

اختصاص وظایف به پهپادهای هم کار در یک محیط دینامیکی

رضا اسدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

اسماعیل خان میرزا*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

رضا معدولیت

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده

با توسعه روزافزون سیستم‌های هم کار در دهه‌های اخیر، توجه به ایجاد راهکار برای انجام بهینه و مناسب مأموریت‌ها، بیش‌تر از همیشه مورد نیاز می‌باشد. سیستم‌های هم کار، هم‌چون ربات‌ها و پهپادها در بسیاری از مأموریت‌های هم‌کاری هم‌چون عکس‌برداری و نقشه‌برداری هوایی و ارائه خدمات شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. اختصاص وظایف و طراحی مسیر، دو شاخه‌ی مهم در مسائل هم‌کار برای ایجاد بستر مناسب هم‌کاری هستند. در این مقاله، یک الگوریتم سلسله‌مراتبی اختصاص وظایف برپایه‌ی برنامه‌ریزی خطی صحیح توسعه داده شده است. هدف از این پژوهش، ارائه‌ی راهکاری جامع به منظور حل مسأله‌ی اختصاص وظایف با در نظر گرفتن وجود وظایف چندگانه بر روی اهداف متحرک خواهد بود. اهداف در این پژوهش به صورت ذرات متحرک که در هر مرحله از اجرای مسأله‌ی اختصاص، دارای موقعیت متفاوت می‌باشند، فرض شده است. تمام محدودیت‌های زمانی و غیرزمانی مورد نیاز این مسأله، به طور کامل خطی-ساز شده و در طول روند حل، تمامی آن‌ها ارضا خواهند شد. با در نظر گرفتن زمان بیشینه‌ی حرکت مناسب هر پهپاد، اولویت‌های مدنظر و تعیین نحوه‌ی حرکت اهداف و عامل‌ها، به حل بهینه‌ی اختصاص‌های مدنظر پرداخته می‌شود. مسأله‌ی پیش‌رو ماهیتی غیرخطی دارد و با در نظر گرفتن رویکرد حل سلسله-مراتبی در هر پنجره‌ی زمانی، خطی‌سازی لازم در این زمینه ایجاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: اختصاص وظایف، عامل‌های هم کار، برنامه‌ریزی خطی صحیح، اهداف متحرک، وظایف چندگانه.

Tasks Assignment for Cooperative Unmanned Aerial Vehicles in Dynamic Environment

R. Asadi

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

E. Khanmirza

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

R. Madoliat

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

According to recent achievements in multi-agent systems, the use of cooperative arrangement of the multi-agent systems like robots and UAVs such as rescuing, aerial mapping, aerial photography, and goods delivery missions is growing as fast as possible. Implementation a cooperative mission involves two Characteristic: Assigning tasks to each agent in optimally way and path planning of agents to their related tasks. In this article, a hierarchical approach based on linear programming algorithm is developed in order to solve task assignment problem with moving targets and multiple tasks on each target, which has a non-linear structure. Dynamic targets, which have variable position and their position change in every stage of algorithm as a time varying parameter, are considered. All the timing and non-timing constraint with the consideration of flight endurance time, priorities and the moving states of each agent and target will be satisfied. The most part of forming this hierarchical approach is assuming variable position for each target and solving the dynamic task assignment by linearization and discretization of time variables and using time windows for solving stage by stage.

Keywords: task assignment, Cooperative agents, Mixed-Integer Linear Programming, Moving targets, Multiple tasks.

۱- مقدمه

توانایی‌های این وسیله نقشی بی‌بدیل را ایفا می‌نماید. از جمله موارد استفاده از پهپادها، می‌توان در حیطه‌های نظارت بر ترافیک جاده، پوشش بی‌سیم، سنجش از دور، عملیات جست‌وجو و نجات، تحویل کالا، اطفاء حریق، امنیت و نظارت، کشاورزی دقیق اشاره نمود و نقش آن‌ها در کشورهای پیشرفته روزبه‌روز پررنگ‌تر می‌گردد [۲، ۳]. پس از ایجاد پیشرفت‌های قابل قبول در ساخت و توسعه پهپادها زمان توجه به مسائل جانبی و پیشرفته‌ی این حیطه فرارسیده بود. یکی از این زمینه‌ها را می‌توان هم‌کاری‌های تیمی در مجموعه‌ای از سیستم‌ها نامید. دلایل عمده‌ی این تمایل عبارتند از: مدیریت صحیح منابع، کنترل اطلاعات سراسری مأموریت‌های وسیع و افزایش توانمندی مجموعه‌ی هم کار نسبت به پهپادهای انفرادی [۴].

هوایماهای بدون سرنشین در زمانی حدوداً نزدیک به جنگ جهانی نخست (۱۹۱۶) به‌وجود آمدند. ارتش‌ها به‌زودی به مزایای بالقوه‌ی پرندهای بدون سرنشین و تلاش برای به‌پرواز درآوردن مکانیزم‌های پرند، بدون استفاده از یک خلبان موجود در هوایما پی بردند. در ابتدا این سیستم‌ها به‌صورت یک‌بار مصرف و برای منهدم نمودن تأسیسات دشمن مورد استفاده قرار می‌گرفت. امروزه پهپادها به‌عنوان سیستم‌هایی استفاده می‌گردند که پس از هر مأموریت بازیابی شده و جهت مأموریت‌های آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. امروزه پیشرفت و توسعه پهپادها وسیع‌تر شده است؛ به‌گونه‌ای که استفاده از پرندهای بدون سرنشین در بسیاری از کاربردهای غیرنظامی به‌دلیل استقرار ساده، هزینه‌ی نگهداری مناسب، و حوزه‌ی وسیع

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: khanmirza@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۸/۲۲

به‌طور جامع می‌توان مسائل هم‌کاری پهپادها را به دو زیرمجموعه اختصاص وظایف و طراحی مسیر^۱ پهپادها تقسیم نمود. این دو رویکرد جهت تکمیل مأموریت‌های هم‌کاری، با یکدیگر در ارتباط می‌باشند. پس از آگاهی از بار محاسباتی زیاد انجام این دو رویکرد به‌طور مشترک، اریچاردز و هم‌کاران رویکردی برای تجزیه‌ی مسائل هم‌کاری و حل جداگانه هر یک از مقوله‌های اختصاص وظایف و مسیریابی ارائه نمود. این کار به معماری کنترل اجازه می‌دهد که یک مسأله‌ی اختصاص وظایف در ابتدا برای تعیین یک ترتیب از اهداف را که هر عامل باید ملاقات نماید؛ ایجاد کند و سپس بر روی طراحی مسیرها بین عامل‌های هم‌کار و اهداف، متمرکز گردد [۵، ۶].

