نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و دوم، شماره دوم، پاییز ۹۹

اختصاص وظایف و طراحی مسیر یکپارچه با وجود اهداف متحرک به روش برنامه‌ریزی خطی ابتکاری و منحنی‌های دابینز

علی نگهبان[۱]، محسن دهقانی محمدآبادی*[۲]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳)

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی اجرای مأموریت و کنترل عامل‌ها، توجهات را به اجرای مأموریت‌های مشارکتی معطوف کرده است. در زمینه‌ی اجرای یک مأموریت مشارکتی ناوگان پرنده‌ها، الگوریتم تصمیم‌گیرنده برای اختصاص وظایف و طراحی مسیر، دو قسمت اصلی در طراحی چنین مأموریتی است. در این مقاله، با ترکیب این دو قسمت به حل مسئله تخصیص وظایف و مسیریابی به صورت یکپارچه پرداخته شده‌است. با الهام از الگوریتم برنامه‌ریزی خطی صحیح، به سبب بهینگی سراسری پاسخ آن، در این پژوهش به توسعه‌ی یک روش تکاملی و سلسله مراتبی بر اساس الگوریتم یاد شده و با قابلیت حل سریع‌تر مسائل مشارکت عامل‌ها با وجود اهداف متحرک پرداخته شده است. در کنار آن از یک الگوریتم منحنی‌های دابینز با قابلیت اعمال مشخصات عملکردی و محدودیت‌های حرکتی و دینامیکی جنگنده‌های بال ثابت در زمان کوتاه و بار محاسباتی پایین استفاده شده است. ضرایب و فواصل حاصل از الگوریتم منحنی‌های دابینز به جهت استفاده در الگوریتم اختصاص وظایف توسعه داده شده به‌روز رسانی و استفاده می‌شود. با توجه به اینکه استفاده از اهداف متحرک در پلتفرم‌های اختصاص وظایف پیشین مورد بررسی قرار گرفته نشده است، مهمترین نوآوری این مقاله پرداختن به چنین مسأله‌ای و توسعه‌ی یک الگوریتم تکاملی و سلسه‌مراتبی می‌باشد. نتایج ارائه شده، مبین عملکرد مناسب و بهینه و سرعت بالاتر رویکرد ارائه شده، نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ***اختصاص وظایف، برنامه‌ریزی خطی صحیح، اهداف متحرک، مسیریابی، منحنی‌های دابینز***

Integrated Task Assignment and Path Planning with Moving Targets Based on an Innovative Linear Programming Approach and Dubins Curves

Ali Negahban and Mohsen Dehghani Mohammad-abadi

Abstract

Recent developments in mission implementation and agent control have drawn attention to the performing of cooperative missions. Decision-making systems are among the most important parts of such missions. The aim of these systems is efficient task assignment and path planning. This paper combines a task assignment approach and a path planning method to tackle collaborative problems. The task assignment approach, used in this paper, is based on an improved linear programming approach for its high accuracy. The path planning method is based on Dubins curve to handle the limitation movements of fixed-wing fighters, investigated in this paper. The proposed methods perform based on the utilized fighter's performance characteristics and flight constraints in a dynamic environment with moving targets. The path planning approach is based on specific constraints, including certain output vectors of each point as well as input ones to the target points, minimum rotational angle, and performance factors of fighters. In the next step, Dubins path planning output is used as the necessary coefficient to solve the task assignment problem of cooperative fighters. By using a heuristic hierarchical approach based on linear programming, a comprehensive path planning and task assignment of a fleet of fighters is completed. The presented results show optimal performance and higher speed to solve rather than the classical approaches, which is capable to cover the dynamic environment as well.

Key words: *Task assignment, Mixed-Integer Linear Programming, Moving targets, Path planning, Dubins curve*

*نویسنده پاسخگو: محسن دهقانی محمدآبادی، پست الکترونیک: m.dehghani@ssau.ac.ir

مقدمه

به‌طور کلی، مسائل تصمیم‌گیری ناوگان مشارکتی، به دو دسته‌ی به هنگام[1] و با تاخیر[2] تقسیم‌بندی می‌شوند. در شیوهٔ به‌هنگام، دسترسی آنی به اطلاعات لازم و حیاتی، نیاز است؛ درحالی‌که در روش‌های با تأخیر، سعی بر جمع‌آوری اطلاعات جامع و دستیابی به پاسخ‌های بهینه‌تر، است. از دیدگاه بررسی مسائل مشارکت ناوگان عامل‌ها، دو حیطه‌ی کنترل تک عامل و کنترل جمعی مطرح می‌گردد. در زمینه‌ی کنترل جمعی، هستهٔ تصمیم‌گیرنده اختصاص وظایف و طراح مسیر به‌عنوان مهم‌ترین اجزای این حلقه، در تعامل با یکدیگرند. بدلیل تحقیقات صورت گرفته‌ی مجزا در دو حیطهٔ اختصاص وظایف و طراحی مسیر، سیر پیشرفت آن‌ها به‌صورت مجزا بررسی می‌گردد.

پس از پیشرفت‌های شگرف در زمینه‌ی ساخت هواپیماها و به‌خصوص جنگنده‌ها، برای بهبود عملکرد جامع سیستم و افزایش ضریب اطمینان جهت پیاده‌سازی مأموریت‌های پیچیده، توجهات به اجرای مأموریت‌های مشارکتی توسط یک ناوگان و چگونگی آرایش اجرای مأموریت توسط آن‌ها، جلب گردید. در زمینهٔ جنگنده‌های هم‌کار، مکانیزم‌های تصمیم‌گیری و کنترل، شامل اختصاص وظایف، مسیریابی و تصمیم‌گیری تیم‌های هم‌کار، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. وظیفهٔ نهایی سیستم اختصاص وظایف به تیمی از جنگنده‌های هم‌کار، در اصل محول نمودن وظایف ضروری در ترتیب بهینه‌ی خود می‌باشد. مسائل تصمیم‌گیری هم‌چون اختصاص وظایف در حوزه‌ی مسائل ان‌پی-سخت[3] محسوب می‌گردند. به‌صورت جامع، حل مسأله با ماهیت اختصاص وظایف در یکی از حوزه‌های کلاسیک، ابتکاری و یا کلاسیک ابتکاری بررسی می‌گردند. در روش‌های کلاسیک با مدد از رویکردهای دقیق با پاسخ بهینه‌ی سرتاسری هم‌چون روش‌های شاخه و حد، پاسخ‌ها تعیین می‌گردند [۱-۸]. روش‌های ابتکاری با الهام از پدیده‌های مختلف، هم‌چون پدیدهٔ تبرید و حراج و یا رویکردهای نشأت گرفته از پدیده‌های زیستی مانند الگوریتم‌های ژنتیک و کلونی مورچگان و یا ترکیب این روش‌ها به حل مسأله پرداخته می‌شود [۹-۱۸]. با توجه به دقت روش‌های کلاسیک، محققان در حوزه‌ی رویکردهای کلاسیک ابتکاری به‌دنبال ایجاد روش‌های با سرعت بالاتر و دقت مناسب برپایهٔ روش‌های کلاسیک برآمده‌اند [۱۹-۲۲]. پژوهش‌های زیادی در سه حوزه‌ی ذکر شده صورت پذیرفته که بخشی از موارد مهم آن، بشرح زیر است:

شوماخر[4] و هم‌کاران، به حل یک مسألهٔ حمله به اهداف زمینی توسط تیم هم‌کار از پهپادها، با روش برنامه‌ریزی خطی صحیح پراخته‌اند [۴]. بلینگهام[5] و هم‌کاران، در صدد کاهش بار محاسباتی روش برنامه‌ریزی خطی با جداسازی مسألهٔ اختصاص وظایف از مسیریابی برآمد [۶]. علی‌قنبری و هم‌کاران، به معرفی الگوریتم مسیریابی گلبرگ[6] [۷] پرداخت و با معرفی و استفاده از روش افق پیشین[7] در مسائل اختصاص وظایف، سعی در کاهش زمان حل مسائل اختصاص وظایف کلاسیک نمود. [۸].

