نشریه مهندسی مکانیک
انجمن مهندسان مکانیک ایران
مقاله علمی پژوهشی
DOI: 10.30506/ijmep.2021.105849.1588

اختصاص وظایف به تیم پهپادهای هم‌کار با رویکرد ابتکاری برنامه‌ریزی فازی خطی صحیح در محیط دینامیک با اهداف متحرک

علی‌رضا رودباری[۱]
دانشیار

محسن دهقانی محمدآبادی[۲]
استادیار

در این مقاله، به بررسی اختصاص وظایف به تیمی متشکل از پهپادهای ناهم‌گون هم‌کار، در یک محیط دینامیکی و با اهداف متحرک پرداخته شده است. با استفاده از رویکرد سلسله مراتبی برنامه‌ریزی خطی صحیح، یک معماری مناسب جهت حل مسائل اختصاص وظایف با ابعاد در محدودهٔ مناسب، پرداخته شده است. جهت افزایش چشم‌انداز حل، توسط معماری معرفی شده و دستیابی به نتایج نزدیک به بهینهٔ سراسری، از تلفیق معماری مورد نظر با سیستم استنتاج فازی از نوع تی-اس-کا استفاده شده است. نتایج حاصل، مؤید یک راه‌حل بدون تضاد و بهینه جهت اختصاص وظایف به ناوگان پهپادهای هم‌کار می‌باشد. افزایش کارایی معماری ابتکاری معرفی شده با وجود سیستم‌های فازی، در حدود ۱۰ تا ۳۵ درصد می‌باشد. جهت سنجش رویکرد معرفی شده در شرایط تجربی و عملی، به طراحی و استفاده از یک پانل کاربری پرداخته شده و با کمک این پانل، توانایی اجرای عملی این رویکرد ارائه شده است.

واژه‌های راهنما : اختصاص وظایف، پهپادهای هم‌کار، برنامه‌ریزی خطی صحیح، اهداف متحرک، سیستم استنتاج فازی، پانل کاربری

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، هواپیماهای بدون سرنشین[۳] نقشی فزاینده را در کاربردهای نظامی اعم از شناسایی و حمله [۱] و هم‌چنین کاربردهای غیرنظامی هم‌چون تحویل کالا به مشتری، عملیات کنترل ترافیک شهری و نقشه‌برداری هوایی ایفا می‌نمایند [۲]. در پیاده‌سازی و اجرای مأموریت‌های پیچیده، پهپادها می‌توانند تیم‌هایی تشکیل دهند و به‌صورت هم‌کار اجرای وظیفه نمایند. نتیجه‌ی این استراتژی، بهبود عملکرد کلی تیم نسبت به مجموع تک پهپادها و اجرای بهینه‌تر وظایف و مأموریت‌های درنظر گرفته شد، می‌باشد. در زمینه‌ی پهپادهای هم‌کار، مکانیزم‌های تصمیم‌گیری و کنترل پهپادها، شامل اختصاص وظایف، مسیریابی شده و تصمیم‌گیری تیم‌های هم‌کار، اخیرا توجهات زیادی را به خود جلب نموده است.

---

[۱] نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ پرواز، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری a.roudbari@ssau.ac.ir
[۲] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری m.dehghani@ssau.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۹

[3] Unmanned Aerial Vehicles

هدف مسائل اختصاص وظایف به تیم‌های هم‌کار، دراصل اختصاص وظایف ضروری و تعیین ترتیب مناسب اجرای وظایف برای هرکدام از پهپادهای عامل[۱] به‌منظور بیشینه‌سازی عملکرد کلی تیم هم‌کار است. وضعیت و شرایط میدان مبارزه و محدوده‌ی عملکردی مجاز گروه پهپادها، به‌طور عمده در مسأله‌ی اختصاص وظایف تیم هم‌کار، درنظر گرفته می‌شود. مسائل اختصاص وظایف، به‌صورت عمده یک مسأله‌ی ان‌پی-سخت[۲] درنظر گرفته می‌شوند. به‌صورت جامع، حل مسائل اختصاص وظایف با سه رویکرد کلاسیک، ابتکاری و کلاسیک ابتکاری بررسی و حل گردیده‌اند. در روش‌های کلاسیک، با فرمول‌بندی مسأله، به‌وسیله‌ی یکی از رویکردهای دقیق، همچون شاخه و حد، شاخه و هزینه و دیگر موارد، حل مسأله‌ی اختصاص وظایف تعیین می‌گردد [۹-۳]. در روش‌های ابتکاری، با الهام از فرآیندهایی هم‌چون فرآیندهای زیست محیطی (الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و دیگر موارد) و یا فرآیندهایی چون حراج و تبرید و یا ترکیبی از فرآیندهای یاد شده، درصدد حل مسائل اختصاص وظایف در قالب این فرآیندها برمی‌آیند [۲, ۱۸-۱۰]. جهت بهره‌بردن از مزیت‌های الگوریتم‌های کلاسیک، که ارائه‌ی حل دقیق و بهینه است و الگوریتم‌های ابتکاری، که رسیدن به جواب نهایی در زمانی کوتاه است، محققان به بهبود عملکرد و توسعه‌ی رویکردهای کلاسیک با کمک از الگوریتم‌های ابتکاری پرداخته‌اند [۲۲-۱۹]. در راستای حل مسائل اختصاص وظایف به روش‌های کلاسیک، با کمک گرفتن از پژوهش‌های زیر صورت پذیرفته است:

کاسبیر[۳] و هالساپل[۴] از روش بهینه‌سازی شاخه-و-هزینه[۵] برای اختصاص وظایف با محدودیت[۶]های تقدم اجرای وظایف، استفاده نمودند [۴]. شوماخر[۷] و همکاران از یک الگوریتم برنامه‌ریزی خطی صحیح مبتنی بر زمان برای مأموریت شناسایی و حمله به اهداف زمینی توسط پهپادهای هم‌گون، استفاده نمودند [۵]. نی[۸] و همکاران برای پوشش حملات هوا به زمین، از یک الگوریتم برنامه‌ریزی خطی صحیح استفاده نمودند [۶]. بلینگهام[۹] و همکاران با جداسازی مسأله‌ی اختصاص وظایف و مسیریابی، درصدد کاهش بار محاسباتی این نوع مسائل با روش برنامه‌ریزی خطی صحیح برآمدند [۷]. علی قنبری و همکاران با استفاده از الگوریتم گلبرگ[۱۰] [۸] و با معرفی و استفاده از روش افق پیشین[۱۱] در مسائل اختصاص وظایف، در راستای کاهش زمانی محاسباتی مسأله‌های اختصاص وظایف گام نهادند [۹]. الگوریتم‌های فرا ابتکاری، با توجه به زمان بالای حل مورد نیاز در روش‌های کلاسیک که به‌دلیل درنظر گرفتن تمام فضای حل مسأله منجر به افزایش محاسبات مورد نیاز حل می‌گردد، مورد توجه محققان قرار گرفتند. در این زمینه، رویکردهای مختلفی مورد توجه قرار گرفت که بعضا با ترکیب این روش‌ها، تلاش‌هایی جهت بهبود عملکرد روش‌های ابتکاری صورت پذیرفت.

---

[1] Agent
[2] NP-hard
[3] Casbeer
[4] Holsapple
[5] Branch-and-price
[6] Constraint
[7] Schumacher
[8] Y Ni
[9] John Saunders Bellingham
[10] Petal
[11] Receding Horizon

ژیا[1] و همکاران، جهت کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی مسائل اختصاص وظایف در محیط استاتیک به تیم پهپادها با در نظر گرفتن قیود زمانی و منابع، از یک رویکرد بهبود یافته بر پایه الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند [۱۶]. آقای ژیانک و همکاران[2]، با استفاده از یک رویکرد توسعه داده شده‌ی ازدحام ذرات به حل مسأله‌ی اختصاص وظایف با وجود محدودیت‌های چندگانه (هم‌چون پنجره‌ی زمانی، محدودیت‌های پهپادها، ضرایب وزنی و دیگر موارد) در لجستیک و لشگرکشی تیم پهپادها پرداخته و با الگوریتم ژنتیک مقایسه نموده است [۱۷]. شافرمن[3] و همکاران با اعمال محدودیت‌های پویا برای اطمینان از مسیرهای قابل پرواز از یک الگوریتم جست‌وجوی تصادفی برای بهبود راه‌حل‌های مناسب مسأله‌ی اختصاص وظایف کمک گرفتند [۱۲]. چوی[4] و همکاران، یک مسأله‌ی اختصاص وظایف غیرمتمرکز شامل یک استراتژی بر مبنای بازار[5] برای پهپادهای هم‌کار، را از طریق مذاکره معرفی نمودند. از دیگر الگوریتم‌های ابتکاری می‌توان به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم کلونی مورچگان و الگوریتم پرندگان [۲۳] اشاره نمود. محققان با ترکیب روش‌های ابتکاری، زمینه تحقیقات جامع‌تری را فراهم نمودند. از یک الگوریتم ترکیبی حراج و اجماع، جهت اجرای وظایف با وجود محدودیت‌های موجود در زمان باقیمانده‌ی پرواز هر پهپاد و محدودیت منابع و اهداف، استفاده شد [۱۳]. ژو[6] و همکاران، با استفاده از یک رویکرد ترکیبی شامل ازدحام ذرات و شبیه‌سازی تبرید، برای حل مسائل اختصاص وظایف جهت ارزیابی سریع در حادثه‌ی زمین لرزه، تلاش نموده است [۱۸]. آقای گامری[7] و همکاران، در طی پژوهش خود در عملیات اطفای حریق با اهداف موقعیت ثابت و شناخته شده، با استفاده از الگوریتم حراج، به پهپادهای موجود در تیم‌های کوچک‌تر از تیم کلی، یک دسته وظایف اختصاص می‌دهد و در ادامه با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، ترتیب اجرای وظایف برای هر پهپاد مشخص می‌گردد [۲]. از دیگر روش‌های ترکیبی در مسائل اختصاص وظایف تیم‌های پهپادهای هم‌کار، می‌توان به رویکردهای ترکیبی فازی و ازدحام ذرات [۱۵] و الگوریتم دو قسمتی MTWPS[8] [۲۴] اشاره نمود. در حیطه‌ی اختصاص وظایف به روش کلاسیک ابتکاری، پژوهش‌های متفاوتی صورت پذیرفته است.