مسائل اختصاص وظایف، در حیطه‌ی مسائل تحقیق در عملیات جای می‌گیرند. این مسائل از نوع مسائل ان‌پی-سخت^۲ که یک کلاس مسأله‌ها می‌باشد که شامل چند هزار مسأله‌ی مختلف، با کاربردهای فراوان است که تاکنون برای آن‌ها راه حل قطعی و در زمان معقول یافت نشده است و به احتمال زیاد در آینده نیز یافت نخواهد شد. شوماخر یک مدل آنالیز برنامه‌ریزی خطی صحیح را برای حل مسأله‌ی اختصاص وظایف در حمله به اهداف زمینی توسط پهپادهای مشابه^۳، با معرفی متغیرهای تصمیم‌گیری غیرزمانی دودویی و متغیرهای زمانی پیوسته‌ی مثبت و انتخاب دو نوع محدودیت زمانی و غیرزمانی و خطی-سازای محدودیت‌های غیرخطی، یک مسأله‌ی با ویژگی‌های خطی را ایجاد نمود که به ازای هر هدف معرفی شده، چندین نوع وظیفه بر روی هر یک تعریف شده است [۷]. در ادامه این محقق به معرفی یک رویکرد سلسله‌مراتبی جهت حل مسائل تعقیب^۴ می‌پردازد.

نی یک مدل اختصاص وظایف با رویکرد برنامه‌ریزی خطی صحیح برپایه‌ی زمان برای پهپادهای هم‌کار و چندگانه در بهینه‌سازی حملات هوا به زمین در نظر گرفت [۸]. وانگ هویی تأثیر تهدید اهداف برای پهپادها را در مدل توزیعی برنامه‌ریزی خطی خود اضافه کرد و دقت اختصاص وظایف را بهینه نمود [۹]. بلینگهام یک رویکرد برای حل اختصاص وظایف و مسیریابی معرفی نمود؛ که تقریباً این دو مقوله را از هم جدا می‌نماید؛ تا مسأله از نظر پیچیدگی محاسباتی، قابل قبول گردد. قابل ذکر است که جنبه‌های ضروری اتصال بین آن‌ها برای دستیابی به بهینگی وجود خواهد داشت. رویکرد معرفی شده توسط بلینگهام، یک مسأله‌ی برنامه‌ریزی خطی صحیح بوده است که این روش، توانایی به‌کارگیری محدودیت‌های پیچیده‌تر هم‌چون محدودیت قابلیت‌های هر پهپاد که سبب می‌شود هر کدام از آن‌ها، وظایف و اهداف خاصی را بتوانند اجرا نمایند و یا محدودیت‌های زمانی مربوط به هر وظیفه در اهداف تعیین شده، که سبب می‌گردد هر وظیفه در محدوده-ی زمانی خاصی انجام شود؛ را داراست [۱۰].

علی‌قنبری در ادامه‌ی کار بلینگهام، با استفاده از الگوریتم گلبرگ^۵ معرفی شده در مراجع [۵، ۱۱]، برای کاهش زمان اختصاص‌ها توسط الگوریتم اختصاص وظایف افق پیشین^۶، تحقیقاتی انجام داد و توانست

یک مسأله‌ی اختصاص وظایف را در حضور نویز و اغتشاشات محیطی با رویکرد گفته شده در زمان مناسب حل نماید [۱۲]. در کنار کار روی الگوریتم‌های کلاسیک، تمرکز بر روی حل مسائل اختصاص وظایف با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری هم‌چون الگوریتم‌های حراج^{۱۱} [۱۳]، [۱۴]، الگوریتم‌های ازدحام ذرات^{۱۲} [۱۵]، ژنتیک [۱۶]، الگوریتم شبیه-سازی تبرید^{۱۳} [۱۷] و دیگر روش‌ها نیز مورد توجه محققین واقع شد. هر کدام از الگوریتم‌های کلاسیک و ابتکاری دارای مزیت‌ها و معایبی مختص به خود می‌باشد. الگوریتم‌های به‌دست آمده از الگوریتم‌های کلاسیک توانایی ایجاد راه‌حل‌های بهینه‌تر را دارا می‌باشند؛ حال آن‌که الگوریتم‌های ابتکاری به‌منظور حل سریع‌تر مسائل اختصاص وظایف به‌کار رفته اند.

۲- سناریوی اختصاص وظایف

فرض می‌کنیم تعداد N_t هدف جغرافیایی با نقاط اولیه حرکت تعیین شده داریم. هر کدام از این اهداف، دارای جهت و زاویه ثابت و از پیش تعیین شده می‌باشند. تعداد پهپادهای موجود در ناوگان به‌منظور انجام مأموریت هم‌کاری N_v می‌باشد. هر کدام از این پهپادها پس از انجام مأموریت خود، به نقطه‌ی مقصد تعیین شده مخصوص به خود می‌رود؛ بنابراین تعداد تمام گره‌های موجود $2 \times N_v + N_t$ است. به-منظور ایجاد عمومیت بیش‌تر برای مسأله، فرض می‌گردد مأموریت هم-کاری مدنظر، مأموریت امداد و نجات می‌باشد و در هر هدف، تعداد سه وظیفه جهت انجام، فرض شده است:

۱. عملیات شناسایی

۲. عملیات امداد رسانی

۳. عملیات تأیید مأموریت

زمان حرکت پهپاد شماره‌ی v از گره شماره i به گره شماره j به-منظور انجام وظیفه k ام در گره j ام در زمان تکرار t ام را با اندیس $x_{i,j}^{v,k,t}$ نمایش داده می‌شود.

وظایف معرفی شده در هر مأموریت باید به‌طور کامل رسیدگی شوند. مسأله‌ی اختصاص وظایف به ناوگان پهپادها در یک تیم هم‌کار عبارتست از: اختصاص پهپادهای معرفی شده به هر وظیفه در اهداف تعیین شده به‌صورتی بهینه به‌منظور کمینه‌سازی تابع هدف مدنظر به-گونه‌ای که به هیچ وظیفه‌ای در هیچ هدفی، دوبرار اختصاص صورت نپذیرد و تمامی پهپادها پس از پایان عملیات خود، به نقطه‌ی مقصد حرکت نمایند.