بدلیل بار محاسباتی بالای روش‌های کلاسیک، الگوریتم‌های ابتکاری مورد توجه قرار گرفت. ژیا[8] و هم‌کاران، برای حل مسأله‌ی اختصاص وظایف استاتیک، از یک رویکرد برپایهٔ الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند [۱۶]. الگوریتم‌های تصادفی، رویکرد دیگری برای حل مسائل اختصاص وظایف در این حیطه بوده است [۱۱]. حل مسائل اختصاص وظایف با رویکردهای غیرمتمرکز که براساس استراتژی حراج می‌باشند نیز مورد استفادهٔ محققان قرار گرفته است [۲۳]. در گام بعد، محققان با ترکیب روش‌های ابتکاری، سعی بر دست‌یابی به پاسخ‌های بهینه‌تر و در زمان مناسب‌تری داشته‌اند. از این دسته می‌توان به ترکیب رویکرد فازی و ازدحام ذرات [۱۵]، الگوریتم دو قسمتی MTWPS[9] [۲۴]، ترکیب الگوریتم‌های حراج و ازدحام ذرات [۱۳]، رویکرد ترکیبی شامل ازدحام ذرات و شبیه‌سازی تبرید [۱۸] اشاره نمود.

جهت پوشش نقص الگوریتم‌های کلاسیک و ابتکاری، که بار محاسباتی و بهینگی حل آن‌ها است، محققان زیادی تلاش خود را در زمینه‌ی بهبود الگوریتم‌های کلاسیک جهت حل سریع‌تر مسأله، بکار برده‌اند و در زمینه‌ی رویکردهای کلاسیک ابتکاری تحقیقات خود را صورت داده‌اند. لیو[10] و هم‌کاران، برای حل مسأله‌ی طراحی مسیر از یک رویکرد سلسله‌مراتبی بر پایه‌ی برنامه‌ریزی دوسطحی[11]، استفاده نمودند [۲۱]. تعدادی

[1] On-line
[2] Off-line
[3] NP-hard
[4] Schumacher
[5] John Saunders Bellingham
[6] Petal
[7] Receding Horizon
[8] Jia
[9] two-part wolf pack search algorithm
[10] Liu
[11] Bi-Level programming

از محققان با رویکرد تقسیم مسألهٔ اختصاص وظایف توسط الگوریتم‌های بهبود یافته‌ی کلاسیک، سعی در کاهش بار محاسباتی این رویکردها داشته‌اند [۱۹, ۲۰]. تعدادی از محققان در راستای تطابق مسأله با شرایط محیط دینامیکی، سعی در حل مسأله‌ی ردیابی هدف پس از اختصاص عامل مربوطه به هدف مورد نظر، داشته‌اند [۱۴, ۲۵, ۲۶].

طراحی مسیر، در کنار اختصاص وظایف، یکی از ضروریات لازم برای اجرای مأموریت‌های مشارکتی به‌صورت بهینه می‌باشد. به‌طور کلی طراحی مسیر به دو شیوهٔ به‌هنگام و با تأخیر صورت می‌گیرد [۲۷]. در طراحی مسیر به شیوهٔ به‌هنگام که یک طراحی مسیر واقعی است، به دسترسی به‌هنگام اطلاعات محیطی نیاز است. در روش با تأخیر، که به‌دنبال حل مسأله در قالب یک مسألهٔ بهینه‌سازی سرتاسری است، با اطلاعات جامع و بدون نیاز به حل فوری، سعی بر حصول بهترین پاسخ می‌باشد. اما ایراد این روش عدم حصول پاسخ مناسب در زمان کوتاه است و کارایی آن جهت اجرا در مسائل هم‌کاری جنگنده‌ها مناسب نیست.

طراحی مسیر به‌وسیلهٔ روش‌های مختلفی همچون دیکسترا[1] و الگوریتم‌های جست‌وجوی گرافی که به شبکه[2]ها و گراف‌های رؤیت اعمال می‌گردد، حل شده است [۲۸]. از جمله روش‌های دیگر استفاده شده توسط محققان، استفاده از الگوریتم درخت جست‌وجوی تصادفی سریع[3]، الگوریتم طراحی مسیر دو مرحله‌ای با استفاده از دیاگرام‌های ورونی[4] و ای-استار[5] می‌توان نام برد [۲۹, ۳۰]. دابینز[6] نشان داد که یک ربات ماشین مانند، با جهت حرکت اولیهٔ مشخص، می‌تواند به مقصد نهایی خود با موقعیت و جهت ورود مشخص، تنها با سه جزء مسیر که کمان دایره‌های با شعاع کمینه‌ی زاویه چرخش و یا خطوط مستقیم هستند برسد [۳۱]. آقایان ریدز[7] و شپ[8] مسألهٔ مشابهی را تنها با این تفاوت که عامل می‌تواند به جلو یا عقب حرکت کند را بررسی نمودند [۳۲]. یکی از ویژگی‌های الگوریتم‌های یاد شده در بالا و بسیاری از الگوریتم‌های طراحی مسیر، حجم محاسباتی بالای آن‌هاست. بعلاوه، در بسیاری از پژوهش‌های یاد شده تنها به مسأله‌ی طراحی مسیر پرداخته شده است حال آن‌که هدف این مقاله استفاده از آن در یک پلتفرم جامع در کنار الگوریتم اختصاص وظایف می‌باشد. روش منحنی‌های دابینز کارکرد بالا و حجم محاسباتی پایین‌تری را داراست.

در ادامه و در کاربردهای باتأخیر در روش منحنی‌های دابینز، استفاده از روش‌های نقشهٔ راه احتمالی[9]، استفاده و ترکیب روش موجود با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مثل برنامه ریزی خطی صحیح، تکنیک‌های کنترل پیش‌بین مدل، کاربرد کنترل بهینه برپایهٔ حرکات ابتدایی ممکن و استراتژی تعقیب هدف برپایه‌ی لیاپانوف[10] جهت دستیابی به پاسخ مناسب به‌کار برده شد [۳۳-۳۶]. با پیشرفت‌های نوین در زمینه‌ی کنترل پهپادها و جنگنده‌های بال ثابت، طراحی مسیر و پیاده‌سازی محدودیت‌های پرنده‌های بال ثابت مورد توجه محققان قرار رفت [۳۷]. با توجه به حجم بالای محاسبات در روش‌های اختصاص وظایف و طراحی مسیر، اکثر متدهای طراحی مسیر قابلیت اتصال به الگوریتم‌های اختصاص وظایف را ندارند چرا که باعث افزایش قابل توجه زمان اجرای للگوریتم می‌گردد. روش منحنی‌های دابینز مناسب‌ترین روش نسبت به سایر روش‌ها جهت این امر می‌باشد.

در این مقاله با توجه به اهمیت بالای ساختار تصمیم‌گیری جامع در مسائل مشارکت ناوگان جنگنده‌های بال-ثابت، به معرفی یک رویکرد جامع تصمیم‌گیری برپایه‌ی طراحی مسیر به‌روش منحنی‌های دابینز پرداخته می‌شود. قابل ذکر است با توجه به حالت دینامیک بودن اهداف، با تغییر پارامترها و الگوریتم برنامه‌ریزی خطی صحیح، یک رویکرد سلسله مراتبی تکاملی جهت حل غیرخطی بودن مسأله اتخاذ گردد.

با توجه به محدودیت‌های فراوان در حرکت، مصرف سوخت، مشخصه‌های عملکردی جنگنده و همچنین محدودیت‌های موجود در مسألهٔ اختصاص وظایف با در نظر گرفتن اهداف متحرک، جهت پوشش بهینه و به‌هنگام مسأله، یک رویکرد سلسله‌مراتبی برپایهٔ برنامه‌ریزی خطی صحیح معرفی می‌گردد. این رویکرد، با اجماع مسألهٔ اختصاص وظایف و مسیریابی، در جست‌وجوی حل سریع و بهینهٔ مسأله گام

[1] Dijkstra
[2] Grid
[3] Rapidly-exploring Random Tree (RRT)
[4] Voroni
[5] A^*
[6] Dubins
[7] Reeds
[8] Shepp
[9] Probabilistic Road Map
[10] Lyapunov-based path-following strategy

برداشته است. تمام محدودیت‌های لازم جهت اجرای مأموریت‌های ناوگان هم‌کار و همچنین محدودیت‌های جنگندهٔ بال ثابت مفروض در این مسأله، ارائه و پیاده‌سازی شده است. نتایج ارائه شده، نشان‌دهندهٔ عملکرد مناسب، سریع و بهینهٔ معماری معرفی شده در شرایط رعایت کامل محدودیت‌های تعریف شده می‌باشد. متحرک بودن اهداف و هم‌چنین محدودیت های پروازی پرندهٔ بال ثابت، از جمله موارد مهمی بوده است که تاکنون توجهات کمی را به خود جلب نموده است و تنها به حل مسألهٔ تعقیب یک هدف پرداخته شده است.