لیو[9] و همکاران، یک بهینه‌سازی سلسله مراتبی بر مبنای پیروی از رهبر برای طراحی مسیر به هنگام، براساس برنامه‌ریزی دوسطحی[10] را معرفی نمودند [۲۱]. با استفاده از رویکرد سلسله مراتبی، تعدادی از محققان، با تقسیم مسأله‌ی اختصاص وظایف را، به چند قسمت و حل هر مرحله توسط الگوریتم‌های بهبودیافته‌ی کلاسیک، سعی در بهبود انجام این روش‌ها داشته‌اند [۱۹, ۲۰]. آقای سانگ[11] و همکاران، برای مسأله‌ی تحویل تدارکات توسط تیم پهپادها از یک روش برنامه‌ریزی خطی بهبودیافته با روش اختصاص وظایف کران پیشین[12]

---

[1] Jia
[2] Jiang
[3] Shaferman
[4] Choi
[5] Market-based
[6] Zhu
[7] Ghamry
[8] two-part wolf pack search algorithm
[9] Liu
[10] Bi-Level programming
[11] Song
[12] Receding Horizon Task Assignment (RHTA)

استفاده نمودند. علاوه بر تحقیقات معرفی شده، محققان تلاش‌هایی جهت پوشش مسأله‌ی اختصاص وظایف در کاربردها و شرایط متفاوت دیگری اعم از سیستم تحویل کالا، جمع آوری داده‌ها و تصاویر، اطفای حریق، نبردهای ضد رادار انجام داده‌اند [۲۸-۲۵]. در زمینه‌ی اعمال شرایط دینامیکی اهداف و محیط، پژوهش‌هایی در راستای ردیابی اهداف پس از تعیین وظایف اختصاص داده شده، صورت پذیرفته است [۱۴, ۲۹, ۳۰].

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی اختصاص وظایف، اجرای مسائل اختصاص وظایف با رویکردهای متنوع، به راحتی قابل استنباط می‌باشد. توجه به شرایط دینامیکی محیط و متحرک بودن اهداف، از جمله موضوعاتی است که نیازمند توجه بیش‌تر می‌باشد. در پژوهش‌های صورت گرفته، دینامیک بودن اهداف تعیین شده تنها با ردیابی پس از اختصاص عامل‌های ناوگان هم‌کار، پوشش داده شده است در حالی‌که اعمال این ویژگی در معماری تصمیم‌گیرنده، نقش مهمی در کاهش تابع هزینه و افزایش کارایی مأموریت‌های تیم‌های پهپادهای هم‌کار دارد.

در پژوهش پیش رو، از یک الگوریتم سلسله مراتبی خطی صحیح جهت پوشش مسأله‌ی اختصاص وظایف پهپادهای هم‌کار هم‌گون یا ناهم‌گون با فرض متحرک بودن اهداف تعیین شده جهت اجرا، به عنوان عامل دینامیکی محیط استفاده شده است. از آن‌جا که الگوریتم‌های ابتکاری و ابتکاری کلاسیک دارای پاسخ‌های بهینه‌ی محلی‌اند، جهت بهبود عملکرد این شبکه و حصول پاسخ‌های بهینه‌تر و نزدیک‌تر به بهینه‌ی کلی، از سیستم‌های منطق فازی کمک گرفته و نتایج مقایسه شده‌اند. در ابتدا به معرفی سناریوی مدنظر در اختصاص ناوگان پهپادها و چرایی انتخاب رویکرد کلاسیک ابتکاری پرداخته می‌شود و نوع سیستم فازی و متغیرهای موردنظر معرفی می‌گردد. در ادامه به ارائه‌ی قیود و روابط مورد نیاز پرداخته می‌شود. در انتها با معرفی شبیه‌سازی‌های لازم، به مقایسه‌ی عملکرد سیستم فازی معرفی شده نسبت به رویکرد سلسله مراتبی، اشاره می‌گردد. در انتها نتیجه‌ی حاصل از پژوهش بیان می‌گردد.

۲- سناریوی اختصاص وظایف

به منظور پیاده‌سازی مأموریت‌های چندهدفه‌ی شناسایی و حمله به اهداف زمینی مشخص، فرض می‌گردد تعداد N_t هدف تعیین شده با مختصات جغرافیایی مشخص، وجود دارد. طبق فرض دینامیک بودن اهداف، هرکدام از اهداف تعیین شده دارای سرعت حرکت و جهت حرکت مختص به خود می‌باشد. ناوگان پهپادی اختصاص داده شده به مسأله، دارای N_v پهپاد آماده‌ی اختصاص می‌باشد. فرض می‌گردد؛ تمامی پهپادهای مفروض دارای نقطه‌ی شروع مشخص و همچنین نقطه‌ی مقصد مختص به خود در پایان پیاده‌سازی تمامی مأموریت‌ها می‌باشند. مأموریت مفروض برای الگوریتم ارائه شده، عبارتست از: اجرای مأموریت شناسایی و حمله به اهداف زمینی با فرض وجود وظایف چندگانه در هر هدف و اجرا توسط تیم هم‌کار از ناوگان پهپادی.

تمامی اهداف، دارای سه وظیفه‌ی از پیش تعیین شده در هرکدام می‌باشند:

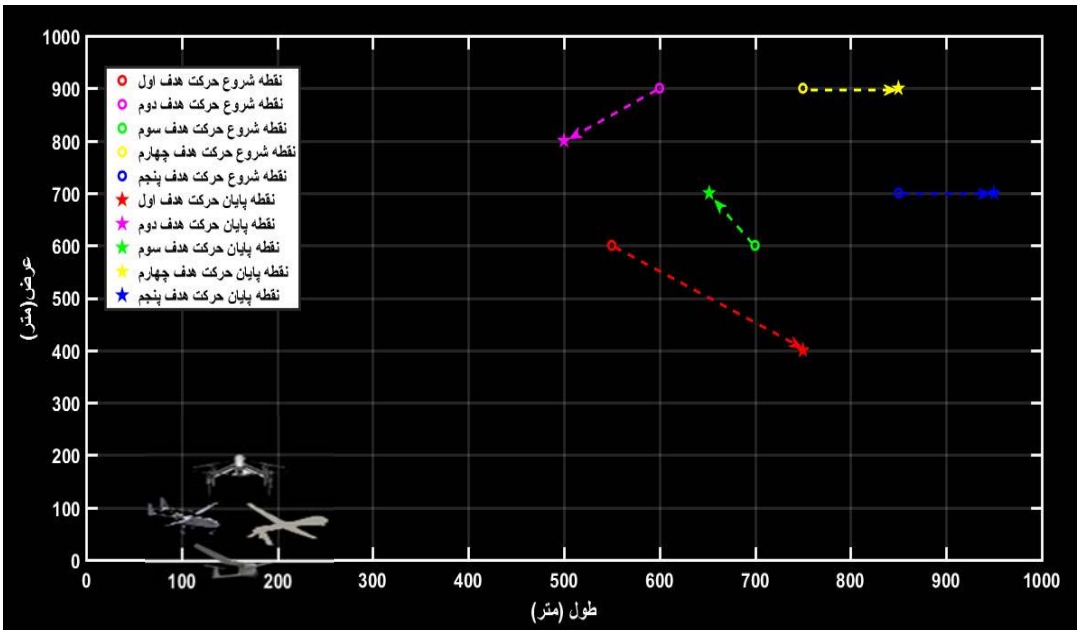
۱- شناسایی اهداف و جزئیات آن‌ها
۲- عملیات حمله به اهداف تعیین شده
۳- عملیات تأیید موفقیت اجرا

در طول اجرای مأموریت توسط ناوگان پهپادهای هم‌کار، فرض می‌گردد هر کدام از وظایف تعریف شده در اهداف، میتواند توسط پهپادهای متمایز انجام گردد و هیچ لزومی برای اجرای تمامی وظایف انجام شده در یک هدف، توسط یک پهپاد ثابت وجود ندارد. پهپادهای اختصاص یافته پس از اجرای هر وظیفه، به انجام وظایف اختصاص یافته در مراحل بعدی می‌پردازند و در انتها به نقاط مقصد خود وارد می‌گردند. تمامی اهداف تعیین شده دارای سرعت حرکت و جهت حرکت مختص به خود می‌باشند. معماری حل باید به‌گونه‌ای طراحی شود تا شرایط دینامیکی ذکر شده را پوشش دهد. در شکل (۱) نمونه‌ای از یک مسألهٔ اختصاص وظایف با اهداف متحرک ارائه شده است.

اختصاص وظایف باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که تابع هزینه تعیین شده برای مسأله، کمینه گردد و اختصاص‌ها به‌گونه‌ای تعیین گردند که به هر وظیفه‌ای در اهداف تعیین شده، یک و تنها یک اختصاص صورت پذیرد. هم‌چنین ترتیب زمانی مأموریت‌ها حفظ گردد. به‌گونه‌ای که شناسایی، پیش از حمله و هم‌چنین حمله، پیش از تأیید مأموریت، اختصاص یابد. در راستای اجرای پیوسته و بدون تضاد مسأله‌ی اختصاص وظایف، انتخاب مناسب تابع هزینه کلی مسأله و هم‌چنین تعیین و ارضای تمامی قیود مورد نیاز، لازم و ضروری است.

۳-الگوریتم‌های اختصاص وظایف

از آن‌جا که حملات هوایی و عملیات شناسایی، مأموریتی حساس و دقیق است و نیاز به دقت بالا و ریسک حداقل دارد؛ انتخاب رویکرد مناسب و دقیق، اصلی انکارناپذیر است. جهت اجرای مسأله‌ی اختصاص وظایف با توجه به فرض متوسط بودن سایز مسأله و نیاز به راه حل قابل اعتمادتر نسبت به روش‌های ابتکاری، از الگوریتم سلسله مراتبی خطی صحیح جهت پوشش فرض متحرک بودن اهداف و از سیستم منطق فازی جهت بالا بردن کارایی الگوریتم استفاده می‌نماییم. در ادامه به توضیح هر دو جزء پرداخته می‌شود.



شکل ۱- شماتیک یک مسألهٔ اختصاص وظایف با اهداف متحرک

۳-۱- الگوریتم سلسله مراتبی خطی صحیح

باتوجه به فرض متحرک بودن اهداف تعیین شده، استنباط می‌گردد که تمامی فواصل بین اهداف و هم‌چنین فواصل بین پهپادها و اهداف با زمان تغییر می‌نمایند. لذا لازم است تا معماری مورد نظر، این ویژگی را پوشش دهد. با توجه به الگوریتم مفروض در این بخش، برای پوشش این ویژگی، سعی شده است تا تخمینی گسسته از میدان مبارزه در نظر گرفته شود به نحوی که پس از هر اختصاص به هر پهپاد و ارسال عامل‌های هم‌کار برای اجرای وظایف، در پنجره‌ی زمانی بعدی، تغییرات موقعیتی اهداف و در ادامه تغییرات فواصل زمانی و مکانی لحاظ گردد. به همین دلیل، افق پیش‌روی هر پهپاد برای اختصاص وظایف بهینه به خود در هر مرحله، با پهپادهای دیگر متفاوت است.

الف- متغیرهای تصمیم‌گیری

اجرای الگوریتم اختصاص وظایف نیازمند به معرفی متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشد. دو نوع متغیر مورد استفاده در الگوریتم، عبارتند از:

۱- متغیرهای تصمیم‌گیری پیوسته

به منظور پیاده‌سازی مسائل اختصاص وظایف، نیاز به متغیرهایی پیوسته از جنس زمان داریم تا بتوان برنامه‌ی زمانی شروع حرکت، پایان هر مأموریت و هم چنین زمان پرواز ناوگان پهپادها را تعیین و در زمینه‌ی اختصاص وظایف به پهپادهای مختلف، تصمیم‌گیری نمود. اگر نقطه‌ی شروع حرکت پهپادها در هر مرحله از مأموریت را i و نقطه‌ی مقصد در همان مرحله را j در نظر بگیریم؛ جدول (۱)، معرف متغیرهای پیوسته‌ی مورد استفاده می‌باشد.

