی که به‌عنوان معیار مقایسه روش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند مؤثر باشد. از جمله مهم‌ترین مسائلی که می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد مکانیزم همکاری و هماهنگی ریز پرنده‌ها در صحنه‌ی عملیات و چگونگی حفظ ارتباطات میان واحدهای نیرو در شرایط مختلف عملیاتی است.

۵. مراجع‌ها

- [1] Feifei, Z.; Yi, Z.; Bing, H.; Hongjian, F.; Zhuoya, Z. "Nature-inspired Self-organizing Collision Avoidance for Drone Swarm Based on Reward-modulated Spiking Neural Network"; *Patterns* 2022, 3, 100611.

متوسط زمان اجرای بهتری نسبت به الگوریتم NSGA-II و GA+Fuzzy است و متوسط زمان اجرای GA+Fuzzy بهتر از NSGA-II است. به عبارتی NSGA-II دارای طولانی‌ترین متوسط زمان اجرا است. ولی راه‌حل‌های ارائه شده توسط NSGA-II به دلیل راهبرد حفظ تنوع قوی‌تر، از تنوع بهتری نسبت به GA برخوردار هستند [۳].

سیستم استنتاج فازی از خبرگی برای بهبود میزان کارایی سیستم استفاده می‌کند، از این خبرگی برای تعیین قواعد و توابع عضویت استفاده می‌شود. در سیستم استنتاج فازی خط استدلال سیستم می‌تواند به کاربران ارائه شود، این ویژگی باعث افزایش اعتماد کاربر به سیستم می‌شود. علاوه بر این استفاده از منطق فازی باعث می‌گردد با وجود تغییرات در ورودی، تغییرات نرم‌تری در خروجی تغییرات نرم‌تری روی دهد. سیستم فازی در گام اولیه، استفاده از خبرگی جهت تعیین وزن یال‌ها را فراهم می‌کند و در گام‌های بعدی، محاسبات ریاضی را کمتر می‌نماید که در نهایت منجر به افزایش سرعت و کاهش پیچیدگی سیستم می‌گردد. استفاده از سیستم فازی باعث می‌شود معیارهای ناملموسی مانند شرایط سیاسی که در ذهن فرماندهان و مدیران ارشد قرار دارد را به سیستم اعمال نمود. این معیارها اغلب قابل‌ارائه به‌صورت معادلات ریاضی نیستند و استفاده از سیستم فازی امکان اعمال آنها را در سیستم فراهم می‌کند. این رویکرد مزایای استفاده از الگوریتم ژنتیک (با ترکیب معیارهای تصمیم به‌صورت جمع وزن‌دار) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب را در خود خواهد داشت. زمانی که از سیستم استنتاج فازی برای تعیین وزن یال‌ها در گراف مسیریابی مسئله استفاده می‌گردد از آنجاکه وزن یال‌ها یک مقدار واحد است، روش حل مسئله یک جواب (به‌جای مجموعه‌ای از جواب‌ها در قالب جبهه پارتو) واحد در خروجی پیشنهاد می‌نماید. یکی از معایب استفاده از منطق فازی در چنین شرایطی کمبود دانش و عدم تسلط فرماندهان بر مفاهیم فازی است.

هنگام استفاده از الگوریتم ژنتیک و ترکیب معیارهای تصمیم به‌صورت جمع وزن‌دار، علاوه بر امکان اعمال خبرگی فرماندهان در مدل‌سازی معیارهای تصمیم استفاده از این خبرگی در هنگام تعیین وزن معیارهای تصمیم نیز فراهم می‌گردد. این روش با وجود سادگی موجب می‌شود کم‌ترین کنترل بر جواب‌های تولید شده وجود داشته باشد و روش حل مدل، بیشترین حالت جعبه سیاه و کم‌ترین انعطاف و فرمان‌پذیری از خبره انسانی را دارا باشد که باتوجه به حساسیت حوزه می‌تواند خطرآفرین باشد. هنگام استفاده الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب، روش حل به‌جای یک پاسخ واحد مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه را در قالب