سناریوی اجرای مسألهٔ مشارکت ناوگان جنگنده‌های بال-ثابت

با هدف اجرای مأموریت‌های مشارکتی توسط ناوگان جنگنده‌های هم‌کار با فرض اهداف تعیین شده‌ی متحرک، فرض می‌شود که تعداد N_t هدف مفروض با موقعیت شروع مشخص در محدودهٔ عملیات، متحرک و با جابجایی هستند. جهت و سرعت هر هدف بصورت مستقل قابل تعیین است. ناوگان جنگنده‌ها، دارای N_v جنگنده با خصوصیات عملکردی مختص به خود می‌باشند. تمام جنگنده‌های ناوگان، دارای نقطهٔ شروع و پایان و هم‌چنین جهت پرواز و فرود منحصر به فرد هستند.

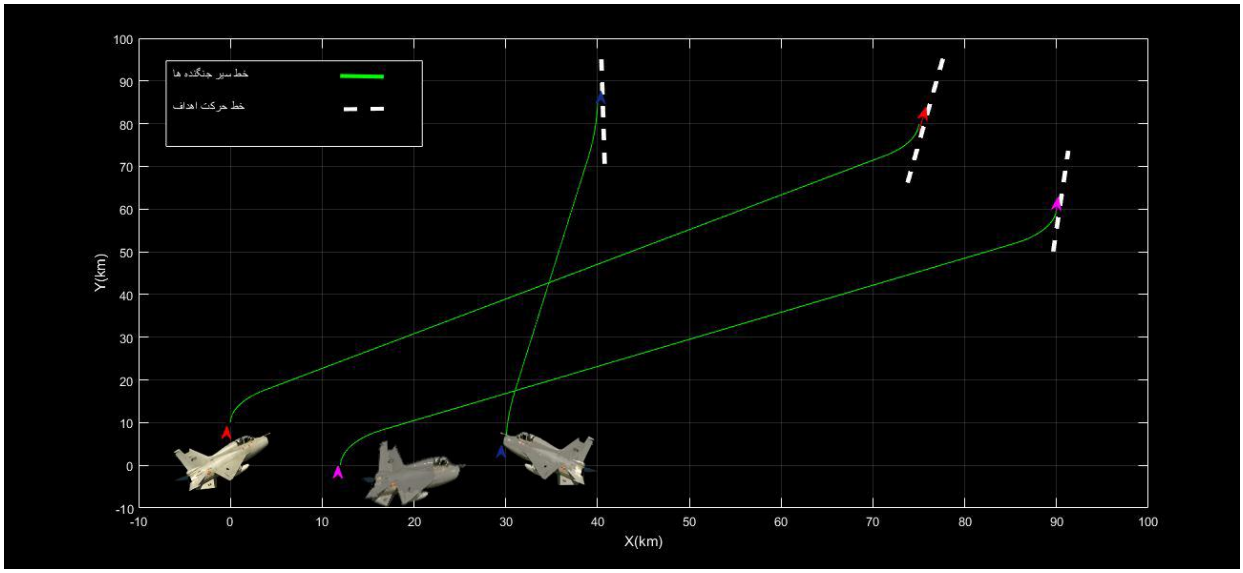
طبق حالت عمومی مسائل حمله به اهداف، توسط ناوگان هم‌کار از پرنده‌ها، مأموریت مشارکتی با تعریف سه وظیفهٔ شناسایی هدف، حمله به هدف تعیین شده و تأیید مأموریت در هر هدف انجام می‌شود. قابل ذکر است توالی ذکر شده در انجام وظایف در هر هدف جزء ضروریات اجرای صحیح مأموریت می‌باشد که با تعریف محدودیت‌هایی مفروض، پیاده‌سازی می‌شود.

اجرای وظایف تعیین شده در اهداف (شناسایی، حمله و تأیید)، به‌وسیله‌ی جنگنده‌های متمایز انجام می‌گردد. معماری مسأله به‌گونه‌ای تعریف می‌گردد که توالی منطقی‌ای بین اجرای وظایف مختلف توسط هر عامل، پدید آید. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، مسألهٔ تصمیم‌گیری، به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردد تا تولنایی پوشش شرایط دینامیک بودن اهداف و محدودیت‌های مانوری جنگنده‌ها را دارا باشد. در شکل ۱ شماتیکی مختصر از نحوه‌ی اجرای مأموریت با نمایش محدودیت‌های موجود ارائه شده است.

مسألهٔ تصمیم‌گیری برپایهٔ محدودیت‌های فیزیکی و مأموریتی مسأله، به‌گونه‌ای باید اجرا شود که در مسیر حل و ارائهٔ پاسخ بهینه و در جهت بهینه نمودن فاکتورهای مدنظر باشد. با تعریف یک تابع هزینهٔ چند هدفه، معماری حل، در جست‌وجوی پاسخ شدنی و کمینه کنندهٔ تابع هزینه خواهد بود.

اجزای معماری تصمیم‌گیری مسائل مشارکتی

در اجرای مأموریت‌های حمله‌ی هوایی و بخصوص در حیطهٔ جنگنده‌های سرنشین‌دار، بدلیل اهمیت و حساسیت بالای اجرای دقیق و بهینهٔ مأموریت، استفاده از معماری‌های با دقت بالا بسیار ضروری است. از آن‌جا که ابعاد مسأله اغلب در مسائل مشارکتی ناوگان جنگنده‌های هم‌کار، در حد کم تا متوسط است، استفاده از رویکردهای ابتکاری برپایه‌ی معماری‌های کلاسیک که دقت بالا و زمان حل مناسب با توجه به ابعاد مسأله دارند، استفاده می‌شود. در رویکرد معرفی شده در این مقاله، با تلفیق مسأله‌ی مسیریابی با روش منحنی‌های دابینز و استفاده از ضرایب تأثیر آن، به حل مسأله‌ی مشارکت ناوگان جنگنده‌ها در اجرای مأموریت پرداخته شده است. در ادامه روش حل به کار گرفته شده برای استخراج پاسخ بر اساس شرایط گفته شده، ارائه می‌شود.



شکل ۱-شماتیک یک مسألهٔ اختصاص وظایف با اهداف متحرک

طراحی مسیر با روش منحنی‌های دابینز

در این بخش به تشریح مسأله‌ی طراحی مسیر جنگنده‌ها پرداخته می‌شود. طراحی مسیر، برای ایجاد کوتاه‌ترین مسیر از یک نقطه‌ی ابتدایی به یک نقطه‌ی انتهایی تحت قیود مشخص که شامل محدودیت‌های شعاع چرخش یک جنگنده و محدودیت‌هایی جهت بردار سرعت در نقاط ابتدایی و انتهایی (زاویه سمت) است، به کار می‌رود.

فرضیات در نظر گرفته شده به‌شرح زیر است:

- جنگنده‌ها دارای سرعت ثابت در حرکت مخصوص به خود می‌باشند.
- بردارهای سرعت و محدودیت‌های آن‌ها تنها در صفحهٔ دو بعدی اعمال می‌گردند و تأثیری بر جهت عمودی ندارند.
- محیط پرواز همانند شکل ۲ نمایش داده می‌شود و نقاط ابتدایی و انتهایی با مختصات $P_s\left(x_s, y_s, \vec{v}_s\right)$ و $P_f\left(x_f, y_f, \vec{v}_f\right)$ نمایش داده می‌شوند.

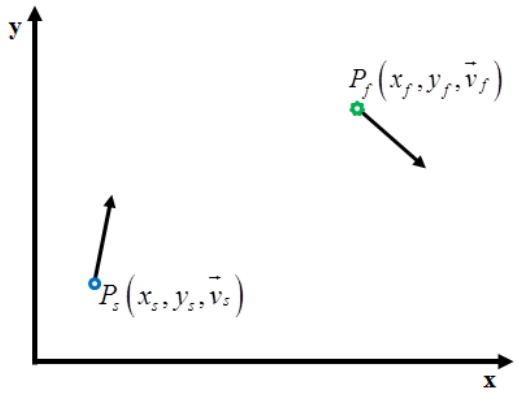
کمینهٔ زاویهٔ چرخش جنگنده:

کمینهٔ زاویهٔ چرخش یک جنگنده به بیشینهٔ زاویهٔ غلت[1] جنگندهٔ مفروض و سرعت جنگنده وابسته است که از طریق فرمول زیر بدست می‌آید [۳۹]:

$$L\sin\phi_{\max} = m\frac{v^2}{r_{\min}} \qquad (۱)$$

$$L\cos\phi_{\max} = mg \qquad (۲)$$

که در آن، L نیروی برآ در جنگنده، $\phi_{\max}$ بیشینه زاویهٔ غلت جنگنده، m جرم جنگنده، v سرعت جنگنده، $r_{\min}$ کمینه شعاع چرخش جنگنده و g شتاب زمین است.