۲- متغیرهای تصمیم‌گیری باینری

بعد از معرفی متغیرهای تصمیم‌گیری پیوسته، برای تصمیم‌گیری در مورد اختصاص یا عدم اختصاص یک وظیفه به یک پهپاد، نیاز به معرفی و استفاده از متغیرهای باینری می‌باشد.

متغیر $x_{i,j}^{v,k}$ عبارتست از: متغیر باینری تصمیم‌گیری اختصاص وظایف به‌گونه‌ای که اگر پهپاد شماره‌ی vام به منظور انجام وظیفه‌ی kام بر روی هدف jام، از نقطهٔ شروع iام اختصاص داده شود؛ برابر یک می‌گردد و در غیر این صورت دارای مقدار صفر است. دقت شود که تعداد نقاط شروع برابر N_t+1 می‌باشد و نقطهٔ انتهایی مربوط به حرکت از مبدأ به سمت اهداف است. به همین صورت برای نقاط پایان نیز تعداد برابر N_t+1 می‌باشد و نقطهٔ انتهایی مختص حرکت به سمت مقصد می‌باشد.

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 توسط پهپاد vام برای انجام وظیفهٔ kام	$t_{i,j}^{v,k}$
زمان اتمام مأموریت اختصاص وظایف توسط ناوگان پهپادها	t

ب- تابع هزینه

تولید راه‌حل بهینه و تصمیم‌گیری درخصوص اختصاص کدام وظیفه به هرکدام از پهپادها نیازمند معیاری جهت سنجش است. تابع هزینه فراهم کنندهٔ این معیار می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که با انتخاب مناسب معیار سنجش هزینه‌ها، انتخاب وظایف و ترتیب اختصاص آن‌ها به سادگی میسر خواهد شد. به‌طور کلی، دو مقوله جهت کاهش هزینه‌ها مورد توجه است. گزینهٔ نخست کاهش مسافت کلی طی شده توسط ناوگان پهپادی که منجر به طی شدن کوتاه‌ترین مسیر جهت اجرای مأموریت می‌گردد و نتیجهٔ آن کاهش مصرف سوخت می‌باشد. دومین مقوله، به پایان رساندن هرچه سریع‌تر مأموریت حتی در صورت طی شدن مسیر بیشتر توسط تیم‌های پهپادی است. تابع هزینهٔ مد نظر در این پژوهش، یک تابع چند هدفه با در نظر گرفتن تمامی این موارد می‌باشد و به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$J=\alpha_1[\sum_{k=1}^{3}\sum_{v=1}^{N_v}\sum_{i=1}^{N_t+1}\sum_{j=1}^{N_t+1} t_{i,j^{t_{it}}}^{v,k} x_{i,j}^{v,k}]+(1-\alpha_1)[t+c_j^k\times t_j^k] \qquad (۱)$$

متغیرهای α_1 میزان اهمیت هرکدام 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 مجموعی است که توسط ناوگان پهپادی طی شده است. از آن‌جا که فواصل و در نتیجه زمان‌های بین اهداف و پهپادها 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 پهپاد شمارهٔ v به منظور اجرای مأموریت k روی هدف jام زمانی که از نقطهٔ iام حرکت می‌نماید.

قسمت دوم تابع هزینه مربوط به کاهش زمان اتمام مأموریت کلی است. t_j^k معرف 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 بر روی اهداف، تعیین می‌گردد.

ج- محدودیت‌های مأموریت

توانایی فرمول‌بندی و اجرای محدودیت‌ها، یکی از نقاط قوت برنامه‌ریزی خطی نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. پس از معرفی برنامه‌ریزی سلسله مراتبی خطی، نوبت به معرفی محدودیت‌های زمانی و بدون زمان مسألهٔ در نظر گرفته شده می‌باشد.

محدودیت‌های بدون زمان

محدودیت‌هایی در این دسته قرار می‌گیرند که مرتبط با زمان و محدودیت‌های زمانی از قبیل ترتیب انجام وظایف نباشند. مهم‌ترین محدودیت‌های بدون زمان عبارتند از:

۱- هر پهپاد تنها یک‌بار می‌تواند از نقطهٔ شروع به سمت اهداف یا مقصد حرکت نماید و هم‌چنین تنها یک‌بار در طول مأموریت خود می‌تواند از هر نقطه‌ای به مقصد در نظر گرفته شده وارد شود:

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{N_t+1} x_{N_t+1,j}^{(v,k)} \le 1, \qquad v=1,\dots,N_V \qquad (۲)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N_t+1} x_{i,N_t+1}^{(v,k)} \le 1, \quad v = 1,..., N_V \qquad (۳)$$

۲- محدودیت در میزان تجهیزات یا ظرفیت‌های هر پهپاد، به‌عنوان مثال، محدودیت در مواد منفجره و بمب‌های حمل شده توسط هر پهپاد که منجر به محدودیت در تعداد اهدافی است که یک پهپاد می‌تواند به آن حمله نماید و β_1^v میزان محدودیت برای هر پهپاد در هر وظیفهٔ در نظر گرفته شده است:

$$\sum_{i=1}^{N_t+1}\sum_{j=1}^{N_t+1} x_{i,j}^{(v,t)} \le \beta_1^v, \quad v = 1,..., N_V; \quad k = 1,2,3 \qquad (۴)$$

۳- هر وظیفه در هر هدف یک و تنها یک بار باید انجام شود:

$$\sum_{v=1}^{N_v}\sum_{i=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} \le 1, \quad k = 1,2,3\ , \quad j = 1,\ldots,N_t \qquad (۵)$$

۴- هر پهپاد تنها یک وظیفه روی هر هدف را می‌تواند انجام دهد و هیچ پهپادی بیش از یک بار به یک هدف اختصاص داده نمی‌شود:

$$\sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} \le 1\ , \ j = 1,\ldots, N_t\ , \ v = 1,..., N_V \qquad (۶)$$

۵- به دلیل متحرک بودن اهداف و در نتیجه تغییر پیوسته‌ی فواصل بین اجزاء، در هر مرحله حداکثر یک وظیفه به هر پهپاد اختصاص می‌یابد:

$$(\sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{N_t+1}\sum_{i=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)})^{it} \le 1, \ v = 1,..., N_V \qquad (۷)$$

۶- به منظور عدم توقف یک پهپاد در یک هدف پس از انجام یک وظیفه تعیین دستهٔ محدودیت‌های پیوستگی زیر لازم است:

$$\sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{N_t+1} x_{ij}^{(v,k)} \ge \sum_{k=1}^{N_k}\sum_{m=1}^{N_t+1} x_{j,m}^{(v,k)}, \ j = 1,..., N_t\ ;\ v=1,...,N_V \qquad (۸)$$

۷- هیچ پهپادی از یک گره، به خود آن گره اختصاص داده نمی‌شود.

$$\sum_{t=1}^{N_k}\sum_{i=1}^{N_{t+1}} x_{ii}^{(v,k)} = 0, v = 1,...., N_V \qquad (۹)$$

۸- محدودیت مصرف سوخت برای هر پهپاد میزان مشخصی است که در اختصاص وظایف، به منظور عدم اختصاص وظایف، بیش از ظرفیت سوخت هر پهپاد باید مورد توجه قرار گیرد.

$$\sum_{k=1}^{N_k}\sum_{i=1}^{N_v}\sum_{j=1}^{N_v} x_{i,j}^{(v,k)} \times d_{i,j}^{(v,k)} \times m^v \le C^v \qquad (۱۰)$$

که m^v میزان مصرف سوخت هر پهپاد و c^v حداکثر ظرفیت طی مسافت برای هر پهپاد است.

محدودیت‌های زمانی

محدودیت‌های زمانی به منظور اجرای درست و به ترتیب وظایف در طی اختصاص وظایف به ناوگان پهپادها و به دست آوردن راه‌حل‌های شدنی و قابل قبول از نظر زمانی، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

اگر مداومت پروازی پهپاد vام را با T_v نشان دهیم طبق تعریف داریم:

$$T = \max_V [T_V]_{V=1}^{N_v} \quad (۱۱)$$

فرم غیرخطی محدودیت‌های زمانی، به شکل زیر می‌باشد:

$$t_j^k = \sum_{v=1}^{N_v} \sum_{i=l,i\neq j}^{N_t+1} [(t_i^1 + t_{i,j}^{(v,k)}) \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{(v,1)} + (t_i^3 + t_{i,j}^{(v,k)}) \times \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{(v,3)}] x_{i,j}^{(v,k)} \quad (۱۲)$$

$$t_j^k = \sum_{v=1}^{N_v} \sum_{i=l,i\neq j}^{N_t+1} [(t_i^1 + t_{i,j}^{(v,k)}) \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{(v,1)} + (t_i^3 + t_{i,j}^{(v,k)}) \times \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{(v,3)}] x_{i,j}^{(v,k)} \quad (۱۳)$$

که با خطی‌سازی به محدودیت‌های مورد نیاز برای مسألهٔ برنامه‌ریزی خطی صحیح مورد نیاز می‌رسیم. دسته محدودیت‌های زیر مختص به حرکت پهپادها بین اهداف متفاوت است:

$$t_j^k \leq t_i^1 + t_{i,j^{t_{it}}}^{(v,k)} + (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,1}) N_V T \quad (۱۴)$$

$$t_j^k \geq t_i^1 + t_{i,j^{t_{it}}}^{(v,k)} - (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,1}) N_V T \quad (۱۵)$$

$$t_j^k \leq t_i^3 + t_{i,j^{t_{it}}}^{v,k} + (2 - x_{i,j}^{v,k} - \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{v,3}) N_V T \quad (۱۶)$$

$$t_j^k \geq t_i^3 + t_{i,j^{t_{it}}}^{(v,k)} - (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{(v,3)}) N_V T \quad (۱۷)$$

$$t_j^k \leq t_i^2 + t_{i,j^{t_{it}}}^{(v,k)} + (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{(v,2)}) N_V T \quad (۱۸)$$

$$t_j^k \geq t_i^2 + t_{i,j^{t_{it}}}^{(v,k)} - (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=l,l\neq i}^{N_t+1} x_{l,i}^{(v,2)}) N_V T \quad (۱۹)$$

به ازای: $k = 1,\ldots,N_k$ ، $i \neq j$ ، $j = 1,\ldots,N_t$ ، $i = 1,\ldots,N_t$ و $v = 1,\ldots,N_v$ در دسته محدودیت‌های بعدی، محدودیت‌های زمانی حرکت از نقاط شروع پهپادها نیز در نظر گرفته می‌شود:

$$t_j^k \leq t_{N_t+1,j}^{v,k} + \left(1 - x_{N_t+1,j}^{v,k}\right) N_V T \quad (۲۰)$$

$$t_j^k \geq t_{N_t+1,j}^{v,k} - \left(1 - x_{N_t+1,j}^{v,k}\right) N_V T \quad (۲۱)$$

به ازای: $k = 1,\ldots,N_k$ ، $j = 1,\ldots,N_t$ و $v = 1,\ldots,N_v$

به این ترتیب، تمامی محدودیت‌های مورد نیاز معرفی گردید. با اعمال محدودیت‌های معرفی شده در معماری سلسله مراتبی، به تدریج و مرحله به مرحله، محدودیت‌ها ارضا می‌گردند تا اشباع شوند و محدودیت‌های لازم که با علامت $\geq$ یا $\leq$ معرفی شده‌اند در صورت لزوم، به قید تساوی در آخرین مرحله اشباع می‌گردند.