در مسأله‌ی مدنظر به‌ازای هر پهپاد تعداد $(N_t + 1)^2$ متغیر تصمیم-گیری غیرزمانی معرفی می‌شود و برای تمامی پهپادها، مقدار این متغیرها $N_v \times (N_t + 1)^2$ می‌باشد که به صورت $x_{i,j}^{v,k,t}$ نمایش داده می-شود. در انتها نیز به‌منظور اعمال محدودیت‌های زمانی مربوط به این مسأله، متغیر معرف زمان حداکثر مداومت پروازی هر پهپاد یعنی T_v که نشان‌دهنده زمان مداومت پروازی پهپاد v ام است را معرفی می-نماییم.

¹ Path planning

² NP-hard

³ Isomorphic

⁴ Tracking

⁵ Petal

¹⁰ Receding Horizon Task Assignment (RHTA)

¹¹ Auction

¹² Particle Swarm Optimization (PSO)

¹³ Simulated annealing algorithm

۳- برنامه‌ریزی خطی صحیح

این رویکرد در حقیقت یک تخمین گسسته از دنیای واقعی که معرف نقاط شروع و پایان حرکت از اجزای مسیر پهپادها می‌باشد. گره-ها معرف موقعیت اهداف، نقاط شروع و نقاط مقصد پهپادها با محدوده-ی $1, \dots, N_t + 1$ می‌باشند؛ که گرهی $N_t + 1$ به‌ازای نقاط شروع، معرف نقطه‌ی شروع حرکت پهپادها و به‌ازای نقاط پایان، معرف نقطه‌ی مقصد حرکت پهپادها می‌باشد. الگوریتم برنامه‌ریزی خطی صحیح نیازمند اطلاعاتی در زمینه‌ی تابع هزینه و محدودیت‌های زمانی و غیرزمانی حاکم بر مسأله جهت ارائه پاسخی مناسب برای مسائل اختصاص وظایف است. جهت پوشش مسأله‌ی اختصاص وظایف با اهداف متحرک، معماری و محدودیت‌های مسأله به‌گونه‌ای تعریف می‌گردند که در مسأله‌ی مدنظر به‌صورت چندمرحله‌ای و در هر مرحله با-اختصاص حداکثر یک وظیفه به هر پهپاد انجام گردد.

$$C = \sum_{k=1}^3 \sum_{v=1}^{N_v} \sum_{i=1}^{N_t+1} \sum_{j=1}^{N_t+1} x_{i,j}^{v,k} \quad (1)$$

از آن‌جا که فرض شده است اهداف با گذشت زمان و در هر مرحله از اجرای الگوریتم، تغییر مکان می‌دهند؛ به همین دلیل فواصل بین آن‌ها و پهپادها که همان ضرایب لازم برای مسأله‌اند، در حال تغییر است. به‌همین دلیل به جای استفاده از $t_{ij}^{(v,k)}$ در تابع هزینه، از $t_{ij}^{v,k}$ استفاده می‌شود و بدین شکل تعریف می‌گردد: فاصله‌ی زمانی لازم که پهپاد v برای انجام وظیفه k روی گره z و از نقطه‌ی مبدأ i در زمان طی شده توسط پهپاد تا مرحله lit مسأله نیاز دارد. t_{it} معرف زمانی است که هر پهپاد تا شروع تکرار lit به‌منظور انجام وظایف خود طی نموده است.

۳-۳- محدودیت‌ها

پس از معرفی معماری مدنظر، مهم‌ترین چالش پیش رو تعیین دقیق محدودیت‌های مورد استفاده در مسأله‌ی اختصاص وظایف می‌باشد. یکی از نقاط قوت برنامه‌ریزی خطی، توانایی این شبکه در تعیین محدودیت‌ها می‌باشد. در پژوهش پیش‌رو متغیرهای تصمیم‌گیری زمانی و غیر زمانی تعریف شده است.

الف- محدودیت‌های غیرزمانی

این محدودیت‌ها بر روی متغیرهای غیرزمانی اعمال می‌گردد و فاکتور زمان و متغیرهای زمانی در آن نقشی ندارند. محدودیت‌های غیر زمانی تعیین شده برای مسأله عبارتند از:

۱. برای تمامی اهداف، در هر مرحله‌ی الگوریتم تمامی وظایف باید در هر کدام حداکثر یک‌بار انجام شوند. بنابراین داریم:

$$\sum_{v=1}^{N_v} \sum_{i=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} \leq 1, \quad k=1,2,3, \quad j=1, \dots, N_t \quad (2)$$

۲. به‌منظور عمومیت بخشیدن به ساختار مسأله، هیچ پهپادی در هیچ وظیفه‌ای از یک گره به خود آن گره اختصاص داده نمی‌شود:

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{v=1}^{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} x_{ii}^{(v,k)} = 0 \quad (3)$$

۳. در اجرای هر مرحله‌ی الگوریتم، هر پهپاد حداکثر یک‌بار می‌تواند به نقطه‌ی مقصد اختصاص داده شود:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_t+1} x_{i,N_t+1}^{(v,k)} \leq 1, \quad v=1, \dots, N_v \quad (4)$$

۴. در هر تکرار، هر پهپاد مدنظر، حداکثر یک‌بار می‌تواند از گره‌ی مبدأ به دیگر گره‌ها اختصاص داده شود:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_t+1} x_{N_t+1,j}^{(v,k)} \leq 1, \quad v=1, \dots, N_v \quad (5)$$

۵. برای هر پهپاد، تا ورودی به یک هدف صورت نپذیرد؛ خروجی نباید از آن هدف وجود داشته باشد:

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} \geq \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^{N_t+1} x_{jm}^{(v,k)}, \quad j=1, \dots, N_t, \quad v=1, \dots, N_v \quad (6)$$

۶. هر پهپاد در تمامی مراحل، حداکثر یک‌بار می‌تواند به یک هدف

۳-۱- متغیرهای تصمیم‌گیری

جهت اجرای الگوریتم اختصاص وظایف، به معرفی و استفاده از متغیرهای تصمیم‌گیری نیاز است که دو نوع عمده‌ی این متغیرها عبارتند از:

الف- متغیرهای تصمیم‌گیری باینری

زمانی که پهپاد شماره v به پرواز از گرهی i ام به گرهی z ام به منظور انجام وظیفه‌ی k ام بر روی هدف یا گرهی z ام اختصاص داده شود، متغیر تصمیم‌گیری باینری $x_{i,j}^{v,k}$ برابر یک می‌گردد و در غیر این‌صورت برابر صفر است. $x_{N_t+1,j}^{v,k}$ معرف حرکت از نقطه‌ی شروع برای پهپاد v ام، $x_{i,N_t+1}^{v,k}$ معرف حرکت از گرهی i ام به مقصد برای پهپاد v ام و همچنین $x_{N_t+1,N_t+1}^{v,k}$ معرف حرکت مستقیم از نقطه‌ی شروع به نقطه‌ی مقصد برای پهپاد v ام می‌باشد. اگر تعداد وظایف K و تعداد پهپادها N_v باشد؛ تعداد کل متغیرهای باینری مسأله‌ی اختصاص وظایف مد نظر برابر با $(N_t+1)^2 \times N_v \times K$ می‌باشد.

ب- متغیرهای تصمیم‌گیری پیوسته

به منظور آگاهی از عملکرد زمان انجام وظایف و بهبود آن، نیاز است تا متغیرهایی متناسب به زمان، روی وظایف تعیین گردند. همان‌طور که مشخص است این متغیرها از نوع حقیقی و مثبت می‌باشند. متغیر t_j^k به‌عنوان زمان انجام وظیفه‌ی k ام در هدف z ام معرفی می‌گردد. هم‌چنین یک زمان کلی اجرای مأموریت که برابر با t است را در نظر می‌گیریم. با وجود دو نوع متغیر زمانی و پیوسته‌ی معرفی شده، در مجموع تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری پیوسته $K \times N_t + 1$ خواهد شد.

۳-۲- تابع هزینه

به‌منظور تولید راه‌حل بهینه و تصمیم‌گیری در مورد اختصاص‌های در نظر گرفته شده برای پهپادها، تعریف یک تابع هزینه مناسب، مهم‌ترین بخش است. از آن‌جا که کمینه نمودن زمان کلی حرکت تمامی پهپادها یا مسافت کلی حرکت پهپادها در پژوهش مهم‌ترین هدف تعیین شده است؛ تابع هزینه‌ی مدنظر عبارتست از:

جهت اجرای وظایف اختصاص داده شود:

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} \leq 1, \quad j=1, \dots, N_t, \quad v=1, \dots, N_v \quad (7)$$

7. تعداد اختصاص‌های هر پیمان در هر مرحله الگوریتم، مقدار مشخصی می‌باشد که در مقاله پیش‌رو فرض شده است که تعداد اختصاص‌های هر پیمان در هر تکرار یک عدد می‌باشد:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_t+1} \sum_{j=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} = 1, \quad v=1, \dots, N_v \quad (8)$$

8. مجموع زمان تمامی اختصاص‌های صورت گرفته به یک پیمان می‌بایست کم‌تر از زمان مداومت پروازی آن پیمان باشد:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_t+1} \sum_{j=1}^{N_t+1} t_{ij}^{(v,k)} x_{ij}^{(v,k)} \leq T_v, \quad v=1, \dots, N_v \quad (9)$$

9. محدودیت مورد نیاز در صورت قطع ارتباط با سیستم مرکزی به هر دلیل و عدم توانایی پیمان جهت اختصاص وظایف بیشتر جهت اجرا:

$$\left(\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_t+1} \sum_{j=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} \right)_{it-1} = \left(\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_t+1} \sum_{j=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} \right)_{it-1} \quad (10)$$

محدودیت‌های زمانی ذکر شده تا این‌جا مختص حرکت پیمانها از یک گروه هدف به گروه دیگر می‌باشد. برای در نظر گرفتن نقاط شروع پیمانها از محدودیت‌های زیر کمک می‌گیریم:

$$t_j^k \leq t_{N_t+1,j}^{v,k} + (1 - x_{N_t+1,j}^{v,k}) N_v T \quad (18)$$

و همچنین:

$$t_j^k \geq t_{N_t+1,j}^{v,k} - (1 - x_{N_t+1,j}^{v,k}) N_v T \quad (19)$$

به ازای مقادیر:

$$v=1, \dots, N_v, \quad j=1, \dots, N_t, \quad k=1, \dots, K$$

به این ترتیب محدودیت‌های لازم جهت اجرای مناسب یک مسأله-ی اختصاص وظایف با اهدافی با موقعیت متفاوت در هر مرحله، معرفی شد. در این معماری حل که به‌صورت چند مرحله‌ای انجام می‌شود و در طی هر مرحله، تعداد خاصی اختصاص وظایف تعیین شده به ناوگان پیمادای اختصاص داده می‌شود، موقعیت اهداف ممکن است تغییر نماید که در هر مرحله، این تفاوت موقعیت ممکن برای اهداف، مورد توجه قرار می‌گیرد.

۴- نتایج

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم ارائه شده پرداخته می‌شود. معماری سلسله‌مراتبی در نظر گرفته شده در این بخش شامل فرضیات زیر می‌باشد:

- در هر مرحله‌ی اختصاص، بدون کاسته شدن از عمومیت مسأله، به هر پیمان یک وظیفه اختصاص داده می‌شود. قابل ذکر است که حد-اکثر تعداد اختصاص‌ها به هر پیمان، یک می‌باشد؛ و با توجه به متغیر بودن موقعیت مکانی اهداف در تکرارهای متفاوت، اختصاص بیش از یک وظیفه به هر پیمان با فرض متغیر بودن مکان پیمانها به‌خوبی سازگار نیست.

- هیچ‌کدام از پیمانهای در نظر گرفته شده برای مسأله، تأخیر در شروع ندارد.

- همه یا تعدادی از اهداف در مراحل مختلف اجرای مسأله اختصاص وظایف، تغییر مکان می‌دهند.

- پس از اجرای کامل اختصاص‌ها، هر پیمان به نقطه‌ی مقصد خود حرکت می‌نماید. به‌عبارت دیگر، هدف اختصاص بهینه‌ی اهداف به پیمانها می‌باشد و در طی روند اختصاص بهینه، فاصله‌ی پیمان تا مقصد لحاظ نمی‌گردد.