شکل ۲- محیط پروازی با نقاط شروع و پایان مشخص

در معادله‌ی (۱) کمینه‌ی شعاع چرخش یا $r_{\min}$ می‌تواند به‌صورت زیر بدست آید:

$$r_{\min} = \frac{v^2}{g\tan(\phi_{\max})} \qquad (۳)$$

[1] Roll angle

مسیرهای دابینز:

تئوری منحنی‌های دابینز نشـــان می‌دهد که کوتاه‌ترین مســـیر بین دو پیکربندی خاص در فضـــای دوبعدی، از تلفیق منحنی‌های دایره‌ای و خطوط مماسی آن‌ها حاصل می‌شود. در یک پیکربندی مفروض در یک صـــفحه‌ی دو بعدی، جنگنده می‌تواند به راســـت یا چپ چرخش کند. با این توضـــیحات، یک پیکربندی همانند شکل ۳ دارای دو دایرهٔ مماسی است، یکی به سمت راست می‌چرخد و با R نمایش داده می‌شود و دیگری به ســـمت چپ می‌چرخد که با نماد L نمایش داده می‌شـــود. در شـــکل مذکور، P و $\vec{v}$ به ترتیب نمایش‌دهندهٔ موقعیت و بردار سرعت جنگنده هستند. Φ نمایش‌دهندهٔ موقعیت جنگنده در دایره‌های مماسی است و به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Phi = \mathrm{mod}(\theta \pm \frac{\pi}{2} + 2\pi, 2\pi) \quad (۴)$$

که در آن، θ چرخش بردار سرعت است.

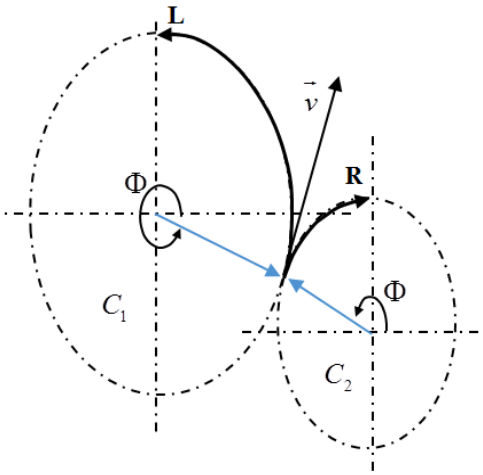
مراکز دایره‌های مماسی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x_{cs} = x_s - r_s \cos\Phi_s \quad (۵)$$

$$y_{cs} = y_s - r_s \sin\Phi_s \quad (۶)$$

$$x_{cf} = x_f - r_f \cos\Phi_f \quad (۷)$$

$$y_{cf} = y_f - r_f \sin\Phi_f \quad (۸)$$



شکل ۳- دایره‌های مماسی و پیکربندی‌های منحنی‌های دابینز

که در آن، (x_{cs}, y_{cs}) و (x_{cf}, y_{cf}) مختصات مراکز C_s و C_f، زاویه‌های Φ_s و Φ_f، موقعیت جنگنده در دایره‌های ابتدایی و هدف، و r_s و r_f شعاع دایره‌های C_s و C_f هستند. پیکربندی ابتدایی و هدف هر کدام دو دایره خواهند داشـــت. چهار مســـیر بین آنها وجود دارد، که عبارتند از: RSR، RSL، LSR و LSL که تشـــکیل دهندهٔ مســـیرهای دابینز بین دو پیکربندی‌اند.

بدین ترتیب کوتاه‌ترین مســـیرهای ممکن بین دو نقطهٔ مفروض بدســـت می‌آید. جهت برطرف نمودن مشـــکل تداخل مســـیرها و امکان وجود برخورد بین جنگنده‌ها درصـــورتی که ارتفاع پروازی آن‌ها یکســـان باشـــد، با تعریف یک ترم جریمه و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی (که در این مقاله از الگوریتم ابتکاری مورد استفاده بسادگی استفاده شده است) به کوتاه‌ترین مسـیر بدون تداخل دسـت می‌یابیم. بدلیل ماهیت این معماری که تصـــمیم‌گیری کلان و به دور از جزئیات پیچیده‌کننده و کم اســـتفاده اســـت، فرض شـــده اســـت که ارتفاع پروازی جنگنده‌ها حداقل در زمان حرکت در محل‌های پرخطر، متفاوت است.

الگوریتم سلسله‌مراتبی خطی صحیح

جهت اعمال فرض متحرک بودن اهداف مورد نظر در هر مأموریت، از بسط و توسعه‌ی معماری خطی صحیح کلاسیک و گسسته‌سازی شناور، بدین معنی که افق پیش روی هر جنگنده دارای گســـستگی مرحله به مرحله و مخصـــوص به خود اســـت، اســـتفاده می‌شـــود. بر طبق مفروضـــات مســـأله، محدودیت‌های زمـــانی، غیر زمـــانی، حرکتی و محـــدودیـــت‌هـــای فیزیکی و مشـــخصـــه‌ای وابســـته به هر جنگنده در طول پروســـه‌ی حل باید ارضا گردد.

الف- متغیرهای تصمیم‌گیری

جهت پیاده‌ســـازی فضـــای مســـأله در قالب معماری توســـعه داده شـــده، به تعریف دو نوع متغیر تصـــمیم‌گیری پرداخته می‌شود:

۱- متغیرهای تصمیم‌گیری پیوسته

متغیرهای پیوســـته، متغیرهای از جنس زمان‌اند و با فرض شـــروع از نقطه‌ی i به نقطه‌ی j و جهت اجرای وظیفهٔ شـــمارهٔ k در نقطهٔ مقصد، مطابق جدول ۱ تعریف می‌شوند.

جدول ۱- متغیرهای پیوستهٔ مورد استفاده در معماری حل

زمان انجام مأموریت kام برروی هدف jام	t_j^k
زمان حرکت از نقطهٔ i به j توســـط جنگنده vام برای انجام وظیفهٔ kام	$t_{i,j}^{v,k}$
زمان اتمام مأموریت اختصـــاص وظایف توســـط ناوگان جنگنده‌ها	t

۲- متغیرهای تصمیم‌گیری باینری

متغیرهای باینری جهت نمایش تصمیم‌گیری برای اجرا یا عدم اجرای وظیفهٔ k توسط جنگندهٔ v در نقطهٔ مفروض j تعریف می‌گردند و داریم:

$$x_{i,j}^{v,k}$$

در صورت اختصاص جنگندهٔ شمارهٔ v به جهت اجرای وظیفهٔ شمارهٔ k در نقطهٔ j با وجود نقطهٔ شروع حرکت i مقدار این متغیر یک و در غیر این‌صورت صفر می‌گردد.

ب- تابع هزینه

تابع هزینه معرف معیاری جهت بهینگی یا عدم بهینگی راه‌حل‌های پیشنهادی مسألهٔ مأموریت تیم‌های هم‌کار و ارائهٔ توالی و دستورالعمل مناسب جهت اجرای مأموریت است. با توجه به اهمیت زمان کلی اجرای مأموریت و همچنین بهینگی مصرف سوخت و یا به عبارتی مجموع مسیرهای طی شده توسط جنگنده‌های هم‌کار، از یک تابع هزینهٔ چند هدفه استفاده شده است.

$$J = \alpha_1[\sum_{k=1}^{3}\sum_{v=1}^{N_v}\sum_{i=1}^{N_t+1}\sum_{j=1}^{N_t+1} t_{i,j^{t_{it}}}^{v,k}\, x_{i,j}^{v,k}] + (1-\alpha_1)[t+c_j^k \times t_j^k] \qquad (۹)$$

متغیر α_1 میزان اهمیت هر کدام از ترم‌های تابع هزینه را تعیین می‌نماید و دارای مقداری بین ۰ تا ۱ است. قسمت اول تابع هزینه، مربوط به زمان مجموع یا مسافت مجموع است که توسط ناوگان جنگنده‌ها طی شده است. از آن‌جا که فواصل و در نتیجه زمان‌های بین اهداف و جنگنده‌ها با زمان تغییر می‌کند لذا در هر پنجره‌ی زمانی و برای هر پهپاد بایست تغییر نماید. $t_{i,j^{t_{it}}}^{v,k}$ عبارتست از زمان لازم برای حرکت جنگنده شمارهٔ v به‌منظور اجرای مأموریت k روی هدف jام زمانی که از نقطهٔ iام حرکت می‌نماید. متغیر $x_{i,j}^{v,k}$ متغیر تصمیم‌گیری باینری فضای حل می‌باشد. N_tتعداد اهداف و N_v تعداد جنگنده‌ها می‌باشد.