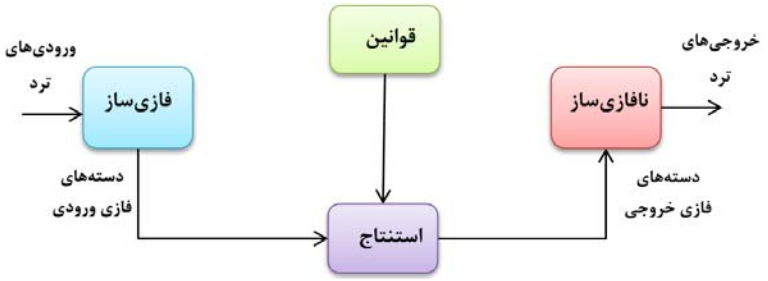
۳-۱- سیستم استنتاج فازی

الگوریتم کلاسیک برنامه‌ریزی خطی با در نظر گرفتن تمامی فضای حل مسأله، جواب بهینهٔ کلی را حاصل می‌نماید. الگوریتم‌های سلسله مراتبی به دلیل اختصاص وظایف به صورت مرحله به مرحله، فاقد چشم‌انداز سرتاسری می‌باشند و تنها گام‌های در مرحلهٔ اجرا را مد نظر قرار می‌دهند. از آن‌جا که اهداف تعریف شده، دارای سرعت و جهت متفاوت و منحصر به خود هستند؛ و الگوریتم مورد استفاده تنها گام پیش رو و فاصلهٔ لحظه‌ای را مد نظر قرار می‌دهد، عدم چشم‌انداز کافی، منجر به افزایش چشم‌گیر تابع هزینهٔ نهایی گردد که بهینه نیست. به عنوان مثال اگر اهدافی با سرعت بالا از پهپادها دور شوند درحالی‌که فاصلهٔ ابتدایی آن‌ها نسبت به دیگر اهداف، از پهپادها بیشتر است؛ در الگوریتم معرفی شده، دارای اولویت کم‌تری است. درحالی‌که جهت پاسخ بهینه‌تر، باید در اولویت بالاتری قرار گیرند.

سیستم استنتاج فازی راه حلی مناسب جهت پوشش این نقیصه می‌باشد. منطق فازی[1] نخستین بار توسط پروفسور لطفی‌زاده در زمینهٔ محاسبات نو ظاهر گردید [۳۱]. منطق فازی از ارزش‌دهی صفر و یک کلاسیک به سمت اختصاص نامعینی بین صفر تا یک حرکت کرده است. دانش عینی و تجربی در این حوزه نقش پررنگی ایفا می‌نماید. سیستم فازی دارای یک دسته قوانین براساس دانش خبره می‌باشد و روند استنتاج توسط این سیستم، در شکل (۲) نمایش داده شده‌است.

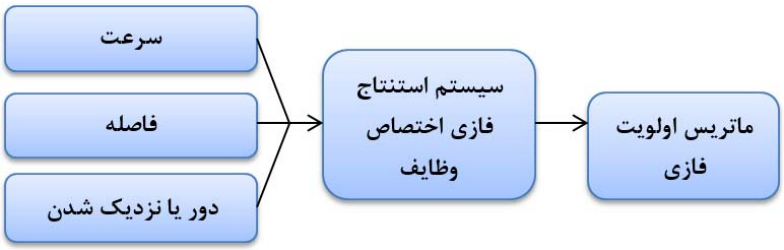
سیستم فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ[2](تی-اس-کا) در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم‌های استنتاج فازی، از مجموعه قوانین اگر-آن‌گاه فازی تشکیل شده است. مدل تی-اس-کا شبکه فازی مورد استفاده در مسألهٔ اختصاص وظایف مفروض، به شکل (۳) است:

n معرف تعداد متغیرهای مجموعهٔ فازی، Rule بیان قوانین تعریف شده و $A_{a,b}$ معرف تابع عضویت متناظر با متغیر a‌ام و قانون شمارهٔ b است. $f(x_1,x_2,...,x_n)$ یک تابع خطی از متغیرها و یا تابع ثابت چند ضابطه‌ای می‌باشد.



شکل۲- دیاگرام بلوکی سیستم استنتاج فازی

[1] Fuzzy logic
[2] Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

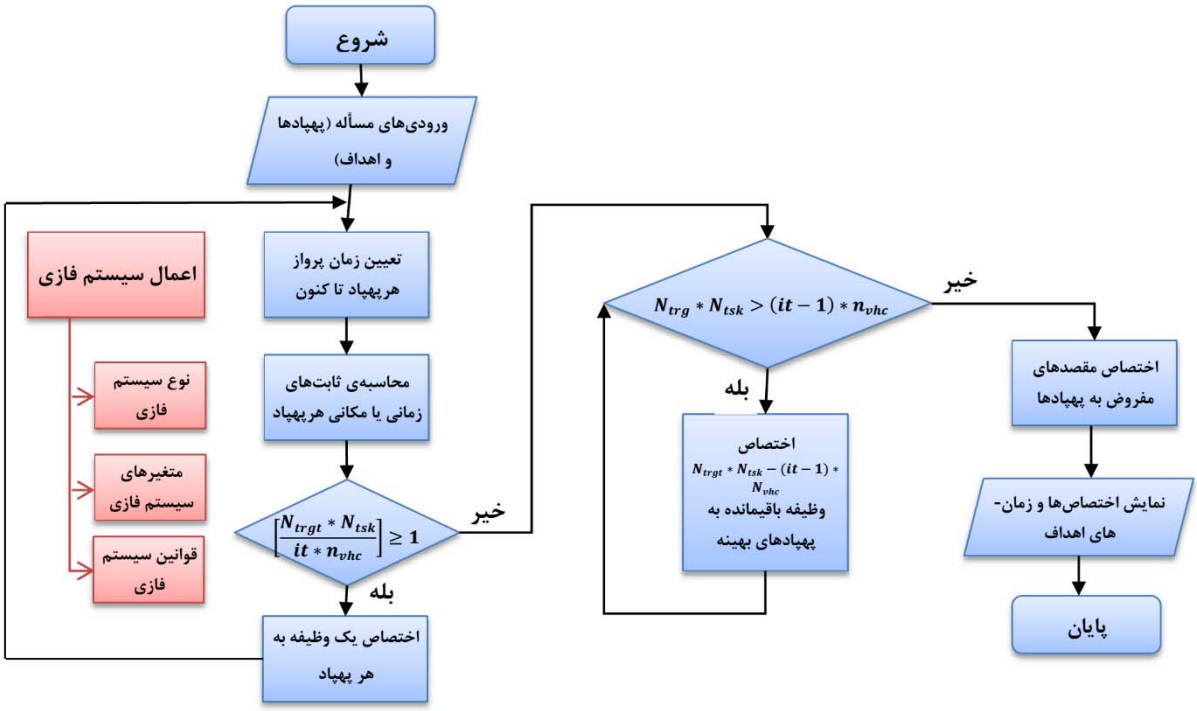


شکل ۳- معرفی متغیرها و خروجی سیستم فازی مورد استفاده

از آن‌جایی‌که هدف، ایجاد یک ماتریس اولویت هم‌سایز با متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله جهت بهبود اولویت‌بندی و افزایش چشم‌انداز سیستم است، تابع مورد استفاده، تابع ثابت چند ضابطه‌ای است. عوامل مؤثر در ایجاد اولویت‌بندی جدید و تغییر ضرایب در مسألهٔ اختصاص وظایف فرض شده، سرعت، فاصله و جهت هدف می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات سیستم فازی مورد استفاده

نوع استنتاج	تی-اس-کا
تعداد ورودی	۳
روش and	ضرب
استلزام فازی	مینیمم
اجماع	ماکسیمم
تعداد قوانین وضع شده	۱۸
نوع توابع عضویت	ذوزنقه‌ای



شکل ۴- فلوچارت الگوریتم ابتکاری استفاده شده

پس از ایجاد ماتریس اولویت فازی، هم سایز با ماتریس ضرایب و ضرب درایه به درایهٔ این ماتریس‌ها، ماتریس ضرایب جدید با ویژگی چشم‌انداز مناسب‌تر ایجاد می‌گردد. ویژگی‌های سیستم استنتاج فازی استفاده شده در جدول (۲) ارائه شده است. پس از معرفی سیستم فازی مورد نظر و اتصال این سیستم به الگوریتم سلسله مراتبی معرفی شده، لازم است بررسی‌های لازم جهت تأیید عملکرد سیستم معرفی شده به عمل آید.
در شکل (۴) فلوچارت الگوریتم معرفی شده آورده شده است.

۴- نتایج

پس از معرفی تئوری و متدهای مورد استفاده در الگوریتم معرفی شده، در این بخش به ارائهٔ نتایج و شبیه‌سازی‌های حاصل از اجرای مسألهٔ اختصاص وظایف پرداخته می‌شود. برای پیاده‌سازی مسأله، فرض‌های زیر بدون آسیب به کلیت مسأله، در نظر گرفته شده است:

- اهداف معرفی شده، دارای سرعت و جهت منحصر به خود می‌باشند. با انتخاب سرعت صفر، می‌توان اهداف را ثابت درنظر گرفت.
- برای ناوگان پهپادها، نقاط شروع و مقصد در نظر گرفته شده است؛ به نحوی که برای شروع مأموریت، از نقاط مبدأ حرکت نموده و پس از اجرای مأموریت‌های مختص به خود، به نقطهٔ مقصد حرکت می‌کنند.
- حرکت به سوی مقصد، در تصمیم‌گیری لحاظ نمی‌گردد و تنها اجرای سریع‌تر تمام وظایف در مأموریت‌ها مورد توجه است.
- سرعت حرکت پهپادها می‌تواند متفاوت لحاظ شود و اگر هدف دورتر نسبت به یک هدف نزدیک‌تر به یک پهپاد اختصاص یابد، به دلیل سرعت بالای پهپاد و یا اولویت بندی فازی مهم‌تر آن هدف می‌باشد.
- تعداد اختصاص‌های صورت گرفته برای هر پهپاد در هر مرحله از الگوریتم، یک عدد می‌باشد که این اتفاق به جهت شرایط متحرک بودن اهداف، در نظر گرفته شده است.