با مطرح شدن حالت دینامیکی محیط، استفاده از معماری برنامه-ریزی خطی صحیح کلاسیک، ناممکن می‌شود. به‌منظور پوشش ویژگی‌های غیرخطی مسأله، با اندکی تغییر در معماری برنامه‌ریزی خطی، از معماری سلسله‌مراتبی خطی صحیح استفاده می‌شود. این الگوریتم با گسسته سازی، سعی در حل نزدیک به بهینه‌ی مسأله‌ی اختصاص وظایف دارد.

۴-۱- شبیه‌سازی

به‌منظور آگاهی بیشتر نسبت به الگوریتم مدنظر در این پژوهش، به شبیه‌سازی و ارائه نتایج حاصل، برای چند حالت فرض شده پرداخته می‌شود. مسأله‌ی اختصاص وظایف برای دو حالت مختلف با تعداد پیمان

ب- محدودیت‌های زمانی

محدودیت‌های زمانی جهت اجرای مناسب و به ترتیب وظایف بر مسأله حاکم است. از آن‌جا که رویکرد این بخش، چندمرحله‌ای است؛ محدودیت‌های زمانی به تدریج تکمیل می‌گردند و در انتهای آخرین تکرار مسأله، می‌توان محدودیت‌های زمانی نهایی را به‌عنوان پاسخ مطلوب در نظر گرفت.

مدت زمان پایداری یا مداومت پروازی برای هر پیمان را با T_v نمایش می‌دهیم؛ تعریف می‌کنیم:

$$T = \max_v [T_v]_{v=1}^{N_v} \quad (11)$$

حال به تعریف دقیق محدودیت‌های زمانی خطی می‌پردازیم:

$$t_j^k \leq t_i^1 + t_{i,j}^{v,k} + (2 - x_{i,j}^{v,k} - \sum_{l=1, l \neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,1}) N_v T \quad (12)$$

$$t_j^k \geq t_i^1 + t_{i,j}^{v,k} - (2 - x_{i,j}^{v,k} - \sum_{l=1, l \neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,1}) N_v T \quad (13)$$

$$t_j^k \leq t_i^3 + t_{i,j}^{v,k} + (2 - x_{i,j}^{v,k} - \sum_{l=1, l \neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,3}) N_v T \quad (14)$$

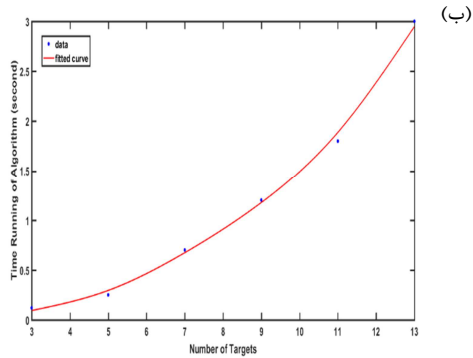
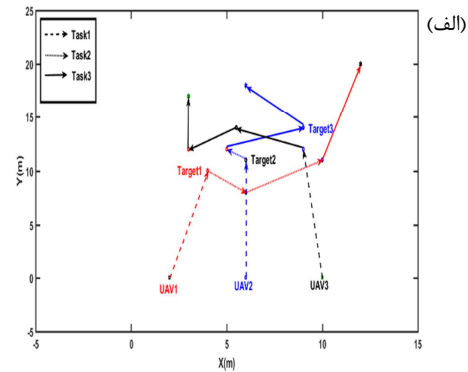
$$t_j^k \geq t_i^3 + t_{i,j}^{v,k} - (2 - x_{i,j}^{v,k} - \sum_{l=1, l \neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,3}) N_v T \quad (15)$$

$$t_j^k \leq t_i^2 + t_{i,j}^{v,k} + (2 - x_{i,j}^{v,k} - \sum_{l=1, l \neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,2}) N_v T \quad (16)$$

$$t_j^k \geq t_i^2 + t_{i,j}^{v,k} - (2 - x_{i,j}^{v,k} - \sum_{l=1, l \neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,2}) N_v T \quad (17)$$

که با ازای مقادیر روبرو برقرار است:

$$v=1, \dots, N_v, \quad i=1, \dots, N_t, \quad j=1, \dots, N_t, \quad i \neq j, \quad k=1, \dots, K$$



شکل ۱- اختصاص وظایف با تعداد $N_T = 3$ و $N_V = 3$
 (الف) شبیه‌سازی نقشه اختصاص وظایف اختصاص‌ها (ب) نمودار زمان
 حل الگوریتم به‌ازای تعداد متفاوت هدف

الگوریتم‌های کلاسیک برنامه‌ریزی خطی صحیح، با در نظر گرفتن تمام فضای حل مسئله، به جست‌وجوی بهینه‌ترین پاسخ موجود می‌پردازند. به منظور بررسی کارایی الگوریتم سلسله‌مراتبی مورد استفاده در این مقاله، به مقایسه‌ی عملکرد این الگوریتم در بهینه بودن پاسخ نهایی آن، با الگوریتم کلاسیک خطی صحیح پرداخته می‌شود.

به ترتیب ۳، ۴ و تعداد اهداف ۳، ۵ اجرا شده و شبیه‌سازی متعلق به هر یک ارائه شده است. برای آگاهی بیشتر نسبت به حالت‌های مفروض شبیه‌سازی شده در ابتدا جدول ۱ به ارائه جزئیات حالت‌های انتخاب شده می‌پردازد.