قسمت دوم تابع هزینه مربوط به کاهش زمان اتمام مأموریت کلی است. t_j^k، زمان اتمام مأموریت k روی نقطهٔ jام و t زمان کلی اجرای مأموریت می‌باشد. c_j^k ضریبی کوچک‌تر از یک است که با توجه به اهمیت اتمام هر وظیفه برروی اهداف، تعیین می‌گردد.

ج- محدودیت‌های مأموریت

بدلیل توانایی بالای معماری برنامه‌ریزی خطی از توسعه‌ی آن جهت اجرای مأموریت‌های استراتژیک مشارکتی جنگنده‌ها استفاده شده است. در این راستا دو نوع محدودیت شامل محدودیت‌های زمانی و توالی مناسب اجرای مأموریت‌ها در زمان و هم‌چنین محدودیت‌های غیر زمانی وابسته به ویژگی‌های تیم هم‌کار تعریف می‌گردد.

محدودیت‌های اختصاصی مورد استفاده

محدودیت‌های اختصاصی این بخش مربوط به استفاده از جنگندهٔ عملیاتی مورد استفاده جهت اجرای مأموریت مشارکتی می‌باشد. تمامی روابط و اطلاعات لازم مرتبط با این نوع محدودیت‌ها از کتابچه‌های فنی جنگنده‌های مفروض استخراج شده است.

۱- توان تسلیحاتی هر جنگنده متفاوت است. در این مقاله، جنگندهٔ عملیاتی مورد استفاده، قابلیت حمل دو عدد سلاح AIM-9P بهمراه آداپتور رهاساز مربوطه را داراست. بدین ترتیب قابلیت اجرای دو مورد از وظایف شمارهٔ دو در اهداف را داراست.

$$\sum_{i=1}^{N_t+1}\sum_{j=1}^{N_t+1} x_{i,j}^{(v,t)} \le \beta_1^v, \quad v=1,...,N_v; \quad k=1,2,3 \qquad (۱۰)$$

۲- محدودیت مصرف سوخت در هر جنگندهٔ هم‌کار از جمله موارد مهم دیگر است که باید مورد توجه قرار گیرد. جنگندهٔ مدنظر در این پژوهش با توجه به مشخصه‌های عملکردی خود در شرایط پرواز در ارتفاع ثابت حدود ۱۱۰۰۰متری و رژیم عملکردی موتور[1] در حالت Full A/B دارای مصرف سوخت میانگین ۱/۴۸ کیلوگرم بر کیلومتر است. محدودیت مورد نظر به‌صورت زیر اعمال می‌گردد:

$$\sum_{k=1}^{N_k}\sum_{i=1}^{N_v}\sum_{j=1}^{N_v} x_{i,j}^{(v,k)} \times d_{i,j}^{(v,k)} \times m^v \le C^v \qquad (۱۱)$$

[1] Engine Operation Regime

که m^v میزان مصـــرف ســـوخت جنگنده که برابر ۱/۴۸ و C^v حداکثر ظرفیت طی مسافت برای هرجنگنده است.

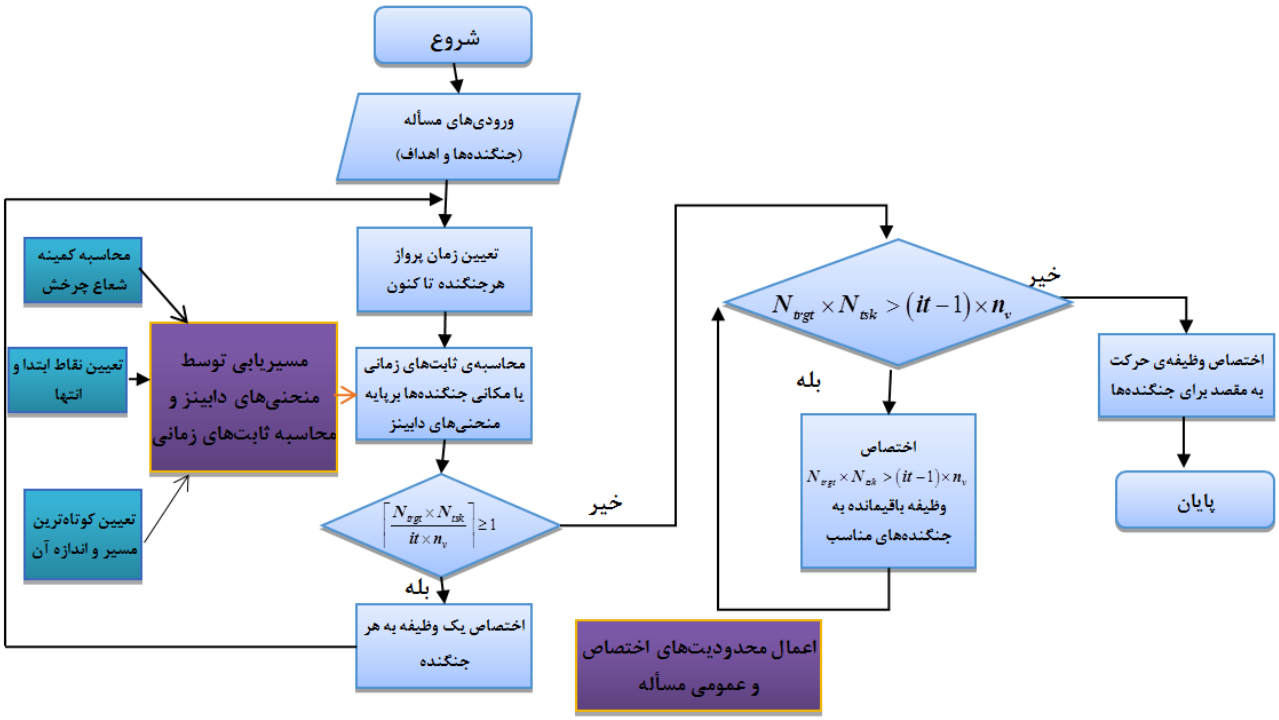
۳- با شـــرایط وزن برخاســـت[1] ۸۰۰۰کیلوگرم و لندیس پسای[2] ۱۰۵ با استفاده از جداول راهنما، کمینه شعاع چرخش جنگنده ۵۳۰۰ متر می‌باشد.

۴- با درنظر گرفتن ســـرعت ثابت جنگنده در حین اجرای مأموریت در جهت پیاده‌ســـازی با پیچیدگی کمتر میانگین سرعت جنگنده‌ی مفروض برابر ۰/۸ عدد ماخ می‌باشد.

محدودیت‌های عمومی مسأله

به‌طور عام، قیود وابســـته و مســـتقل از زمان زیادی در پیاده‌سازی مسائل مشارکتی، اعم از توالی زمانی اجرای وظایف مختلف در هر هدف، پیوســـتگی‌های لازم جهت اجرای بدون وقفهٔ وظایف محول شـــده به هر جنگنده، ارزش‌گذاری جهت اجرای ســـریع‌تر برخی از اهداف، محدودیت‌های زمانی جهت اجرای معقول و مرتب تمامی وظایف با وجود اهداف و دیگر موارد وجود دارد کـه از منـابعی کـه در این حوزه وجود دارد، اســتخراج شـده اسـت [۳۸]. به سـبب کاهش حجم معادلات و روابط مورد اســـتفاده و عمومیت این محدودیت‌ها، به ذکر آن‌ها پرداخته نشده است.