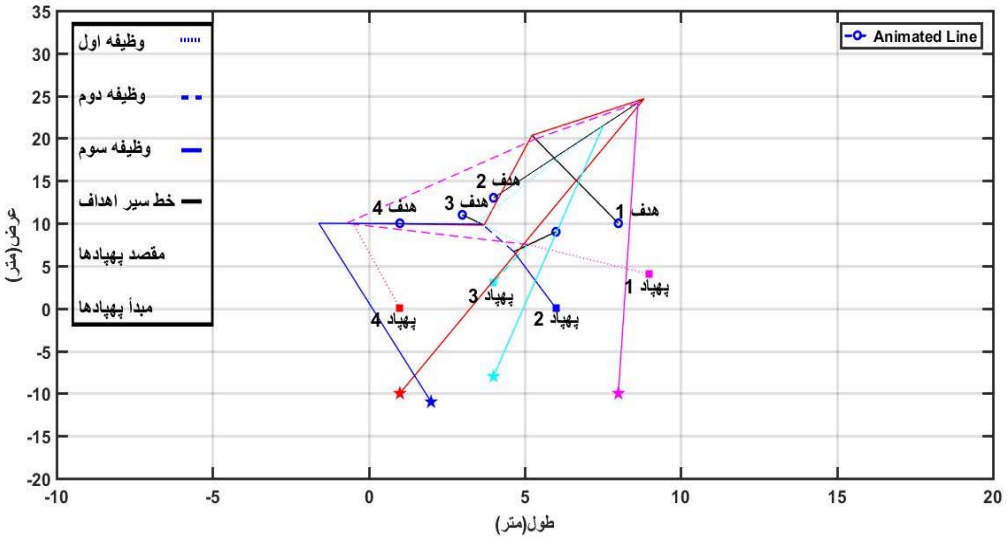
طبق صورت مسأله ارائه شده، اهداف متحرک فرض شده‌اند. به دلیل این ویژگی، حل مسأله توسط الگوریتم‌های کلاسیک، ناممکن است. الگوریتم فازی، قسمت مهم و ابتکاری مسأله جهت افزایش چشم‌انداز و کاهش تابع هزینه می‌باشد و شبیه‌سازی‌ها در مورد تأثیرگذاری این روش، ارائه شده است.

۴-۱- شبیه‌سازی

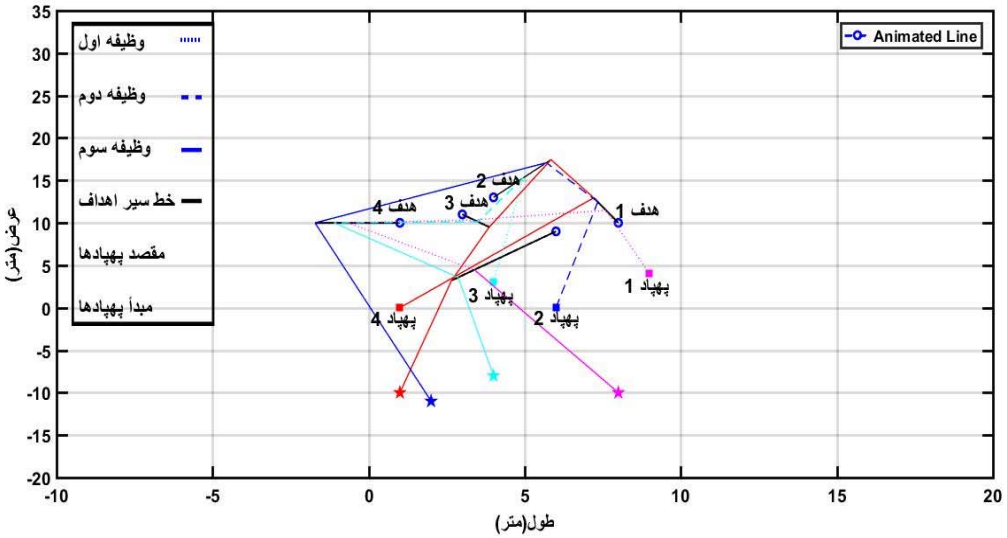
به منظور کسب آگاهی دقیق‌تر نسبت به کارکرد و دقت پیاده‌سازی مسألهٔ اختصاص وظایف، تعدادی شبیه‌سازی صورت پذیرفته است. در ابتدا، در شکل (۵) و (۶) مسألهٔ اختصاص وظایف برای دو نمونهٔ با تعداد اهداف به ترتیب ۴ و ۸ و هم‌چنین تعداد پهپادهای ناوگان پهپادی به ترتیب ۴ و ۸ عدد و با رویکردهای غیرفازی و فازی سلسله مراتبی حل، و شبیه سازی‌های لازم ارائه شده است. اطلاعات فرض شده در این دو شبیه سازی به شرح جدول (۳) است.

جدول ۳- جزئیات شبیه‌سازی‌های ارائه شده

	شبیه‌سازی ۱		شبیه‌سازی ۲	
	نافازی	فازی	نافازی	فازی
تعداد پهپادها	۴	۴	۸	۸
تعداد کل وظایف	۱۶	۱۶	۳۲	۳۲
زمان اجرا (ثانیه)	۱/۰۵۸۷	۱/۰۸۲۳	۸/۵۳۲۱	۸/۷۵۲۱
نوع حرکت اهداف	سرعت و جهت ثابت	سرعت و جهت ثابت	سرعت و جهت ثابت	سرعت و جهت ثابت
مقدار تابع هزینه نهایی	۱۲۶/۶۰۱۳	۹۰/۰۵۶۶	۱۹۱/۰۴۷۴	۱۴۹/۲۶۵۲



(الف) سلسله مراتبی نافازی



(ب) سلسله مراتبی فازی

شکل ۵- اختصاص وظایف با تعداد $\mathbf{N_{trgt}} = \mathbf{4}$ و $\mathbf{N_{vhc}} = \mathbf{4}$ (الف) الگوریتم سلسله مراتبی نافازی (ب) الگوریتم سلسله مراتبی فازی

شکل (۵) مسألهٔ اختصاص وظایف را برای ۴پهپاد و ۴ هدف حل نموده است. همان‌طور که قابل مشاهده است؛ اهداف در نظر گرفته شده با سرعت‌ها و جهت‌های مختلف، تصمیم‌گیری در مورد اختصاص وظایف را به چالش کشیده‌اند. با دقت به شکل، کاهش مسافت طی شده توسط تیم پهپادها در حالت استفاده از الگوریتم فازی، قابل مشاهده است. زمان انجام مأموریت در قسمت (الف) شکل، ۱۲/۶۲۶۶ دقیقه و برای شکل (ب) ۱۱/۱۴۷۶ می‌باشد؛ که نشان‌دهندهٔ کارکرد مناسب الگوریتم فازی و تابع چندهدفهٔ مفروض در این پژوهش می‌باشد.

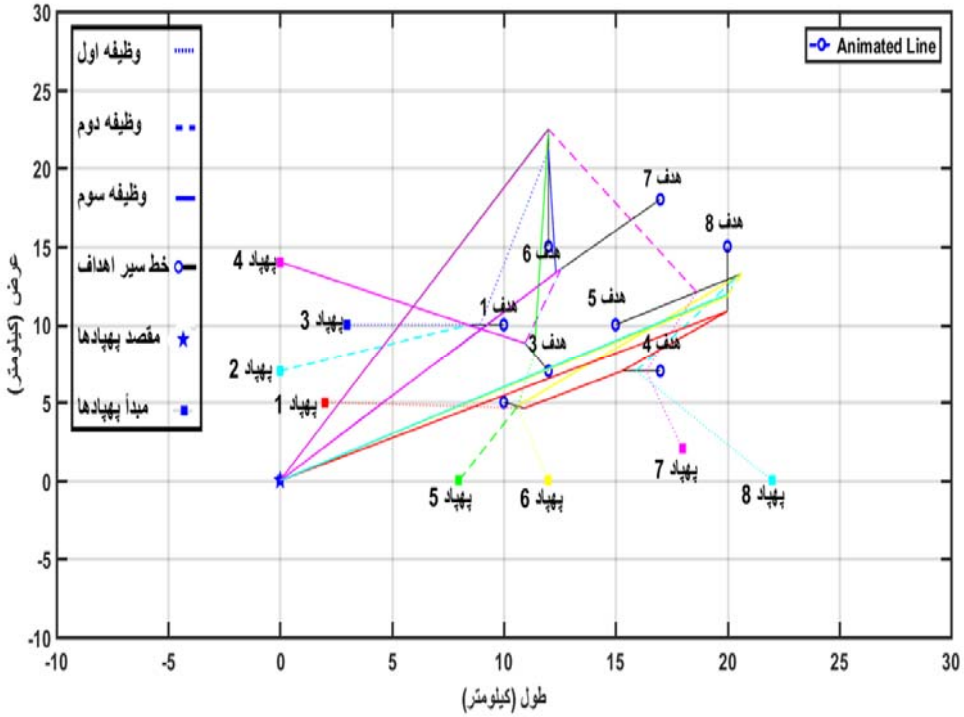
در ادامه، همین روند برای تعداد ۸ هدف و ۸ پهپاد در شکل (۶) قابل رؤیت می‌باشد. به منظور نمایش انعطاف در معماری نوشته شده و شامل کردن جزئیات متفاوت در شبیه سازی‌ها، فرض شده است تمامی اهداف، پس از اتمام مأموریت خود، به نقطهٔ مبدا حرکت می‌کنند. زمان اتمام کامل مأموریت‌ها و بازگشت ناوگان پهپادها به مقصد، در حالت اول و بدون استفاده از سیستم استنتاج فازی، ۱۱/۰۰۹۱ دقیقه و برای حالت دوم، ۱۰/۸۳۶۵ دقیقه می‌باشد. برنامه‌ریزی خطی صحیح کلاسیک به دلیل زیر نظر گرفتن تمام فضای شدنی مسألهٔ اختصاص وظایف، با افزایش ابعاد مسأله، زمان زیادی جهت رسیدن به جواب نهایی، نیاز دارد.

الگوریتم برنامه‌ریزی خطی ابتکاری ذکر شده، به دلیل حل تدریجی مسأله، زمان کم‌تری برای حل مسأله نیاز دارد. همانند همهٔ حل‌کننده‌های اختصاص وظایف، با افزایش ابعاد مسأله، زمان مورد نیاز برای حل مسأله افزایش می‌یابد. در شکل (۷) زمان مورد نیاز برای حل مسأله‌های با تعداد متفاوت پهپاد و وظایف، در دو حالت الگوریتم سلسله مراتبی بدون سیستم استنتاج فازی و با سیستم فازی معرفی شده ارائه شده است. طبق انتظار، با افزایش ابعاد مسأله، زمان حل افزایش می‌یابد. استفاده از سیستم فازی به طور متوسط، تنها باعث افزایش ۲٪/۲۷۸۹ زمان محاسبه می‌گردد که در قیاس با ابعاد مسأله، زمان ناچیزی به نظر می‌رسد.