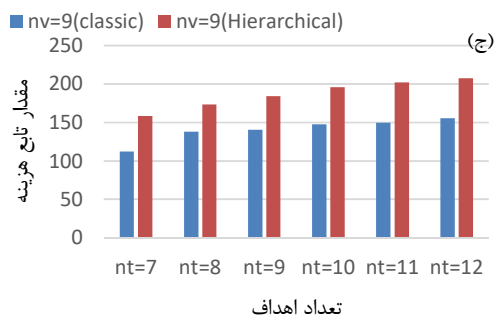
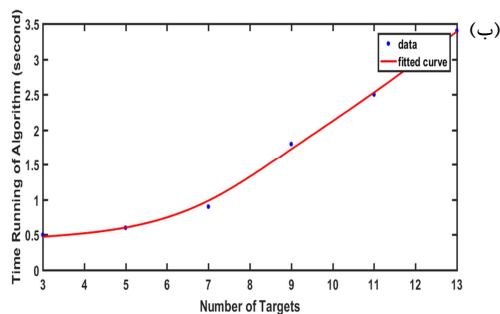
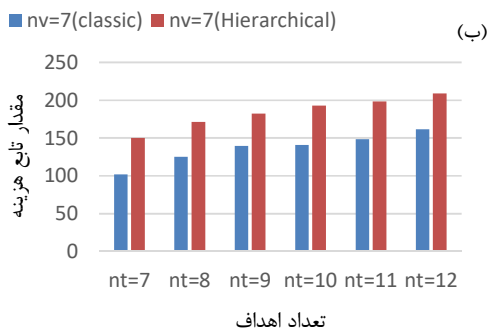
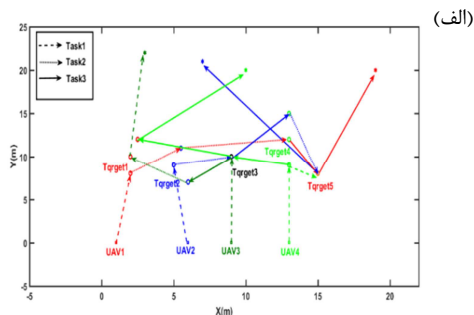
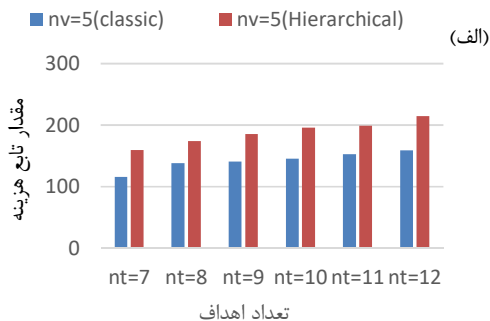
جدول ۱- مشخصات حالت‌های شبیه‌سازی شده

شبیه‌سازی ۲	شبیه‌سازی ۱	
۴	۳	تعداد پهپادها
۵	۳	تعداد اهداف
۴۳۲	۱۴۴	تعداد متغیرهای غیرزمانی
۱۶	۱۰	تعداد متغیرهای زمانی
۲	۰	تعداد اهداف موقعیت ثابت
متفاوت	متفاوت	موقعیت نقاط مقصد نسبت به هم

به‌عنوان نخستین شبیه‌سازی، در شکل ۱ مسئله اختصاص وظایف را برای تعداد سه پهپاد و سه هدف در نظر گرفته شده است. در این مسئله هیچ‌کدام از اهداف به‌صورت ثابت تا انتهای زمان اجرا در نظر گرفته نشده‌اند. در ادامه‌ی روند شبیه‌سازی، مسئله به ازای تعداد متفاوت اهداف برای سه پهپاد حل شده و زمان اجرای برنامه سنجیده شده است که در شکل ۱-ب روند تغییر زمان اجرا به نمایش درآمده است.

در دومین شبیه‌سازی ارائه شده که در شکل ۲ نمایش داده شده است؛ تعداد پهپادها و همچنین تعداد اهداف بیشتر شده است. چهار پهپاد به‌صورت هم‌کاری در محیطی با اهداف موقعیت متغیر و ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در این شبیه‌سازی اهداف شماره‌ی سه و پنج با موقعیت ثابت در تمامی مراحل اجرای الگوریتم در نظر گرفته شده‌اند. این ترکیب به‌منظور عمومیت بخشیدن به الگوریتم حل، فرض شده است.

همانند شبیه‌سازی قبل، در این مورد نیز مسئله اختصاص وظایف به چهار پهپاد فرض شده برای تعداد مختلف اهداف، حل شده و روند و میزان زمان مورد نیاز جهت حل این مسائل، به‌صورت نمودار در شکل ۲-ب نمایش داده شده است. قابل ذکر است که در تمامی شبیه‌سازی-های ارائه شده، محدودیت‌ها و فرضیات معرفی شده به‌طور کامل مدنظر قرار گرفته‌اند.

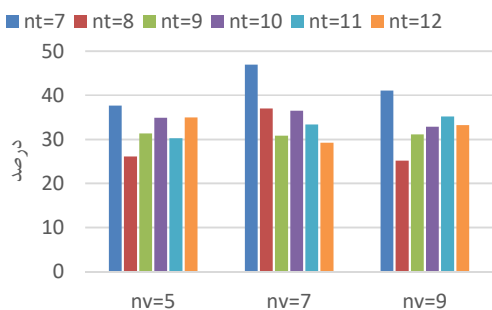


شکل ۲- اختصاص وظایف با تعداد $N_v = 4$ و $N_t = 5$

(الف) شبیه‌سازی نقشه اختصاص‌ها (ب) نمودار زمان حل الگوریتم به-ازای تعداد متفاوت هدف

شکل ۳- میزان توابع هزینه

(الف) میزان تابع هزینه نهایی برای تعداد ۵ پهپاد توسط دو الگوریتم کلاسیک و سلسله مراتبی (ب) میزان تابع هزینه نهایی برای تعداد ۷ پهپاد توسط دو الگوریتم کلاسیک و سلسله مراتبی (ج) میزان تابع هزینه نهایی برای تعداد ۹ پهپاد توسط دو الگوریتم کلاسیک و سلسله مراتبی



شکل ۴- درصد افزایش تابع هزینه ی معماری سلسله مراتبی نسبت به مسأله ی مشابه در معماری کلاسیک

باتوجه به متغیر بودن موقعیت اهداف، امکان حل مسأله توسط الگوریتم برنامه‌ریزی خطی کلاسیک، وجود ندارد. به‌منظور مقایسه‌ی کارکردهای مسأله با الگوریتم کلاسیک، فرض نموده‌ایم اهداف با سرعت صفر وجود دارند و سپس مسأله برای هر دو حالت کلاسیک و سلسله-مراتبی ارائه شده در مقاله حل شده است. در شکل ۳ به مقایسه‌ی تابع هزینه‌ی نهایی که زمان کلی اجرای مأموریت است برای هر دو رویکرد و با فرض تعداد ۵ پهپاد و هم‌چنین تعداد به‌ترتیب ۷ تا ۱۲ هدف یا به-عبارتی ۲۱ تا ۳۶ وظیفه پرداخته شده است. جهت به‌دست آوردن دید کامل‌تر نسبت به میزان افزایش تابع هزینه‌ی نهایی، در شکل ۴ به ارائه‌ی درصد تفاوت این دو رویکرد با درنظر گرفتن رویکرد کلاسیک به‌عنوان مرجع (با توجه به بهینه‌ی سرتاسری بودن پاسخ آن) برای تعداد ۵، ۷ و ۹ پهپاد و در هر کدام تعداد ۷ تا ۱۲ هدف پرداخته شده است و نتایج ارائه شده‌اند. قابل ذکر است این افزایش، نسبت به افزایش چندبرابری در الگوریتم‌های ابتکاری، کاملاً قابل قبول است.