جهت ادراک مناسب‌تر روند پیاده‌سازی مقاله، آن‌گونه که در فلوچارت ارائه شده در شکل ۴ نمایش داده شده است، با ترکیب دو مقولهٔ مسیریابی بهینه بر اساس روش منحنی‌های دابینز و الگوریتم ابتکاری اختصاص وظایف با اعمال تمامی محدودیت‌های اختصاصی جنگندهٔ به‌کار رفته در این مقاله و هم‌چنین لحاظ کردن قیودهای عمومی در چنین مسائلی، با استفاده از رویکرد سلسله‌مراتبی در راستای اعمال فرضیات در حل مسأله شامل شرایط دینامیکی و عملیاتی یک جنگنده در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- فلوچارت الگوریتم ابتکاری استفاده شده

بحث و نتایج

در این بخش بعـد از معرفی روش‌هـا و نوآوری‌هـای مورد استفاده در مقالهٔ حاضر، به ارائهٔ نتیجه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌هایی جهت تصدیق کارایی معماری مورد استفاده پرداخته می‌شود. با توجه به اســـتفاده از نوعی جنگندهٔ عملیاتی موجود در ناوگان

[1] Gross weight

[2] Drag index

هوایی و نظامی کشور، فرضیات زیر جهت اجرای مسأله، در نظر گرفته شده است:

- تمامی ویژگی‌های مورد استفاده اعم از سرعت، مصرف سوخت، قابلیت حمل تجهیزات و تسلیحات و دیگر موارد با تکیه بر داده‌های حقیقی صورت پذیرفته است.
- با توجه به اهمیت بالای مدنظر قرار دادن شرایط دینامیکی اجرای مأموریت‌های مشارکتی، به پیاده‌سازی مأموریت با احتساب شرایط متحرک بودن محیط پرداخته شده است.
- تمامی جنگنده‌های هم‌کار دارای نقاط شروع و مقصد منحصر به خود می‌باشند.

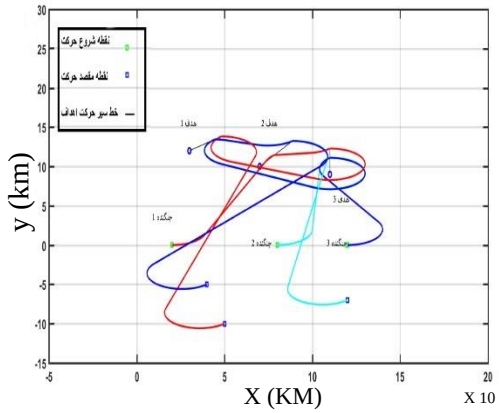
شبیه‌سازی

در این بخش به‌منظور درک شهودی بهتر نسبت به روند اجرا و پاسخ‌گیری از معماری مجتمع مسیریابی و اختصاص وظایف توسعه داده شده در مقاله، به ارائهٔ سه نمونه شبیه‌سازی با تعداد جنگنده‌ها، اهداف و وظایف متفاوت پرداخته می‌شود. در جدول ۲ خصوصیات سه نمونه شبیه‌سازی انجام شده، آورده شده است.

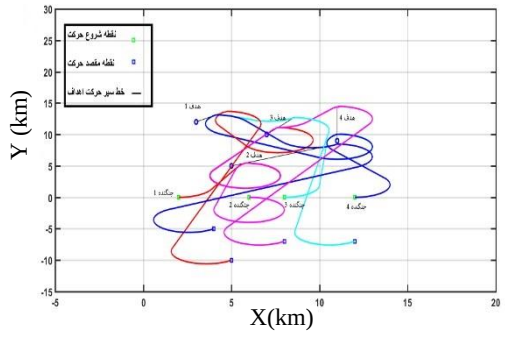
شکل ۵ نتایج گرافیکی اجرای مسأله برای سه نمونه شبیه‌سازی فرض شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، اجرای کامل قیود بخصوص محدودیت‌های حرکتی قابل ملاحظه است.

جدول ۲- جزئیات شبیه‌سازی‌های ارائه شده

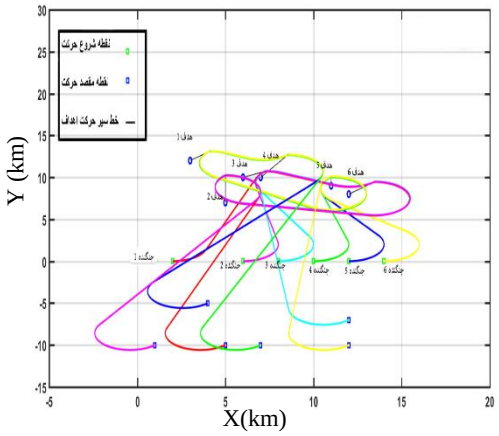
جزئیات شبیه‌سازی	تعداد جنگنده	تعداد وظایف	شرایط دینامیکی اهداف	محدودیت‌های اختصاصی	زمان اجرا (ثانیه)	پاسخ به محدودیت‌های
شبیه‌سازی ۱	۳	۹	متحرک	دارد	۱۰	کامل
شبیه‌سازی ۲	۴	۱۲	متحرک	دارد	۱۵	کامل
شبیه‌سازی ۳	۶	۱۸	متحرک	دارد	۲۶	کامل



الف) شبیه‌سازی ۱



ب) شبیه‌سازی ۲



ج) شبیه‌سازی ۳

شکل ۵- اختصاص وظایف برای نمونه شبیه‌سازی‌های مفروض

در شکل ۵ مسیرها و وظایف اختصاصی به هر جنگنده برای سه نمونه شبیه‌سازی نشان داده شده است. به ترتیب زمان اجرای مأموریت توسط تیم جنگنده‌ها در سه حالت ۱۸، ۲۲ و ۳۹ دقیقه می‌باشد. طول مسیرهای پیش‌بینی شده در این معماری، به‌عنوان ضرایب لازم جهت تصمیم‌گیری و بهینه‌یابی برای معماری تصمیم‌گیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه

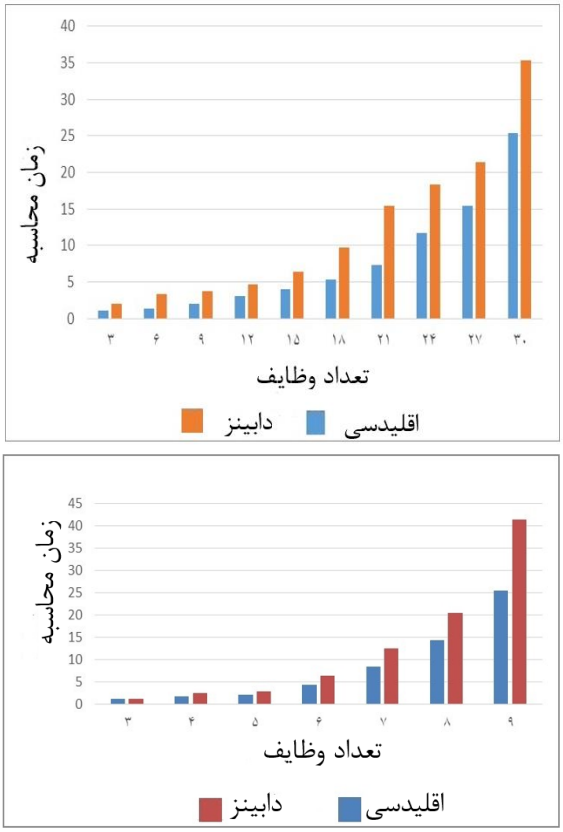
به شـکل‌ها براحتی می‌توان به پوشـش شـرایط متحرک بودن اهداف پی برد.

یکی از معضلات استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی بهینه بصورت یکپارچه با معماری‌های اختصاص وظایف، افزایش مدت زمان حل و اجرای مسأله بدلیل افزایش بار محاسباتی معماری حل می‌باشد. به‌منظور آگاهی از این مورد، به مقایسه‌ی اجرای مسأله‌های هم‌سایز برای دو حالت حل بدون مسیریابی پیچیده و با روش فاصله‌ی اقلیدسی همانگونه که در [۳۸] ارائه شده است و با درنظر گرفتن مسیریابی به روش منحنی‌های دابینز پرداخته می‌شود.