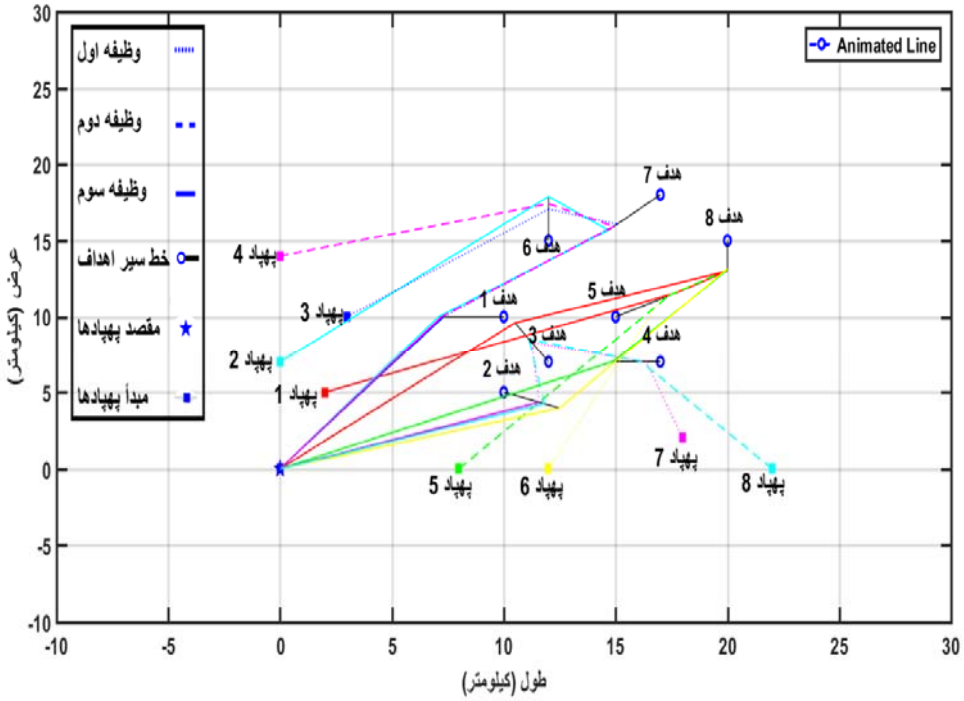
ویژگی الگوریتم سلسله مراتبی، حل تدریجی و مرحله به مرحلهٔ مسائل اختصاص وظایف می‌باشد. به همین دلیل پس از هر مرحله حل مسأله و با توجه به تغییر نیافتن اختصاص‌های تعیین شدهٔ هر مرحله در مراحل بعد، می‌توان به راحتی خروجی هر مرحله را پس از حل آن مرحله، جهت پیاده‌سازی به تیم پهپادها ارسال نمود. این ویژگی سبب کاهش چشم‌گیر زمان لازم برای ارسال پهپادها به سوی هدف می‌گردد و به همین دلیل تا ابعاد بالاتر از متوسط، قابلیت حل به هنگام را دارند.

الگوریتم‌های برنامه‌ریزی خطی ابتکاری، عموما به دلیل فقدان چشم‌انداز، منجر به کاهش عملکرد و افزایش مقدار تابع هزینه می‌گردد. مقایسهٔ اختصاص وظایف در نظر گرفته شده در این مقاله که با اهداف متحرک می‌باشد، بین دو رویکرد کلاسیک و رویکرد معرفی شده، به دلیل عدم توانایی برنامه‌ریزی خطی کلاسیک در پوشش مسائل دینامیک، مقدور نیست. از آن رو که تاکنون در پژوهش‌های صورت پذیرفته شده در حیطه‌ی اختصاص وظایف، به صورت اختصاصی به ارائه‌ی رویکردی جهت اعمال شرایط دینامیکی اهداف، پرداخته نشده است و تنها به مسأله‌ی تعقیب هدف اشاره شده است، برای مقایسه‌ی عملکرد سیستم معرفی شده، تنها ناگزیر به مقایسه‌ی آن با رویکردهای کلاسیک و استاتیک می‌باشیم.

برای مقایسهٔ عملکرد این دو نوع شبکه با فرض صفر در نظر گرفتن سرعت‌های تمامی اهداف، به مقایسهٔ این دو رویکرد، مطابق شکل (۹) پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل پیداست، رویکرد سلسله مراتبی منجر به افزایش تابع هزینه نسبت به حل مسألهٔ مشابه در الگوریتم کلاسیک می‌گردد.



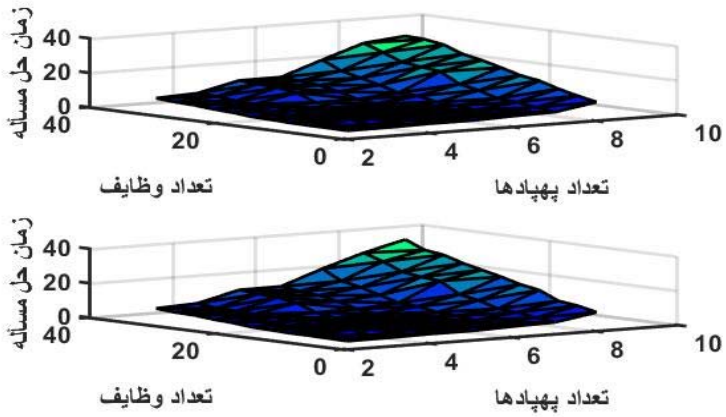
(الف) سلسله مراتبی نافازی



(ب) سلسله مراتبی فازی

شکل۶- اختصاص وظایف با تعداد $\mathbf{N_{trgt}} = \mathbf{8}$ و $\mathbf{N_{vhc}} = \mathbf{8}$ (الف) الگوریتم سلسله مراتبی نافازی

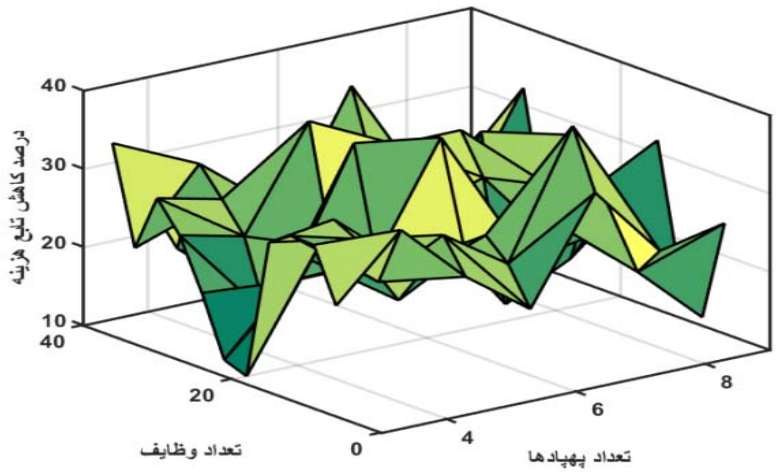
(ب) الگوریتم سلسله مراتبی فازی



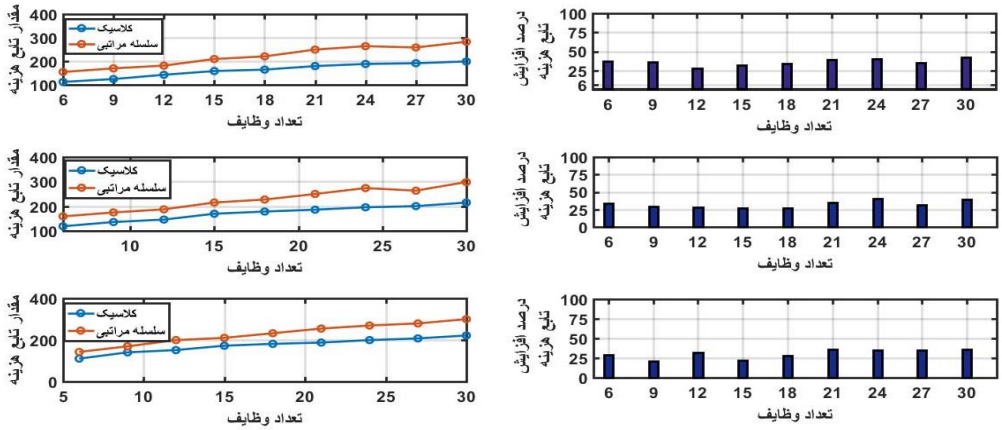
شکل ۷– زمان لازم برای حل مسأله در (الف) الگوریتم سلسله مراتبی نافازی (ب) الگوریتم سلسله مراتبی فازی

میزان این افزایش در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، متناسب با مسأله و فرضیات مسأله و از بین رفتن چشم‌انداز، بین ۲۰ تا ۴۵ درصد می‌باشد. این افزایش به سبب کاهش چشم‌انداز کلی می‌باشد حال آن‌که این روش برخلاف رویکردهای کلاسیک و فرا ابتکاری معرفی شده توسط محققان، قابلیت پوشش کامل شرایط محیط دینامیک را دارد که خود منجر به ارائه‌ی راهکار مناسب‌تر به نسبت مسائل تعقیب است.

به منظور کاهش اثرات منفی ناشی از الگوریتم سلسله مراتبی، سیستم فازی معرفی شده، برای چند نوع مأموریت اختصاص وظایف، به کار گرفته شده است. در تمام شبیه‌سازی‌های نمونه، اهداف دارای سرعت‌ها و جهت‌های متنوعی بوده تا بتوان تأثیرات اولویت‌بندی فازی را مشاهده نمود. در الگوریتم فازی به کار گرفته شده، با تعریف قوانین مرتبط، برای اهداف با جهت‌های حرکت و سرعت‌های متفاوت و براساس دور یا نزدیک شدنشان، اولویت‌های متفاوت به صورت ضرایب تعیین و در قالب ماتریس هم سایز با ماتریس ضرایب برنامه‌ریزی خطی، در آن‌ها ضرب شده و تغییرات لازم برای ترتیب اختصاص وظایف، صورت می‌پذیرد. با توجه به شکل(۸) مقدار این کاهش متفاوت و در محدودهٔ ۱۰ تا ۳۵ درصد می‌باشد. این کاهش، مستقیما بر کاهش مصرف سوخت و هم‌چنین کاهش زمان اتمام مأموریت توسط ناوگان پهپادها مؤثر است.



شکل ۸– درصد کاهش تابع هزینه در رویکرد فازی سلسله مراتبی



شکل ۹- مقایسه الگوریتم های کلاسیک و سلسله مراتبی با تعداد پهپاد (الف) ۴ (ب) ۶ و (ج) ۸ عدد و درصد افزایش توابع هزینه مربوط به آنها

بدین ترتیب، برخلاف پژوهش‌های پیشین که تنها راهکار پیشنهادی جهت پوشش شرایط دینامیکی اهداف، اختصاص و سپس معرفی رویکرد مجزای تعقیب هدف بود، رویکرد معرفی شده، توسعه‌ی یک الگوریتم براساس رویکردهای کلاسیک با روش‌های فرا ابتکاری که قابلیت پوشش مسائل با اهداف متحرک و ارائه‌ی راهکاری بهینه را داراست.