• الگوریتم برنامه‌ریزی خطی کلاسیک برای حل، تمام فضای مسأله را در نظر می‌گیرد و این کار سبب تولید بهینه‌ترین راه حل موجود برای مسأله می‌گردد. اما این رویکرد هرچند پاسخ مناسب را داراست؛ برای رسیدن به پاسخ، زمان بالایی برای حل مسأله لازم دارد. به‌ویژه آن‌که با افزایش ابعاد مسأله و متغیرهای تصمیم‌گیری، زمان مورد نیاز این الگوریتم جهت دستیابی به پاسخ، به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. در مسائلی هم‌چون اختصاص وظایف به ناوگان پهپادها که نیازمند حل سریع و پاسخ به‌هنگام مسأله می‌باشد؛ الگوریتم کلاسیک با وجود پاسخ بهینه خود زمان زیادی جهت حل مسأله نیاز دارد به‌ویژه زمانی که ابعاد مسأله افزایش یابد. از این‌رو در ابعاد بالا و زمانی که پاسخ سریع مورد نیاز است؛ این الگوریتم مناسب نمی‌باشد اما با توجه به شبیه-سازی‌های ارائه شده و جدول ۲، می‌توان ادعا نمود که این الگوریتم زمان بسیار مناسبی جهت حل، لازم دارد. به‌ویژه باتوجه به ساختار حل مرحله‌ای آن، می‌توان در انتهای هر مرحله اختصاص‌های صورت گرفته در آن مرحله را استخراج نمود و جهت اجرا به ناوگان پهپادهای هم‌کار ارسال کرد. این ساختار علاوه بر زمان بسیار مناسب لازم برای حل مسأله، با توجه به اعلام مرحله‌ای اختصاص‌ها، کاملاً مناسب شرایط به-هنگام^۱ می‌باشد.

• باتوجه به این‌که رویکرد سلسله‌مراتبی برخلاف رویکرد کلاسیک برنامه‌ریزی خطی، تمام فضای مسأله را به‌صورت یک‌جا در نظر نمی‌گیرد به‌همین دلیل پاسخ‌های حاصل به بهینگی الگوریتم کلاسیک نیست. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، به‌طور میانگین این الگوریتم باعث افزایش ۳۰ تا ۳۵ توابع هزینه می‌گردد. اما از آن‌جایی که تنها این الگوریتم اصلاح شده قادر به حل مسائل با محیط دینامیک می‌باشد؛ هم‌چنین سرعت بالای این معماری جهت حل مسأله، سبب می‌گردد تا این رویکرد را رویکردی مناسب به‌جهت به‌کارگیری برای مسائل هم‌چون مسأله‌ی مفروض دانست. از جهتی میزان افزایش تابع هزینه توسط این رویکرد نسبت به اکثر رویکردهای فرآینت‌کاری کم‌تر و مناسب‌تر می‌باشد.

• رویکردهای برپایه‌ی برنامه‌ریزی خطی، رویکردهایی مناسب جهت ارضای تمامی محدودیت‌های مورد نیاز مسأله می‌باشند. به‌طور مثال محدودیتی هم‌چون محدودیت مداومت پروازی پهپادها، محدودیت میزان سوخت و دیگر موارد از جمله محدودیت‌های پرترفرداری هستند که در این الگوریتم قابل اعمال و حصول نهایی هستند. محدودیت مداومت پروازی در این مقاله معرفی و در نظر گرفته شده است. به‌گونه‌ای که طبق معادله (۱۹) تضمین می‌گردد هیچ پهپادی، بیش‌تر از زمان مداومت پروازی خود، به انجام مأموریت نمی‌پردازد.

• با توجه به حل تدریجی مسأله توسط این الگوریتم، در هر مرحله، با تکمیل شدن پاسخ‌های مراحل پیشین، می‌توان خروجی را در هر مرحله مشاهده و ناوگان را برای انجام مأموریت ارسال نمود و به تدریج، دیگر اختصاص‌ها را اضافه نمود. لذا می‌توان ادعا کرد که الگوریتم، براحتی قابل استفاده برای مسائل به‌هنگام است. با توجه به

فاکتور مهم دیگر در ارزیابی میزان کارایی یک الگوریتم در مسائل هم‌کار، زمان لازم جهت حل مسأله و ارائه پاسخ می‌باشد. در جدول ۲ مقایسه‌ای بین زمان پاسخ دو الگوریتم کلاسیک و سلسله‌مراتبی صورت پذیرفته است.

جدول ۲- زمان لازم برای پاسخ‌دهی الگوریتم‌های کلاسیک و سلسله-

مراتبی		
زمان حل الگوریتم کلاسیک (ثانیه)	زمان حل الگوریتم سلسله‌مراتبی (ثانیه)	
۳۹/۴۹	۰/۱۲۸۱	تعداد پهپادها=۳ تعداد اهداف=۳
۱۶۸/۰۲	۰/۳۳۲۰	تعداد پهپادها=۳ تعداد اهداف=۵
۱۲۱۴/۸۵	۰/۹۳۲۱	تعداد پهپادها=۵ تعداد اهداف=۵
۲۷۹۶/۷۸	۱/۸۸۷۰	تعداد پهپادها=۵ تعداد اهداف=۷
-	۴/۴۹۳۹	تعداد پهپادها=۵ تعداد اهداف=۹
-	۱۱/۸۸۴۷	تعداد پهپادها=۵ تعداد اهداف=۱۲

۵- نتیجه‌گیری

ارائه برنامه‌ی زمان‌بندی و ترتیب مأموریت‌ها برای هر عضو یک تیم هم‌کار، در هر عملیات هم‌کاری، نخستین و مهم‌ترین بخش تصمیم‌گیری می‌باشد. با توجه به ماهیت اکثر مسأله‌های هم‌کاری، ارائه این برنامه زمان‌بندی باید به‌صورت به‌هنگام یا در سریع‌ترین زمان ممکن صورت گیرد. به‌خصوص با مطرح شدن شرایط دینامیکی محیط، دو فاکتور بهینگی جواب‌های ارائه شده و سرعت پاسخ‌دهی، از مهم‌ترین فاکتورهای ارزیابی مناسب بودن معماری‌های پیشنهادی می‌باشند. در این مقاله یک معماری برگرفته شده از حالت کلاسیک، به‌نام الگوریتم سلسله‌مراتبی خطی صحیح ارائه شده است. این الگوریتم، تمامی فاکتورهای لازم برای پذیرفته شدن به‌عنوان الگوریتمی مناسب به‌منظور تصمیم‌گیری در مسائل هم‌کار را داراست.