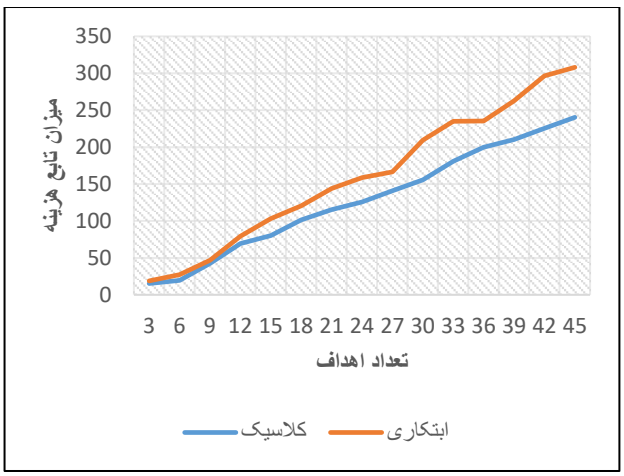
همان‌گونه که ذکر شد معماری یکپارچه مسیریابی و اختصاص وظایف منجر به افزایش بار محاسباتی می‌گردد. با تصحیح مدل مورد استفاده از معماری برنامه‌ریزی خطی و بکار بردن رویکرد سلسله‌مراتبی در جهت کاهش بار محاسباتی گام برداشته شده است. با دقت در شکل ۶ می‌توان به وضوح مشاهده کرد که علیرغم بار محاسباتی بیشتر معماری یکپارچه نسبت به روش ساده‌ی اقلیدسی جهت مسیریابی، اجرای مسائل با سایز کم تا متوسط بصورت به‌هنگام قابل قبول است. ویژگی دیگر معماری مورد استفاده، توانایی گرفتن خروجی و ارسال به جنگنده‌ها به جهت انجام مرحله به مرحله‌ی مأموریت‌های محول شده می‌باشد که منجر به کاهش زمان انتظار برای گرفتن دستورات لازم می‌گردد.

به‌صورت کلی می‌توان اشاره کرد که در پژوهش‌های پیشین به اجرای مسائل مشارکتی با در نظر گرفتن اهداف متحرک نپرداخته‌اند، در حالی که در مقاله حاضر نه تنها به حل این مسأله پرداخته شده است بلکه با استفاده از یک معماری یکپارچه، مسأله برای یک تیم جنگنده‌ی عملیاتی موجود در ناوگان هوایی کشور پیاده‌سازی شده است.

به‌منظور مقایسه‌ی میزان بهینگی پاسخ‌ها، چند نمونه حل با پیاده‌سازی توسط الگوریتم‌های کلاسیک و رویکرد پیشنهادشده در این مقاله، در نظر گرفته شده است. از آن‌جایی که رویکرد کلاسیک قابلیت حل مسائل دینامیک با اهداف متحرک را ندارند، جهت ایجاد شرایط مقایسه بین این دو رویکرد، سرعت اهداف صفر درنظر گرفته می‌شود. شکل ۷ با مقایسهٔ تابع هزینهٔ بدست آمده، سعی در مقایسهٔ میزان بهینگی پاسخ رویکرد بسط داده شده نسبت به رویکرد کلاسیک که



شکل ۶- مقایسه میزان اختلاف زمان حل توسط معماری یکپارچه و اقلیدسی



شکل ۷- مقایسه تابع هزینه رویکردهای ابتکاری و کلاسیک

بهینه‌ترین حالت را به نمایش می‌گذارد، دارد. با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که بطور میانگین ۲۴/۸۵ درصد افزایش تابع هزینه صورت گرفته است که با توجه به میزان افزایش بالای دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، مقدار بدست آمده کاملا مورد قبول است.

نتیجه‌گیری

پیشرفت‌های نوین در عرصه‌ی مهندسی کنترل جنگنده‌ها بصورت انفرادی، توجه محققان را به مسائل مشارکتی و با حضور تیمی از جنگنده‌ها معطوف نموده است. این مشارکت گاهی در جهت افزایش راندمان اجرای مأموریت و کاهش احتمال عدم تکمیل مأموریت به‌دلیل از دست دادن جنگنده می‌باشد.

در مقاله‌ی پیش روی، یک پلتفرم شامل یک الگوریتم ابتکاری و توسعه یافته‌ی حل مسائل اختصاص وظایف برپایه‌ی روش برنامه‌ریزی خطی صحیح و هم‌چنین روش مسیریابی منحنی‌های دابینز به منظور اعمال محدودیت‌های حرکتی جنگنده‌ها در بدست آوردن ضرایب لازم برای حل الگوریتم معرفی شده، ارائه شده است. با این‌کار سعی بر پوشش بهینه‌ی مسائل مشارکت جنگنده‌ها در مأموریت‌های شامل اهداف متحرک شده است.

موارد زیر پس از اجرای این معماری قابل استنتاج است:

✓ یکی از معیارهای برتری معماری‌های تصمیم‌گیرنده، درنظر گرفتن تمامی مؤلفه‌های دینامیکی محیط و جنگنده‌های هم‌کار است. در جهت حصول این مؤلفه‌ها برای جنگنده‌های مدنظر از پیاده‌سازی محدودیت‌های مربوط به جنگنده اعم از مصرف سوخت، میانگین سرعت، محدودیت شعاع چرخشی و دیگر موارد و به جهت پیاده‌سازی شرایط دینامیکی محیط از فرض متحرک بودن اهداف استفاده شده است.

✓ در تمامی مأموریت‌های استراتژیک، پیاده‌سازی و ارضای تمام محدودیت‌ها یکی از نیازهای لازم و مورد نظر است و خوشبختانه معماری‌های برپایه‌ی برنامه‌ریزی خطی، دارای توانایی حل و ارضای دقیق تمامی محدودیت‌ها می‌باشند که معماری مورد استفاده از این قاعده مستثنا نیست.

✓ بهینه‌سازی و مبنای تصمیم‌گیری برپایه‌ی تابع هزینه‌ی چندهدفه که تمامی مؤلفه‌های تاثیرگذار را مورد توجه قرار می‌دهد، می‌باشد.

✓ در مقاله‌ی پیش روی، با استفاده از یک رویکرد برنامه‌ریزی خطی تکاملی اصلاح شده که در فلوچارت شکل ۴ ارائه شده است، سعی بر حل یک مسأله با متغیرهای غیرخطی (اهداف با جهت‌گیری‌های موقعیتی متغیر) شده است. تا کنون مسائل مشابه تنها به ردیابی و دنبال کردن یک هدف متغیر پرداخته‌اند و به مسائل اختصاص وظایف با اهداف متغیر توجه نشده است.

✓ با توجه به لزوم استفاده از یک الگوریتم طراحی مسیر با در نظر گرفتن محدودیت‌های حرکتی جنگنده ها و سرعت محاسباتی بالا به‌منظور اجرای به‌هنگام الگوریتم ترکیب شده با متد اختصاص وظایف، منحنی‌های دابینز بهترین انتخاب بود.

✓ مهم‌ترین نوآوری این مقاله استفاده از یک معماری یکپارچه که قابلیت پیاده‌سازی مسأله‌ی مسیریابی برای جنگنده‌های مورد استفاده و برپایه‌ی تمامی محدودیت‌ها و ویژگی‌های واقعی جنگنده‌های مفروض در کنار استفاده از معماری حل کننده‌ی فرا ابتکاری برنامه‌ریزی خطی سلسله‌مراتبی می‌باشد.

فهرست علائم

J	تابع هزینه
i	اندیس گرهٔ شروع
j	اندیس گرهٔ پایان
N_t	تعداد اهداف مسألهٔ اختصاص وظایف
K	تعداد وظایف موجود در هر هدف
N_v	تعداد پهپادهای ناوگان
t_j^k	زمان انجام مأمورت k برروی گرهٔ j
T	زمان بیشینهٔ مداومت پروازی بین تمامی جنگنده‌ها
T_v	زمان مداومت پروازی بین جنگنده vhcام
$x_{i,N_t+1}^{v,k}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری حرکت از گرهٔ شمارهٔ i به مقصد برای جنگنده vام
$x_{i,j}^{v,k}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری اختصاص وظیفهٔ k روی گرهٔ j در حرکت از گرهٔ i برای جنگنده vام
$x_{N_t+1,j}^{v,k}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری حرکت از نقطهٔ شروع به گرهٔ شمارهٔ j برای پهپاد vام
$t_{i,j}^{v,k}{}_{it}$	فاصله‌ی زمانی لازم که پهپاد v برای انجام وظیفه k روی گره j و از نقطه‌ی مبدأ i در زمان طی شده توسط جنگنده تا مرحلهٔ itام مسأله نیاز دارد
ϕ_{max}	بیشینه زاویه‌ی غلت جنگنده
Φ	نمایش‌دهنده‌ی موقعیت جنگنده در دایره‌های مماسی

مراجع

[۱] R. G. Grant, Flight: The Complete History of Aviation: DK; Updated, Revised edition (May 2, 2017), 2017.