۴-۲- طراحی، ساخت و سنجش پانل کاربری

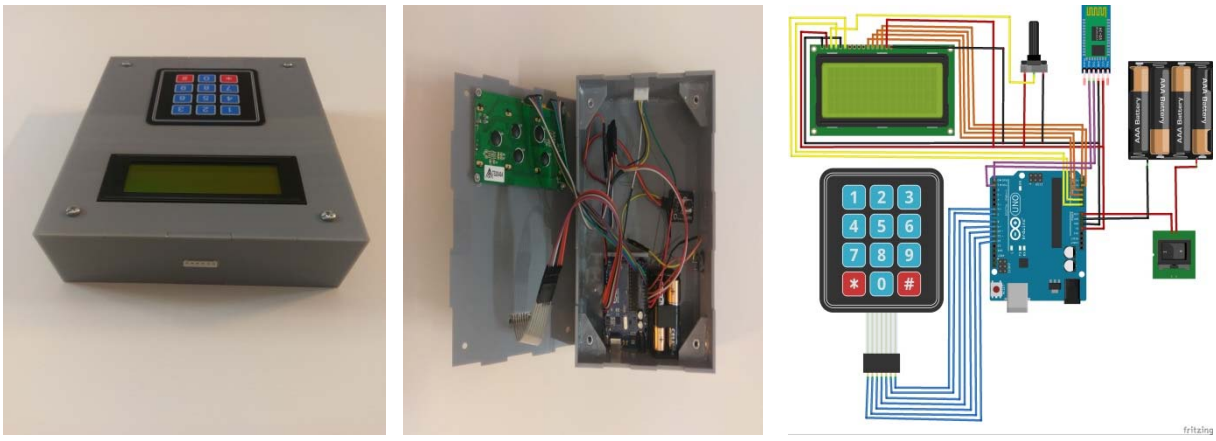
به منظور جامعیت بیش‌تر این پژوهش، طراحی یک پانل کاربری جهت انجام تصمیم‌گیری در مسائل اختصاص وظایف، صورت پذیرفته است. اهداف اصلی طراحی و ساخت پانل به شرح زیر است:

۱. سنجش توانایی سیستم تصمیم‌گیرنده در مسائل اختصاص وظایف.
۲. با توجه به توانایی بالای الگوریتم در حل به هنگام مسائل، وجود پانل کاربری می‌تواند به نظارت و فرستادن موقعیت‌های عامل‌های هم‌کار به سیستم نظارت، کمک نماید. با توجه به محدودیت‌های موجود در زمینه‌ی اجرای واقعی مسأله بر روی یک تیم پهپادی با تعداد بالا، از اطلاعات داده‌های شبیه‌سازی لحظه‌ای به جای داده‌های ارسالی ناوگان پهپادی هم‌چون اطلاعات موقعیتی، استفاده شده است.
۳. با پیاده‌سازی یک سیستم بلوتوثی بر روی پانل موجود، توانایی دریافت و ارسال کلیه‌ی اطلاعات و دستورات لازم، شامل داده‌های دریافت شده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) بدون اتصال فیزیکی برقرار شده است. قابل ذکر است در محیط آزمایشگاهی، برد ماژول بلوتوث کافی بوده و در موارد استفاده در مأموریت‌های وسیع و عملیاتی می‌توان از سیستم‌های رادیویی استفاده نمود.

بخش اصلی و مغز متفکر پانل، مدارات الکترونیکی و برنامه‌ی اجرایی آن هستند که مطابق شکل (۱۰) شامل میکروکنترلر آردوینو، ال‌سی‌دی، کی‌پد جهت اعمال دستورات لازم، ماژول بلوتوث مدل HC-05، پتاسیومتر، کلید راکر دوحالته، کانکتور مخابراتی و دیگر موارد می‌باشد. علاوه بر اجرای مسأله‌ی اختصاص وظایف به صورت عملی و با استفاده از پانل طراحی شده، جهت افزایش عمومیت مسأله و سنجش کارایی پانل و روش معرفی

شده، پس از اعمال شرایط اولیه‌ی مسأله، اعم از موقعیت اولیه‌ی اهداف و پهپادها و شرایط دینامیکی اهداف معرفی شده، اجرای مسأله توسط پانل انجام می‌گیرد و در هر مرحله با تعیین وظایف و مسئولیت‌های هر کدام از عامل‌های موجود در ناوگان پهپادی، اطلاعات در قالب کدبندی‌های لازم به ناوگان پهپادی، ارسال می‌گردد که در این‌جا این اطلاعات به شبیه‌ساز ایجاد شده در نرم‌افزار متلب که تصاویر نهایی در اشکال (۵) و (۶) به عنوان نمونه ارائه شده، ارسال می‌گردد و مطابق شکل (۱۱) در برنامه‌ی جامع ارائه شده، شرایط اضطراری و تأخیر نیز اعمال شده است. پانل معرفی شده با دریافت ورودی‌های لازم و شرایط محیط از جمله محل و سرعت و جهت اهداف متحرک، در صدد حل مسأله‌ی موجود برمی‌آید. تنها مورد لازم جهت ارزیابی این سیستم، بر اثر اختلاف زمانی حل مسأله و ارسال دستور اجرای وظایف به ناوگان پهپادی به وجود می‌آید که جهت ارزیابی این مقوله، به مقایسه‌ی تابع هزینه‌ی نهایی و مسافت‌های طی شده در اجرای مأموریت‌های هم‌کاری در دو صورت استفاده از پانل کاربری و حل سیستمی بدون سخت‌افزار می‌باشد که در جدول (۴) نمایش داده شده است. در پیاده‌سازی شرایط موجود در تمامی بخش‌های این پژوهش، سعی شده است تا سرعت‌ها، محدودیت‌ها و مداومت پروازی عامل‌های ناوگان پهپادی براساس پهپادهای موجود در ایران باشند.

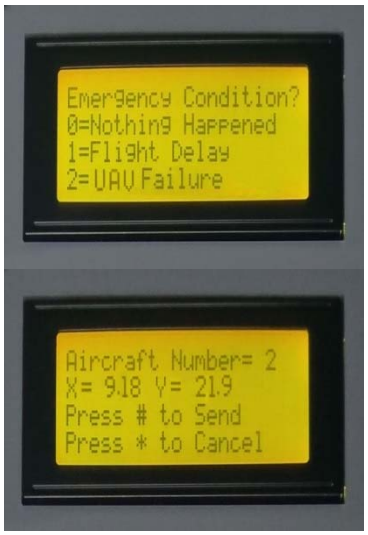
با توجه به داده‌های جدول (۴) می‌توان ادعا نمود، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین اجرای عملی و صرفا سیستمی رویکرد معرفی شده وجود ندارد. تفاوت ناچیز ۳ تا ۶ درصدی توابع هزینه در مقایسه‌ی دو حالت، موید توانایی اجرای عملی الگوریتم توسعه داده شده می‌باشد. تفاوت اندک بین مقادیر تابع هزینه و عملکرد سیستم ناشی از تأخیرهای ناگزیر ناشی از ارتباطات و ارسال داده‌ها می‌باشد که در تمامی سیستم‌ها امری بدیهی می‌باشد. بدین ترتیب الگوریتم معرفی شده، با توانایی تصمیم‌گیری بهینه در شرایط دینامیکی محیط عملیاتی، راهکاری مناسب و عملی جهت اجرای مأموریت توسط ناوگان پهپادهای هم‌کار را مهیا می‌سازد.



(الف) (ب) (ج)

شکل۱۰– پانل تصمیم‌گیری طراحی شده (الف) شماتیک مدار طراحی شده در نرم‌افزار Fritzing (ب) نمای داخل پانل (ج) نمای کلی پانل

(الف)



(ب)

شکل۱۱- پانل تصمیم‌گیری طراحی شده (الف) اتصال با شبیه‌ساز متلب (ب) درنظر گرفتن شرایط اضطراری و تأیید ارسال عامل‌ها پس از اختصاص

جدول۴- مقایسه نتایج مدل‌های مفروض با دو روش عملی و بدون استفاده از پانل کاربری

	تعداد پهپادها	تعداد اهداف	مقدار تابع هزینه عملی	مقدار تابع هزینه با حل سیستمی	تعداد تغییر در لیست اختصاص‌ها	درصد افزایش تابع هزینه (مسافت و زمان کلی)
مدل ۱	۵	۸	۱۴۷/۱۶۲	۱۳۹/۶۳۲	۰	۵/۳۹۳
مدل ۲	۶	۹	۱۶۳/۴۵۲	۱۵۶/۲۴۶	۱	۴/۶۱۲
مدل ۳	۹	۱۲	۱۷۸/۳۶۲	۱۷۲/۴۴۲	۰	۳/۴۳۳
مدل ۴	۱۰	۱۴	۱۹۸/۷۷۴	۱۸۶/۳۶۴	۰	۶/۶۶۶
مدل ۵	۱۱	۱۴	۲۱۸/۸۵۱	۲۰۵/۳۶۵	۲	۶/۵۶۷

۵- نتیجه‌گیری

با توسعهٔ روزافزون در ارتقای سیستم‌های انفرادی و کنترل عامل‌ها به صورت منفرد، توجهات محققان به توسعهٔ سیستم‌های هم‌کار جهت بهبود عملکرد اجرایی در مأموریت‌ها جلب شده است. در پیاده‌سازی سیستم‌های هم‌کار ذکر شده، ایجاد یک معماری جهت اخذ تصمیمات و محول نمودن وظایف به هر عامل و پیش‌برد مأموریت به صورت پیوسته، یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین گام‌ها در این زمینه می‌باشد. در این پژوهش با اشاره به الگوریتم سلسله مراتبی خطی صحیح و قیود و ملزومات اجرای آن، شبیه‌سازی‌هایی در مسائل اختصاص وظایف صورت پذیرفته است. در ادامه، با معرفی سیستم فازی تی-اس-کا و معرفی متغیرهای زبانی و قوانین لازم، به بهبود عملکرد آن‌ها پرداخته شده است.

نکات زیر پس از پیاده‌سازی سیستم‌های لازم قابل استنباط می‌باشد:

✓ هر شبیه‌سازی و ارائهٔ سیستم برای پدیده‌های فیزیکی، زمانی اعتبار بالایی خواهد داشت؛ که شرایط دینامیکی محیط در این ملاحظات، در نظر گرفته شوند. به منظور اعمال شرایط دینامیکی، اهداف مورد نظر جهت اجرای وظایف، دارای موقعیت متغیر با زمان می‌باشند. اهداف در این پژوهش با سرعت ثابت و جهت

منحصر به خود در نظر گرفته شده‌اند. از این‌رو، برنامه‌ریزی خطی کلاسیک، به دلیل ماهیت خطی خود، قادر به حل مسأله نیست. با اعمال تغییرات لازم، الگوریتم سلسله مراتبی جهت پیاده‌سازی گام‌های زمانی و پوشش مسائل دینامیک، ایجاد شده است.