از جمله مواردی که با بررسی الگوریتم‌های کلاسیک و سلسله-مراتبی خطی صحیح استنباط می‌گردد به شرح زیر است:

• در اکثر مسائل حوزه مکانیک، ورود به بحث شرایط دینامیک منجر به ایجاد نامعینی یا شرایط غیرخطی محیط می‌گردد. در این مقاله نیز فرض متحرک بودن و تغییر موقعیتی اهداف فرض شده در مسائل هم‌کاری ناوگان پهپادها، منجر به ایجاد شرایط غیرخطی برای حل مسأله می‌گردد. از آن‌جا که رویکرد مدنظر در این مقاله، استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی خطی صحیح است؛ حل مسأله، مشروط به خطی بودن ساختار مسأله می‌باشد. به‌همین علت استفاده از رویکرد کلاسیک این الگوریتم ناممکن است و ایجاد بستر مناسب حل مسائل غیرخطی با ایجاد ساختار سلسله‌مراتبی و گسسته‌سازی مسأله با رعایت چند-مرحله‌ای بودن مسأله، ممکن می‌گردد.

¹ Online

[4] Shima T. and Rasmussen S., *UAV cooperative decision and control: challenges and practical approaches*: SIAM, 2009.

[5] Bellingham J., Tillerson M., Richards A. and How J. P., Multi-task allocation and path planning for cooperating UAVs, in *Cooperative control: models, applications and algorithms*, ed: Springer, pp. 23-41, 2003.

[6] Richards A., Bellingham J., Tillerson M. and How J., Coordination and control of multiple UAVs, in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, p. 4588, 2002.

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

[8] NI Y., ZHOU D.-Y., MA Y.-h., and HE B.-c., The Air-to-Ground Tasks Assignment for Multi-UAV based Mixed Integer Linear Programming [J], *Fire Control and Command Control*, Vol. 11, p. 017, 2008.

[9] WANG H. and CHEN H., An Improved UAV Task Assignment Model with Time Constraints [J], *Electronics Optics & Control*, Vol. 2, p. 024, 2010.

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

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

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

[13] Mercker T., Casbeer D. W., Millet P. T. and Akella M. R., An extension of consensus-based auction algorithms for decentralized, time-constrained task assignment, in *American Control Conference (ACC), 2010*, pp. 6324-6329, 2010.

[14] Brunet L., Choi H.-L. and How J., Consensus-based auction approaches for decentralized task assignment, in *AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit*, p. 6839, 2008.

[15] Lin L., Qibo S., Shangguang W. and Fangchun Y., Research on pso based multiple uavs real-time task assignment, in *Control and Decision Conference (CCDC), 2013 25th Chinese*, pp. 1530-1536, 2013.

[16] Shima T. and Schumacher C., Assignment of cooperating UAVs to simultaneous tasks using genetic algorithms, in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, p. 5829, 2005.

[17] Kirkpatrick S., Gelatt C. D. and Vecchi M. P., Optimization by simulated annealing, *science*, Vol. 220, pp. 671-680, 1983.

مورد مطالعه‌ی معرفی شده، یعنی امداد رسانی، عموماً تعداد پهپادها و اهداف در حد متوسط می‌باشند. مسأله‌ی ارائه شده، دارای زمان حل مناسبی برای اهداف تا مقدار ۴۰ و هم‌چنین برای پهپادها تا مقدار ۱۰ تا ۱۵ عدد می‌باشد که برای مسائلی هم‌چون امداد و نجات، اطفای حریق و دیگر موارد، کاملاً پذیرفته شده است. با تبدیل مسأله به زبان C و هم‌چنین استفاده از روش‌های پردازش موازی این مقادیر به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

• قابل ذکر است تمامی مراحل ذکر شده توسط نرم‌افزار MATLAB 2016 و با سیستم حاوی پردازشگر core i7 سری intel و میزان حافظه ۸ گیگابایت صورت پذیرفته است.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های بی‌شائبه‌ی دانشگاه علم و صنعت تهران کمال قدردانی و سپاس‌گذاری را دارند.

۷- فهرست علائم

N_v	تعداد پهپادهای ناوگان
N_t	تعداد اهداف مسأله اختصاص وظایف
K	تعداد وظایف موجود در هر هدف
i	اندیس گره شروع
j	اندیس گره پایان
C	تابع هزینه
k	اندیس وظیفه
$t_{i,j}^{v,k}$	فاصله‌ی زمانی لازم که پهپاد v برای انجام وظیفه k روی گره j و از نقطه‌ی مبدأ i در زمان طی شده توسط پهپاد تا مرحله t ام مسأله نیاز دارد
t_j^k	زمان انجام مأمورت k بر روی گره j
T	زمان بیشینه مداومت پروازی بین تمامی پهپادها
T_v	مداومت پروازی پهپاد v ام
$x_{i,j}^{v,k}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری اختصاص وظیفه k روی گره j در حرکت از گره i برای پهپاد v ام
$x_{i,j}^{v,k} + 1$	متغیر تصمیم‌گیری باینری حرکت از گره شماره i برای پهپاد v ام
$x_{i,j}^{v,k} + 1$	متغیر تصمیم‌گیری باینری حرکت از نقطه شروع به گره شماره j برای پهپاد v ام

۸- مراجع

[1] Newcome L. R., *Unmanned aviation: a brief history of unmanned aerial vehicles*: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

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

[3] Shakhathreh H., Sawalmeh A., Al-Fuqaha A., Dou Z., Almaita E., Khalil I., et al., Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges, *arXiv preprint arXiv:1805.00881*, 2018.