[۲] T. Shima and C. Schumacher, Assigning cooperating UAVs to simultaneous tasks on

consecutive targets using genetic algorithms, Journal of the Operational Research Society, vol. 60, pp. 973-982, 2009.

[۳] D. W. Casbeer and R. W. Holsapple, Column generation for a UAV assignment problem with precedence constraints, International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 21, pp. 1421-1433, 2011.

[۴] C. Schumacher, P. R. Chandler, M. Pachter, and L. S. Pachter, Optimization of air vehicles operations using mixed-integer linear programming, Journal of the Operational Research Society, vol. 58, pp. 516-527, 2007.

[۵] Y. NI, D.-Y. ZHOU, Y.-h. MA, and B.-c. HE, The Air-to-Ground Tasks Assignment for Multi-UAV based Mixed Integer Linear Programming [J], Fire Control and Command Control, vol. 11, 2008.

[۶] J. Bellingham, Y. Kuwata, and J. How, "Stable receding horizon trajectory control for complex environments," in AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, p. 5635, 2003.

[۷] M. Gendreau, G. Laporte, and J.-Y. Potvin, "Metaheuristics for the capacitated VRP," in The vehicle routing problem, ed: SIAM, 2002, pp. 129-154.

[۸] M. Alighanbari, Task assignment algorithms for teams of UAVs in dynamic environments, Massachusetts Institute of Technology, 2004.

[۹] M. A. Darrah, W. Niland, and B. Stolarik, "Multiple UAV Task Allocation for an Electronic Warfare Mission Comparing Genetic Algorithms and Simulated Annealing (Preprint)," INSTITUTE FOR SCIENTIFIC RESEARCH FARIMONT WV2006.

[۱۰] E. Edison and T. Shima, Integrated task assignment and path optimization for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms, Computers &

Operations Research, vol. 38, pp. 340-356, 2011.

[۱۱] V. Shaferman and T. Shima, Unmanned aerial vehicles cooperative tracking of moving ground target in urban environments, Journal of guidance, control, and dynamics, vol. 31, pp. 1360-1371, 2008.

[۱۲] X .Fu, P. Feng, and X. Gao, Swarm UAVs Task and Resource Dynamic Assignment Algorithm Based on Task Sequence Mechanism, IEEE Access, vol. 7, pp. 41090-41100, 2019.

[۱۳] K. A. Ghamry, M. A. Kamel, and Y. Zhang, "Multiple UAVs in forest fire fighting mission using particle swarm optimization," in 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 1404-1409, 2017.

[۱۴] J. Gu, T. Su, Q. Wang, X. Du, and M. Guizani, Multiple moving targets surveillance based on a cooperative network for multi-UAV, IEEE Communications Magazine, vol. 56, pp. 82-89, 2018.

[۱۵] A. T. Hafez and M. A. Kamel, Cooperative task assignment and trajectory planning of unmanned systems via hflc and pso, Unmanned Systems, vol. 7, pp. 65-81, 2019.

[۱۶] Z. Jia, J. Yu, X. Ai, X. Xu, and D. Yang, Cooperative multiple task assignment problem with stochastic velocities and time windows for heterogeneous unmanned aerial vehicles using a genetic algorithm, Aerospace Science and Technology, vol. 76, pp. 112-125, 2018.

[۱۷] X. Jiang, Q. Zhou, and Y. Ye, "Method of task assignment for UAV based on particle swarm optimization in logistics," in Proceedings of the 2017 International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence, pp. 113-117, 2017.

[۱۸] M. Zhu ,X. Du, X. Zhang, H. Luo, and G. Wang, Multi-UAV Rapid-Assessment

Task-Assignment Problem in a Post-Earthquake Scenario, IEEE Access, vol. 7, pp. 74542-74557, 2019.

[۱۹] X. Hu, H. Ma, Q. Ye, and H. Luo, Hierarchical method of task assignment for multiple cooperating UAV teams, Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 26, pp. 1000-1009, 2015.

[۲۰] Z. Zhao, J. Yang, Y. Niu, Y. Zhang, and L. Shen, A Hierarchical Cooperative Mission Planning Mechanism for Multiple Unmanned Aerial Vehicles, Electronics, vol. 8, p. 443, 2019.

[۲۱] Liu, Wei, Z. Zheng, and K.-Y. Cai, Bi-level programming based real-time path planning for unmanned aerial vehicles, Knowledge-Based Systems, vol. 44, pp. 34-47, 2013.

[۲۲] B. D. Song, K. Park, and J. Kim, Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic, Computers & Industrial Engineering, vol. 120, pp. 418-428, 2018.

[۲۳] S. Perez-Carabaza, E. Besada-Portas, J. A. Lopez-Orozco, and M. Jesus, Ant colony optimization for multi-UAV minimum time search in uncertain domains, Applied Soft Computing, vol. 62, pp. 789-806, 2018.

[۲۴] Y. Chen, D. Yang, and J. Yu, Multi-UAV Task Assignment With Parameter and Time-Sensitive Uncertainties Using Modified Two-Part Wolf Pack Search Algorithm, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 54, pp. 2853-2872, 2018.

[۲۵] E. Adamey, A. E. Oğuz, and Ü. Özgüner, Collaborative multi-msa multi-target tracking and surveillance: a divide & conquer method using region allocation trees, Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 87, pp. 471-485, 2017.

[۲۶] W. Meng, Z. He, R. Su, P. K. Yadav, R. Teo, and L. Xie, Decentralized multi-UAV flight autonomy for moving convoys search and track, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 25, pp. 1480-14.۲۰۱۶ ,۸۷

[۲۷] H. Ergezer and M. Leblebicioğlu, "3D path planning for UAVs for maximum information collection. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)," in 2013 International Conference on, 2013.

[۲۸] O. Souissi, R. Benatitallah, D. Duvivier, A. Artiba, N. Belanger, and P. Feyzeau, "Path planning: A 2013 survey," in Proceedings of 2013 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), pp. 1-8, 2013.

[۲۹] D. González, J. Pérez, V. Milanés, and F. Nashashibi, A review of motion planning techniques for automated vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 17, pp. 1135-1145, 2015.

[۳۰] K. Ok, S. Ansari, B. Gallagher, W. Sica, F. Dellaert, and M. Stilman, "Path planning with uncertainty: Voronoi uncertainty fields," in 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4596-4601, 2013.

[۳۱] L. E. Dubins, On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents, American Journal of Mathematics, vol. 79, p. 497, Jul 1957.

[۳۲] J. Reeds and L. Shepp, Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards, Pacific journal of mathematics, vol. 145, pp. 367-393, 1990.

[۳۳] L. E. Kavraki, P. Svestka, J.-C. Latombe, and M. H. Overmars, Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces, IEEE transactions on Robotics and Automation, vol. 12, pp. 566-580, 1996.

[۳۴] Y. Kuwata, A. Richards, T. Schouwenaars, and J. P. How, "Decentralized robust receding horizon control for multi-vehicle guidance," in 2006 American Control Conference, p. 6 pp., 2006.

[۳۵] T. R. Mehta and M. Egerstedt, An optimal control approach to mode generation in hybrid systems, Nonlinear Analysis:

Theory, Methods & Applications, vol. 65, pp. 963-983, 2006.

[۳۶] G. Flores, I. Lugo-Cárdenas, and R. Lozano, "A nonlinear path-following strategy for a fixed-wing MAV," in 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 1014-1021, 2013.

[۳۷] I. Lugo-Cárdenas, G. Flores, S. Salazar, and R. Lozano, "Dubins path generation for a fixed wing UAV," in 2014 International conference on unmanned aircraft systems (ICUAS), pp. 339-346, 2014.

[۳۸] ع. رودباری م. دهقانی محمدآبادی. ر. اسدی, اختصاص وظایف به تیم پهپادهای همکار با رویکرد ابتکاری برنامه‌ریزی فازی خطی صحیح در محیط دینامیک با اهداف متحرک، مجله مهندسی مکانیک ایران، ۱۳۹۸

[۳۹] .Yan, Peng, et al. "A Fixed Wing UAV Path Planning Algorithm Based On Genetic Algorithm and Dubins Curve Theory." MATEC Web of Conferences. Vol. 179. EDP Sciences, 2018.