✓ ویژگی مناسب الگوریتم‌های برنامه‌ریزی خطی، توانایی پیاده سازی کامل و قطعی تمام محدودیت‌های لازم برای اجرای مأموریت اختصاص وظایف است. محدودیت‌های زمانی و غیرزمانی مورد نیاز معرفی و در معماری مورد استفاده، اجرا شده‌اند. قابلیت بالای پیاده سازی محدودیت‌ها، توانایی بسط این معماری، متناسب با خواسته‌های هر مأموریت مورد نظر را فراهم نموده است.

تابع هزینهٔ مورد استفاده، تابعی چندهدفه به منظور پوشش دو هدف کاهش زمان اجرای مأموریت و کاهش مجموع مسافت‌های طی شده در طول اجرای مأموریت توسط پهپادها می‌باشد.

✓ مقایسهٔ الگوریتم سلسله مراتبی با کلاسیک منجر به آگاهی از افزایش ۲۰ تا ۴۵ درصدی تابع هزینهٔ الگوریتم سلسله مراتبی نسبت به روش کلاسیک، در پیاده سازی مأموریت با اهداف ثابت می‌گردد. به منظور پوشش مناسب این کاهش عملکرد معماری سلسله مراتبی که منجر به افزایش هزینه‌های اجرای مأموریت می‌گردد، از یک سیستم استنتاج فازی از نوع تی-اس-کا، در کنار الگوریتم اختصاص وظایف، استفاده شده است. نتیجهٔ حاصل شده، مؤید کاهش ۱۰ تا ۳۵ درصدی تابع هزینه، در اجرای مأموریت با اهداف متحرک شده است.

✓ گسترهٔ پوشش این الگوریتم با علم بر اختصاص مرحله به مرحله و توانایی ارسال مأموریت‌های محول شده به پهپادهای ناوگان پهپادی پس از اجرای هر مرحله، مسائل با ابعاد بالای متوسط و تا ۴۰ وظیفه و ۱۵ پهپاد می‌باشد. دقت بالاتر پاسخ این الگوریتم نسبت به روش‌های فرا ابتکاری و بهبود آن توسط سیستم فازی، زمینه‌ای مناسب را جهت اجرای مأموریت‌های استراتژیک، معرفی می‌نماید.

✓ طراحی، ساخت و استفاده از پانل کاربری جهت اجرای الگوریتم مفروض در شرایط عملیاتی صورت پذیرفته است. پس از دریافت شرایط اولیه و اعمال تمامی تغییرات اعم از شرایط اضطراری از طریق پانل یا ارسال داده توسط ماژول‌های بکار گرفته شده، دستورات لازم به شبیه‌ساز طراحی شده در متلب ارسال می‌گردد. شبیه‌ساز تنها جهت ارسال و نمایش ناوگان پهپادی و به دلیل محدودیت‌های موجود در استفاده عملی از ناوگانی از پهپادها، استفاده می‌گردد. تمامی نتایج تأیید کننده قابلیت عملیاتی این الگوریتم بوده و افزایش ناچیز تابع هزینه (بین ۳ تا ۶ درصد) به دلیل تأخیرهای ارسال و دریافت، توسط ماژول‌ها و اجرا در محیط متلب می‌باشد.

مراجع

[1] Chandler, P., Meir, P., Steven, R., and Corey, S., "Multiple Task Assignment for a UAV Team", In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, California, USA, pp. 4587-4593, (2002).

[2] Ghamry, K. A., Mohamed, A. K., and Youmin, Z., "Multiple UAVs in Forest Fire Fighting Mission using Particle Swarm Optimization", In 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, USA, pp. 1404-1409, (2017).

[3] Shima, T., and Schumacher, C., "Assigning Cooperating UAVs to Simultaneous Tasks on Consecutive Targets using Genetic Algorithms", Journal of the Operational Research Society, Vol. 60, No. 7, pp. 973-982, (2009).

[4] Casbeer, D. W., and Holsapple, R. W., "Column Generation for a UAV Assignment Problem with Precedence Constraints", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 21, No. 12, pp. 1421-1433, (2011).

[5] 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, No. 4, pp. 516-527, (2007).

[6] Yao, N., 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, No. 1, pp. 1-8, (2008).

[7] Bellingham, J., Kuwata, Y., and How, J., "Stable Receding Horizon Trajectory Control for Complex Environments", In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Taxes, USA, pp. 5635-5642, (2003).

[8] Toth, P., and Vigo, D., "*The Vehicle Routing Problem*", Volume 9 of SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Application, Chapter 6, pp. 129-154, SIAM, Philidelphia, (2002).

[9] Alighanbari, M., "Task Assignment Algorithms for Teams of UAVs in Dynamic Environments", PhD diss., Massachusetts Institute of Technology, USA, (2004).

[10] Darrah, M. A., Niland, W., and Stolarik, B., "Multiple UAV Task Allocation for an Electronic Warfare Mission Comparing Genetic Algorithms and Simulated Annealing (Preprint)", Institute for Scientific Research Farimont, (2006).

[11] Edison, E., and Shima, T., "Integrated Task Assignment and Path Optimization for Cooperating Uninhabited Aerial Vehicles using Genetic Algorithms", Computers & Operations Research, Vol. 38, No. 1, pp. 340-356, (2011).

[12] Shaferman, V., and Shima, T., "Unmanned Aerial Vehicles Cooperative Tracking of Moving Ground Target in Urban Environments", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 31, No. 5, pp. 1360-1371, (2008).

[13] Fu, X., Feng, P., and Gao, X., "Swarm UAVs Task and Resource Dynamic Assignment Algorithm Based on Task Sequence Mechanism", IEEE Access, Vol. 7, No. 1, pp. 41090-41100, (2019).

[14] Gu, J., Su, T., Wang, Q., Du, X., and Guizani, M., "Multiple Moving Targets Surveillance Based on a Cooperative Network for Multi-UAV", IEEE Communications Magazine, Vol. 56, No. 4, pp. 82-89, (2018).

[15] Hafez, A. T., and Kamel, M. A., "Cooperative Task Assignment and Trajectory Planning of Unmanned Systems via HFLC and PSO", Unmanned Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 65-81, (2019).

[16] Jia, Z., Yu, J., Ai, X., Xu, X., and Yang, D., "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, No. 1, pp. 112-125, (2018).

[17] Jiang, X., Zhou, Q., and Ye, Y., "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, Hong Kong, pp. 113-117, (2017).

[18] Zhu, M., Du, X., Zhang, X., Luo, H., and Wang, G., "Multi-UAV Rapid-Assessment Task-assignment Problem in a Post-earthquake Scenario", IEEE Access, Vol. 7, No. 1, pp. 74542-74557, (2019).

[19] Hu, X., Ma, H., Ye, Q., and Luo, H., "Hierarchical Method of Task Assignment for Multiple Cooperating UAV Teams", Journal of Systems Engineering and Electronics, Vol. 26, No. 5, pp. 1000-1009, (2015).

[20] Zhao, Z., Yang, J., Niu, Y., Zhang, Y., and Shen, L., "A Hierarchical Cooperative Mission Planning Mechanism for Multiple Unmanned Aerial Vehicles", Electronics, Vol. 8, No. 4, pp. 1-21, (2019).

[21] Zheng, L. W. Z., and Cai, K. Y., "Bi-level Programming Based Real-time Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles", Knowledge-Based Systems, Vol. 44, No. 1, pp. 34-47, (2013).

[22] Song, B. D., Park, K., and Kim, J., "Persistent UAV Delivery Logistics: MILP Formulation and Efficient Heuristic", Computers & Industrial Engineering, Vol. 120, No. 1, pp. 418-428, (2018).

[23] Perez-Carabaza, S., Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., and Jesus, M., "Ant Colony Optimization for Multi-UAV Minimum Time Search in Uncertain Domains", Applied Soft Computing, Vol. 62, No.1, pp. 789-806, (2018).

[24] Chen, Y., Yang, D., and Yu, J., "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, No. 6, pp. 2853-2872, (2018).

[25] Grippa, P., Behrens, D. A., Wall, F., and Bettstetter, C., "Drone Delivery Systems: Job Assignment and Dimensioning", Autonomous Robots, Vol. 43, No. 2, pp. 261-274, (2019).

[26] Kopeikin, A., Heider, S., Larkin, D., Korpela, C., Morales, R., and Bluman, J. E., "Unmanned Aircraft System Swarm for Radiological and Imagery Data Collection", In AIAA Scitech 2019 Forum, Copenhagen, Denmark, pp. 2286-2293, (2019).

[27] Shaffer, J., Carrillo, E., and Xu, H., "Receding Horizon Synthesis and Dynamic Allocation of UAVs to Fight Fires", In 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen, Denmark, pp. 138-145, (2018).

[28] Lin, J., Jia, G., and Hou, Z., "Research on the Task Assignment of Heterogeneous UAV Formation in the Anti-radar Combat", In 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Shenyang, China, pp. 2028-2033, (2018).

[29] Adamey, E., Oğuz, A. E., and Özgüner, Ü., "Collaborative Multi Mobile Sensor Agents Multi-target Tracking and Surveillance: a Divide & Conquer Method using Region Allocation Trees", Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 87, No. 3, pp. 471-485, (2017).

[30] Meng, W., He, Z., Su, R., Yadav, P. K., Teo, R., and Xie, L., "Decentralized Multi-UAV Flight Autonomy for Moving Convoys Search and Track", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 25, No. 4, pp. 1480-1487, (2016).

[31] Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets," Information and Control, Vol. 8, No. 1, pp. 338-353, (1965).

فهرست نمادهای انگلیسی

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 پهپادها
T_v	زمان مداومت پروازی بین پهپاد vام
$x_{i,N_t+1}^{v,k}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری حرکت از گرهٔ شمارهٔ i به مقصد برای پهپاد vام
$x_{i,j}^{v,k}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری اختصاص وظیفهٔ k روی گرهٔ j در حرکت از گرهٔ i برای پهپاد vام
$x_{N_t+1,j}^{v,k}$	متغیر تصمیم‌گیری باینری حرکت از نقطهٔ شروع به گرهٔ شمارهٔ j برای پهپاد vام
$t_{i,j}^{v,k}$	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 مرحلهٔ itام مسأله نیاز دارد
$A_{a,b}$	معرف تابع عضویت متناظر با متغیر aام و قانون شمارهٔ b
Y	خروجی ترد سیستم فازی تی-اس-کا

Abstract

In this paper, the task assignment of a fleet of cooperative heterogeneous UAVs in a dynamic environment including moving targets was examined. An appropriate architecture was applied by using a hierarchical mixed-integer linear programming in order to solve task assignment problems within the reasonable range. To enhance the outlook of solution architecture and therefore achieving some near optimum assignments, a combination of the proposed architecture and a TSK-type Fuzzy inference system was introduced.
The results approved a conflict-free and optimal solution in the task assigning problems. Efficiency increase of the proposed innovative architecture in existence of Fuzzy inference systems ranges from 10 to 35 percent. In order to evaluate the proposed approach in experimental and practical terms, a user panel has been designed and used and with the help of this panel, the capability of practical implementation of this approach has been presented.