- [18] Menon, P.; Kim, E. "Optimal Trajectory Synthesis for Terrain-Following Flight"; *J. Guid. Control. Dyn.* 1991, 14, 807-813.
- [19] Twigg, S.; Calise, A.; Johnson, E. "Online Trajectory Optimization for Autonomous Air Vehicles"; *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. and Exhibit*, Austin, Texas, 2003.
- [20] Twigg, S.; Calise, A.; Johnson, E. "3D Trajectory Optimization for Terrain Following and Terrain Masking"; *AIAA, Guidance, Navigation, and Control Conf. and Exhibit*, Keystone, Colorado, 2006.
- [21] Alejandro, P.; Daniel, R.; Eurico, P.; Artur, P.; Nuno, L.; Enrique, F. "Q-Learning Based System for Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles Swarms in Obstacle Environments"; *Expert Syst. Appl.* 2024, 235, 121240.
- [22] Kreinovich, V.; Nguyen, H. "Which Fuzzy Logic is the Best: Pragmatic Approach (and its Theoretical Analysis)"; *Fuzzy Sets. Syst.* 2006, 157, 611-614.
- [23] Tsourdos, A.; White, B.; Shanmugavel, M. "Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles"; *John Wiley & Sons, Ltd, Publications*, 2011.
- [24] Ghanbari, A. A.; Alaei, H. "Meta-Heuristic Algorithms for Resource Management in Crisis Based on OWA Approach"; *Appl. Intell.* 2021, 51, 646-657.
- [25] Curry, D.; Dagli, C. "Computational Complexity Measures for Many-objective Optimization Problems"; *Procedia Comput. Sci.* 2014, 36, 185-191.
- [26] Dogan, A.; Zengin, U. "Unmanned Aerial Vehicle Dynamic-target Pursuit by Using Probabilistic Threat Exposure Map"; *J. Guid. Control. Dyn.* 2006, 29, 944-954.
- [2] Zhen, Y.; Junli, L.; Liwei, Y.; Qian, W.; Ping, L.; Guofeng, Xia. "Path Planning and Collision Avoidance Methods for Distributed Multi-Robot Systems in Complex Dynamic Environments"; *Math. Biosci. Eng.* 2023, 20, 145-178.
- [3] Ghanbari, A. A.; Sadatinejad, S. A.; Mohammadnia, M.; Alaei, H. "Dynamic Battle Management Using Meta-Heuristic Algorithms, Fuzzy Inference Systems and the Decision Tree"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2022, 13, 1-11 (In Persian). DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1401.13.1.7.0>
- [4] Chen, Y.; Dong, Q.; Shang, X.; Wu, Z.; Wang, J. "Multi-UAV Autonomous Path Planning in Reconnaissance Missions Considering Incomplete Information: A Reinforcement Learning Method"; *Drones* 2022, 7, 10. <https://doi.org/10.3390/drones7010010>.
- [5] He, W.; Qi, X.; Liu, L. "A Novel Hybrid Particle Swarm Optimization for Multi-UAV Cooperate Path Planning"; *Appl. Intell.* 2021, 51, 7350-7364.
- [6] Fadi, A.; Hadi, Z.; Ibrhaim A.; Reda, D. "Optimized Unmanned Aerial Vehicles Deployment for Static and Mobile Targets' Monitoring"; *Comput. Commun.* 2020, 149, 27-35.
- [7] Manne, A. S. "A Target-Assignment Problem"; *Oper. Res.* 1958, 6, 346-351.
- [8] Ejaz, W.; Sharma, S. K.; Saadat, S.; Naeem, M.; Chughtai, N. A. "A Comprehensive Survey on Resource Allocation for CRAN in 5G and Beyond Networks"; *J. Netw. Comput. Appl.* 2020, 16, 102638.
- [9] Ghanbari, A. A.; Alaei, H.; Mohammadnia, M. "A Multi-Stage Modelling Approche for Allocation of Defense Resources to Invading Targets"; *Adv. Defence Sci. & Technol.* 2020, 2, 167-173 (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1399.11.2.5.6Gha>
- [10] Asif, A.; Awais K.; Rashid, A.; Haque, N. "Unmanned Aerial Vehicles: A Review"; *Cognitive Robotics.* 2023, 3, 8-22.
- [11] Aggarwal, S.; Kumar, N. "Path Planning Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: A Review, Solutions, and Challenges"; *Comput. Commun.* 2020, 149, 270-299.
- [12] Sudhir, K.; Raj, S.; Saikat, B.; Hutanshu, K. "Comparative Review Study of Military and Civilian Unmanned Aerial Vehicles (uavs)"; *Incas. Bull.* 2019, 11, 183-198.
- [13] Haque, N.; Husnain, M.; Shafiq, M. "Applications of Unmanned Aerial Vehicles: A Review"; *3C Tecnol.* 2019, 3, 85-105, <https://doi.org/10.17993/3ctecno>. 2019.
- [14] Goerzen, C.; Kong, Z.; Mettler, B. "A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance"; *J. Intell. Robot. Syst.* 2010, 57, 65-100.
- [15] Zhenyu, N.; Jun, W.; Chungang, L.; Mingxiang, G.; Zihe, G. "Join Trajectory Optimization and Communication Design for UAV-Enabled OFDM Networks"; *Ad. Hoc. Netw.* 2020, 98, 102031.
- [16] Yan, S.; Dongfang, X.; Derrick, N.; Linglong, D.; Robert, S. "Optimal 3D-trajectory Design and Resource Allocation for Solar-powered UAV Communication Systems"; *IEEE Trans. Commun.* 2019, 67, 4281-4298.
- [17] Menon, P.; Kim, E. "Optimal Helicopter Trajectory Planning for Terrain Following Flight"; *M.Sc. Thesis, School of Aerospace Eng., Georgia Inst. of Technology*, 1990.